ISSN 2223-0807
DOI 10.1872/MMF-2016-0

Министерство образования и науки РФ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ MMESE-2016

Материалы 5-й Международной научно-практической конференции

30 июня – 01 июля 2016 года

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2016

ISSN 2223-0807
УДК 378.1: 621.01
DOI 10.1872/MMF-2016-0

Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 1445 с.

В сборнике представлены материалы, отражающие опыт различных вузов в подготовке бакалавров, специалистов и магистров машиностроительного профиля. Особое внимание уделено отражению в учебных планах и программах учебных дисциплин требований, предъявляемых современным машиностроением к уровню подготовки выпускников вузов. Представлены также результаты научно-исследовательских работ в области машиностроения.

Сборник предназначен для преподавателей вузов, занимающихся подготовкой бакалавров, специалистов и магистров машиностроительного профиля, а также инженеров и научных работников, работающих в области машиностроения.

© Евграфов А.Н., Попович А.А.,
научное редактирование, 2016
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2016

Научные редакторы

Александр Николаевич Евграфов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.evgrafov@spbstu.ru

Анатолий Анатольевич Попович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: director@immet.spbstu.ru

Программный комитет

Проф. М.М. Радкевич, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. А.Н. Евграфов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. М.С. Бундур, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. В.Л. Жавнер, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. В.И. Каразин, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. К.П. Манжула, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. М.А. Скотникова, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. М.С. Кокорин, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. Э.Л. Жуков, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия.

Организационный комитет

Проф. Александр Н. Евграфов, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. Анатолий А. Попович, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. Михаил М. Радкевич, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Проф. Ярослав Райчик, Честоховский политехнический университет, Польша

Проф. Ramasubbu Sunder, Director Research, Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd

Доц. Николай Казаков, Технически Университет, София, Болгария

Проф. Владимир А. Пухлий, Севастопольский государственный университет, Россия.

Проф. Ольга В. Егорова, МГТУ имени Н.Э.Баумана, Россия

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

Аксенов Л.Б.
Лень студенческая: осуждение и понимание 2

Atanasova S.I
An approach for evaluating the discipline “applied geometry and engineering graphics” 12

Афанасьева И.Б., Князева Е. В.
Современные электронные средства представления графической информации в учебном процессе 19

Афанасьева И.Б., Кокорин М.С.
Перспективные проекции как иллюстрация схемы Гаука, используемая в курсе геометрического моделирования 33

Блинов Л.Н., Васильев М.Н., Соколов И.А.
Формирование общекультурных компетенций – важнейший элемент формирования технических специалистов высшей школы 43

Бойко Н.И., Шевченко Е.Б.
Анализ технологий преподавания. Методика внедрения новых технологий в процесс обучения студентов технических вузов 54

Буляница А.Л.
Оценка студентами ИВТОБ содержания курса «специальные разделы математики» - принципы, подходы, выводы 64

Васильев В.Е., Лагунова М.В., Ежова Н.В.
Дистанционное обучение студентов-заочников механико-машиностроительного отделения ИММиТ 72

Иванова Н.С., Красильникова Г.А., Крыжановская И.М.,Смирнова И.С.
Интернет-сетевые технологии в педагогической терапии неуспеваемости студентов по графическим дисциплинам 81

Красильникова Г. А., Маркова Т. В.
3d-моделирование как средство самоконтроля знаний геометрии форм и позиционных отношений компонентов сборочной единицы машиностроительного изделия 90

Маркова Т. В. , Никитина Т. А., Долгая Н. А.
Опыт разработки и внедрения учебных плакатов по инженерной графике 98

Наумкин Н. И., Купряшкин В. Ф., Кондратьева Г. А., Пивкин Д. В.
Особенности проектирования педагогической технологии обучения студентов практической инновационной деятельности на основе включения в дисциплины учебного модуля 107

Наумкин Н. И., Нуянзин Е. А.
Методическая система формирования у студентов технических вузов необходимых компетенций с учетом требований актуализированных ФГОС ВО 115

Никитина Т.А., Смирнова И.С.
К вопросу о разработке контрольно-измерительных материалов по инженерной графике 125

Новикова Е. В.
Использование мультимедийных технологий в преподавании дисциплины безопасность жизнедеятельности 134

Стефаненко П. В.
Пути активизации учебно-познавательной деятельности студентов 144

Танцура Н.П. , Соколов И.А.
О роли дистанционного обучения в очном дневном и заочном образовательном процессе. Опыт подготовки и съемки видео курса 157

МЕХАНИКА МАШИН 171

Андриенко П.А., Каразин В.И., Хлебосолов И.О.
Стендовые испытания на виброакустические воздействия 172

Борина А.П., Терешин В.А.
Устойчивость алгоритмов ходьбы 181

Вульфсон И. И.
К проблеме параметрического возбуждения колебаний в цикловых механизмах 191

Евграфов А.Н., Петров Г.Н.
Компьютерное моделирование механизмов 203

Каразин В.И., Козликин Д.П., Суханов А.А., Терешин В.А., Хлебосолов И.О.
Некоторые способы устойчивого уравновешивания относительно подвижных масс на центрифугах 216

Крюков В. А.
Некоторые проблемы построения терминосистемы теории механизмов и машин 230

Сотников А. Л.
Контроль параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ 242

Тимофеев Г.А., Егорова О.В., Самойлова М.В., Григорьев И.И.
Кинематика и особенности расчета волновой зубчатой передачи 250

Третьяков В.М.
Применение матричного метода для определения подвижностей сложных кинематических пар 264

Филиппенко Г.В.
Энергия волн изгибного типа в бесконечной цилиндрической оболочке, заполненной сжимаемой жидкостью 276

Яруллин М. Г., Галиуллин И.А.
Определение крутящего момента на ведущем звене шестизвенных пространственных механизмов 287

Яруллин М. Г., Исянов И. Р., Мудров А.П.
Кинематика плоского двухподвижного пятизвенного рычажного механизма 297

Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф.
Теоретические и практические условия проворачиваемости механизма Беннетта 306

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ
317

Ашейчик А.А., Полонский В. Л.
Исследование нагрузочной способности резиновых покрытий для шкивов грузоподъемного оборудования 318

Бабичев Д.Т.
Совершенствование методики преподавания основ проектирования типовых узлов машин на примере изучения темы “ременные передачи” 328

Башкарев А.Я., Букреев В.В., Кущенко А.В., Стукач А.В.
Долговечность соединений деталей машин с полиамидными покрытиями в узлах трения строительной техники 340

Белогур В.П., Семашко Н.А. , Кулеш А.А.
Методологический подход к диагностике изделий из титановых сплавов методом акустической эмиссии (АЭ). 350

Годлевский В.А., Марков В.В.
Принцип сочетаемости разнородных присадок в трибоактивных СОТС для лезвийной обработки металлов 359

Голубков В.А., Лукьяненко И.Н., Аман Е.Э.
Диагностика технического состояния смазки опор электромеханических устройств приборостроения 368

Гомера В.П., Нефедьев Е.Ю., Смирнов А.Д., Ковалев Д.Н.
Применение метода акустической эмиссии для контроля качества сварного шва в процессе его изготовления 376

Дорофеев В. Л.
Применение метода фиктивной нагрузки для решения проблемы расчета контактных напряжений 390

Дорофеев В. Л., Голованов В.В., Гукасян С.Г. , Дорофеев Д.В.
Отображение погрешностей и контактных напряжений в зубчатых передачах многозначными и многолистными функциями 402

Елисеев В.В., Москалец А.А.
Расчетный метод построения диаграмм Кемпбелла для турбинных лопаток 413
Елисеев В.В., Пискунов В.А.
Выстрел из пневматического линемёта: три этапа процесса 421
Жуков В.А.
Дислокационно-фононный механизм и интерполяционная зависимость усталостного повреждения конструкционных сталей 431
Зиновьева Т. В.
Расчет вынужденных колебаний оболочек вращения с произвольным меридианом 442
Иванов А.С., Ермолаев М.М., Руднев С.К.
Расчет соединения с натягом в общем случае нагружения 453
Иванов А. С., Ермолаев М. М., Чиркин А. В., Синицына Ю. В.
Расчет планетарно-цевочной передачи с учетом упругих деформаций сателлита 464
Иванов А.С., Куц М.С.
Расчет гипоидной передачи редуктора 476
Медведева В.В., Бреки А. Д., Крылов Н.А., Александров С.Е.
О механизме противоизносного действия консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния 486
Пелупесси Д. С., Жавнер М.В.
Пружинные аккумуляторы для шаговых приводов 499
Пухлий В.А.
Расчет напряженно-деформированного состояния деталей машин и механизмов из анизотропных материалов 510
Пухлий В.А., Журавлев А.А.
Статика рабочих лопаток диагональных турбомашин 521
Скотникова М.А., Крылов Н.А.
О природе диссипативных процессов при механической обработке титановых лопаток 530
Тимофеев Е.Г., Жуков И.А.
К разработке численного метода исследования ударных процессов в стержневой системе машин ударного действия 540
Тимофеев Б.П., Сачков М.Ю.
Математическое моделирование конических зубчато-поводковых передач 550
Полонский В.Л., Тюрин А.П.
Опыт преподавания. Компьютерный инжиниринг и вычислительная механика 559
Кукаленко Б.Д., Чулкин С.Г.
Расчет основных элементов конструкции баллона шинно-пневматической муфты 568
Шабанов А.Ю., Галышев Ю.В., Сидоров А.А., Ивановский Д.К.
Исследование эффективности восстановления технико-экономических показателей изношенного двигателя с помощью триботехнических составов 583

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА 597

Аракчеев Е.Н., Брунман М.В., Дьяченко В.А., Коняшин А.В., Петкова А.П.
Адаптивная система автоматического управления комплексным электролизным агрегатом синтеза анолита и феррата для обеззараживания воды и обработки стоков 598

Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Петкова А.П.
Методы повышения эффективности нефтедобычи низкодебитных скважин штанговыми глубинными насосами 611

Гедько П.Ю.
Микроробот на базе сферического шарнира с актюатором – асимметричной пьезотрубкой 619

Дяшкин-Титов В.В., Воробьев Н.С., Терехов С.Е.
Алгоритм позиционирования захвата манипулятора-трипода 634

Жавнер В.Л., Мацко О.Н.
Пружинные приводы с рекуперацией энергии для возвратно-поступательных перемещений 645

Жога В.В., Скакунов В.Н., Терехов С.Е.
Архитектура системы управления мобильного технологического робота с шагающими движителями 654

Зиеп Хоанг Фи, Полищук М. Н., Смирнов А. Б.
Моделирование динамики модуля микропозиционирования 665

Зиеп Хоанг Фи, Смирнов А. Б., Полищук М. Н.
Разработка и исследование двухкоординатного столика с пьезоэлектрическими актюаторами 677

Маленков М.И., Кузьменко Д.Н., Лазарев Е.А.
Методы и некоторые результаты моделирования движения планетоходов с учетом рельефа и свойств грунта 687

Несмиянов И.А.
Особенности структурного исследования манипуляторов параллельно-последовательной структуры 715

Никитина К.В. , Жавнер В.Л.
Особенности робота с параллельной структурой для погрузочно-разгрузочных работ 723

Попов А.Н., Пуленец Н.Е., Васильев А.К. , Лопатина Е.А.
Макет пневматического ударного стенда 733

Попов А. Н., Тимофеев А. Н., Полищук М. Н.
Инновационная технология кладки кирпичных стен 744

Суханов А.А.
Метод двойственности в задачах оптимизации динамических систем 756

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 769

Nikolov A., Kazakov N., Elkina S.
Competitiveness of industrial products 770

Бойцев А.В. , Шестопалов А. А.
Конструкционная анизотропия свойств дорожного покрытия и методы борьбы с ней. 785

Бурлуцкий В.С., Позынич К.П., Позынич Е.К.
Парк грузоподъёмных кранов России: федеральная, региональная и территориальная компоненты 795

Елисеев К.В.
Колесная пара и рельсовый путь. Определение координат точек контакта. 810

Заморёнов М.В., Ларин М.Ю., Копп В.Я.
Использование метода путей для моделирования системы «обслуживающее устройство – накопитель». 820

Лобачев А. А.
Анализ динамической нагрузки на силовой верхний привод в составе буровой установки 831

Манжула К. П., Наумов А.В.
Влияние кривизны стенок коробчатых балок на местную устойчивость 841

Масленников Д. А., Гайдарь О.Г.
Компьютерное моделирование процесса распыления топлива в бензиновых ДВС с непосредственным впрыском 848

Мусияко Д.В. , Хабибуллин Р. А., Пешков В.С. , Башкарёв А.Я.
Вибрационный уплотнитель - планировщик 857

Rajczyk M., Kosiń M., Pietrzak A.
Measurement of granite porosity of ground structure with profilometer, for the purposes of processings tools verification 866

Rajczyk J., Rajczyk P.
Process costs rationalisation – construction works case study 878

Соколов С.А.
Модель упругопластического деформирования элемента конструкции 888

Филиппов А.Н., Лозин А.В., Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю.
Транспортные гусеничные машины: механизмы поворота с нелинейной характеристикой 898

Чеканин В.А., Чеканин А.В.
Алгоритм удаления объектов в задачах ортогональной упаковки объектов 913

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ 923

Жуков Э.Л., Ларионова Т.А., Плавник С.Л.
Методы обеспечения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности на операциях чистового точения 924

Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Ларионов Е.О.
Оценка погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов в авиадвигателестроении 936

Коковин В.А., Евсиков А.А.
Алгоритмические зависимости при управлении распределенными взаимосвязанными технологическими процессами 946

Любомудров С. А., Макарова Т. А., Паневин С. С.
Многопараметрический автоматизированного стенд для исследования обрабатываемости труднообрабатываемых сплавов 954

Пашнёв В.А., Пименов Д.Ю., Сырейщикова Н.В., Кольцова М.С.
Разработка классификатора операций и переходов ремонтных технологических процессов на базе полимеров 971

Петров А.В., Тарасов С.Б.
Исследование компаратора для поверки концевых мер длины 981

Раменская Е.В., Филиппов Ю.А., Амельченко Н.А.
Аттестация эксплуатируемых технологических машин 990

Степанов С.Н., Видинеева Н.Ю.
Особенности платохоннингования при капитальном ремонте двигателей внутреннего сгорания 1000

Степанов С.С., Степанов С.Н.
Эталонный прибор с системой автоматического управления. 1008

СТАНКОСТРОЕНИЕ 1017

Болобов В.И., Бочков В.С., Чупин С.А.
О возможности повышения абразивной износостойкости породоразрушающего инструмента механической и термомеханической обработкой 1018

Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А.
Динамика шпиндельного гидростатического подшипника с учетом изменения приведенной массы 1028

Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Белова С.Б.
Влияние термической обработки на обрабатываемость резаньем α+β и псевдо β титановых сплавов 1040

Семенов Ю.А., Семенова Н.С.
Анализ установки металлорежущих станков на основание 1052

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ 1061

Аксенов Л.Б., Кункин С.Н.
Комбинированная холодная торцевая раскатка утолщенных полых фланцев 1062

Варгасов Н.Р., Радкевич М.М.
Закономерности поведения титановых сплавов в условиях структурной сверхпластичности 1075

Варгасов Н.Р., Радкевич М.М.
Сверхпластичность псевдо-α титановых сплавов под действием периодической нагрузки 1088
Воробьева Г.А., Складнова Е.Е.
Исследование влияния аэротермоакустической обработки на структуру и механические свойства штамповых сталей. 1097
Востров В.Н., Лоськов К.О.
Математическое моделирование процесса угловой раскатки деталей из порошковых материалов 1106
Головкин А.В., Максютина Е.В.
Аддитивные технологии - ключ к решению задач неоиндуастрилизации и самозанятости населения в России 1111
Иванова Е.В., Прозорова М.А., Медведев Е.Л., Швалев А.С.
Оценка эффективности метода электроискрового легирования на основе SWOT-анализа 1120
Калашникова О. А.
Затвердевание металла в чугунной изложнице и керамической форме с учетом принудительной конвекции и воздушного зазора. 1130
Кузнецов Р.В., Радкевич М. М.
Технология получения антифрикционных биметаллических заготовок методом штамповки жидкого металла. 1142
Мамутов В.С., Здор Г.Н.
Механика нагружения и деформирования тонколистовой заготовки при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке 1150
Попов А.И., Тюхтяев М.И., Радкевич М.М., Новиков В.И., Кудрявцев В.Н.
Технология струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки 1160
Радкевич М.М., Фомин Д.Ю.
Определение рационального температурного режима штамповки 1170
Ушомирская Л.А., Кузьмичев И.С.
Финишная технология обработки внутренних поверхностей потоком смеси парогазовых компонентов при повышенном напряжении 1178

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕТЕВОЙ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ В РАМКАХ ПРОЕКТА «ТЕМПУС» 1187

Абдыкеров Ж.С., Замятина О.М., Мозгалева А.И., Папина Ю.В.
Внедрение игровых технологий в программу магистерской подготовки в рамках проекта «ТЕМПУС» в Томском политехническом университете 1188
Александрова О.Ю., Снегирева А.В., Мордвин М.А.
Сравнительный анализ методов неразрушающего контроля рабочих поверхностей зубчатого колеса основанных на использовании проникающих растворов и эффекте Баркагаузена 1201
Батуев В.В., Дьячкова И.В.
Снижение трудоемкости проектирования операций механической обработки поверхностей пространственно-сложной формы 1211

Буханченко С.Е., Пугачёва А.Е.
Исследование структуры и механических свойств аддитивно полученных металлических элементов изделий 1219

Буханченко С.Е., Федоров В.В., Щербанский А.П.
Моделирование динамических режимов нагружения торсионных систем при вращательном и возвратно-вращательном движениях исполнительного органа 1228

Винокуров Н.В., Боталов А.С., Кадулин Р.В., Карманов В.В., Симонов М.Ю.
Оценка свариваемости толстостенных несущих конструкций летательных аппаратов из магниевых сплавов методом двусторонней сварки трением с перемешиванием 1237

Катаев Я.А., Туктамышев В.Р., Девяткин В.А.
Интенсификация разработки модулей данных при создании интерактивных электронных технических руководств 1251

Никонова А.М., Осипович Д.А., Макеев А.Б.
Методика определения точностных параметров ракетного двигателя с вращающимися управляющими соплами 1261

Трофимов В.Н., Нуртдинов А.С., Ширяев А.А.
Способ калибровки приборов при измерении остаточных напряжений 1269

Шаламов П.В., Валеева Р.М.
Термическое сверление комбинированным инструментом 1277

Шарипова К.Р., Нургалин Р.Р., Туктамышев В.Р., Крюков А.Ю.
Математический анализ соответствия расчетных параметров CAE-системы ADVANTEDGE и эксплуатационных данных процессов фрезерования 1287

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ 1297

Алтапова А.Е., Седлер М.И.
Повышение качества процесса управления несоответствиями и коммуникации с поставщиками 1298

Артёмова А. Ю.
Некоторые проблемы обеспечения безопасности современного машиностроения Донбасса 1308

Брунман М.В., Брюс Ф.О., Дьяченко В.А.
Мобильная электролизная установка обеззараживания питьевой воды и стоков 1320

Буляница А.Л., Евстрапов А.А., Посмитная Я.С., Белоусов К.И.
Принципы формирования курса микро- и нанотехнологии в биологических и медицинских исследованиях для магистров и аспирантов 1329

Косова В. А., Давыдова Д.М.
Обеспечение качества механической обработки путем автоматизации процесса 1337

Кушниренко Е.Н.
Личностно-деятельностный подход как одно из педагогических условий применения компьютерно-ориентированного обучения в профессиональной подготовке будущих инженеров-горняков 1347

Нагорный В.С., Войнов И.Б., Колодяжный Д.Ю.
Численное моделирование электрогидродинамических процессов воздействия резко неоднородных электрических полей на топливо 1357

Седлер М. И., Носова Д. А.
Повышение качества регистрации результатов испытаний электронных компонентных баз (ЭКБ) путем создания автоматизированного приложения 1367

Седлер М.И., Пичкарь С.В.
Автоматизация процесса регистрации результатов входного контроля электронных компонентных баз (ЭКБ) 1379

Бочкарева Ю.В., Седлер М. И.
Повышение качества выполнения заказов путем создания электронного архива и автоматизации планирования сборочного производства 1389

Седлер М.И., Копосова И.В.
Повышение качества процесса построения программ испытаний путем создания автоматизированного приложения 1399

Фунтиков М.Н.
Совершенствование учебно-воспитательной работы на основе теории информационного метаболизма 1409

Щербов И.Л.
Особенности подготовки специалистов в сфере информационной безопасности в условиях вооруженного конфликта в регионе 1420

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 1428

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

УДК 378.14; DOI 10.1872/MMF-2016-1

Л.Б.Аксенов

ЛЕНЬ СТУДЕНЧЕСКАЯ: ОСУЖДЕНИЕ И ПОНИМАНИЕ

Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия.
E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru.

Аннотация

В работе представлен анализ типов лени, характерных для современной студенческой среды. Разобраны наиболее эффективные средства мотивации для каждого типа, свойственных студентам младших и старших курсов. Сопоставлены академическая успеваемость студентов с параметрами их учебной активности, и ее соответствие внутренним требованиям вузов и рекомендациям Болонского Соглашения.

Ключевые слова: типы лени, студенческая среда, мотивация учебного процесса, академическая успеваемость, Болонское Соглашение

Прежде всего, определим предмет исследования. Большинство словарей и энциклопедий приводят похожие определения для лени, например, «Лень» (от лат. lenus — спокойный, медлительный, вялый) — отсутствие или недостаток трудолюбия, предпочтение свободного времени трудовой деятельности. Лень традиционно расценивается как порок, поскольку считается, что ленивый человек является нахлебником общества [1].

Человеческое качество «лень» среди ценностей не приветствуется. Лень всегда ругали и ругают, с ней борются, ее осуждают, она имеет такую же древнюю историю, как и человеческая цивилизация. Лень мешает людям добиваться успеха в жизни. Лень помогает человеку деградировать как личности. Христиане считают лень одним из смертных грехов. В «Божественной комедии» Данте Алигьери лентяи находятся в 5-м круге ада.

Значительное место тема «лени» занимает в изобразительном искусстве. На гравюре Питера Брейгеля Старшего «Лень» (Acedia) в центре композиции спящая женская фигура - Лень, то есть персонификация этого порока. Подушку ей поддерживает черт, что символизирует нидерландскую пословицу "Лень - подушка черта". Спящие лодыри, медленно ползающие животные, улитка на переднем плане - все это тоже символы лени. Существует также очень известная гравюра "Лень"

— написанная в 1557 году И.Босхом, для цикла из семи гравюр «Семь смертных грехов».

Следует отметить, что на более поздних картинах (начала XX века) лень, праздность выглядят более привлекательно, например, в изображении английского художника Д.У. Годварда (картина «Праздность»). Максимальной выразительности в этом жанре и теме удалось достигнуть П.Пикассо (картина «Сон»). Поэтому не удивительно, что эта картина является одной из самых дорогих.

В литературном жанре утопических произведений Т. Мора [2], Т. Компанеллы [3], Р. Оуэна [4] и др. утописты сформулировали свое понятие лени и на основе его предлагали радикальное сокращение рабочего дня и превращения работы в игру, в наслаждение. Известный марксист Поль Лафарг опубликовал в 1880 г. произведение «Право на лень» [5], где он провозглашает право на лень, как на досуг, «как одну из важных целей в борьбе пролетариата за свои права».

Иногда внимание к лени принимает необычные формы. Так, в столице Колумбии, Боготе, открыли музей лени. В залах музея - кровати и гамаки, в которых могут поспать посетители. Имеются также кресла, установленные перед работающими телевизорами. Музей лени был создан для того, чтобы люди задумались над социальными последствиями подобного образа жизни: безработице и ощущению даром потраченного времени.

Однако отношение к лени весьма неоднозначное. Известные философы, психологи, педагоги и биологи занимались исследованием лени [6-12]. Философы рассматривали лень как неумение воспользоваться природным даром, своими способностями; психологи анализировали лень как отсутствие мотивации и как один из основных признаков депрессии; педагоги считают лень отсутствием трудолюбия.

Существует и позитивное отношение к лени. Ее считают двигателем прогресса: некоторые изобретения появляются по причине того, что их изобретателю было лень заниматься какой либо деятельностью. Данное выражение употребляется как бы с иронией - мол, оправдание для лодырей. Очевидно, что прогресс продвигают люди умные и как раз не ленивые. Любой конструктивный подход к решению проблемы правильнее называть не ленью, а желанием решить конкретную проблему оптимальным способом, без лишних трудозатрат.

Позитивно относятся к лени биологи – они считают лень одним из защитных механизмов нашего организма, который позволял людям в древности сберегать энергию при недостатке пищи. Психотерапевты так же видят положительную сторону лени – она защищает организм от психотравмирующих событий.

В медицине считают лень проявлением заболевания невыясненного происхождения и, в первую очередь, ей подвержены люди со слабой нервной системой.

Обобщая некоторые исследования [13-17], можно сформулировать основные виды лени:

- Лень как защитная реакция организма: нежелание что-либо делать является результатом физической или умственной перегрузки.
- Лень как признак несоответствия характера деятельности и структуры личности. Например, если демонстративного человека ограничить работой только по дому, а интроверта заставить постоянно работать с разными людьми - у них вскоре пропадет желание делать такую работу. Им будет отчетливо некомфортно работать в условиях, не соответствующих их структуре личности.
- Лень как признак циклоидности: периодическая смена активности и депрессии, наступающая в депрессивной фазе. Лень как признак депрессии в виде ощущения "что бы я ни делал для решения своих проблем, все равно ничего не изменится".
- Лень как условная приятность: не хочется изменять то, что так хоть бессознательно, но выгодно. Например, можно страдать по поводу избыточного веса, но избавляться от него лень: если похудеть, на что, же тогда жаловаться, и чем, же объяснять свои неудачи в личной жизни? Это самый психотерапевтически неподатливый вид лени: потому, что сам "ленивец", как правило, не очень-то заинтересован от нее избавляться.
- Лень как отсутствие мотивации. Следует различать стимул и мотив. Основной принцип стимулирования – «Если ты не сделаешь это, тебе будет хуже». А мотив – это положительная заинтересованность в процессе и результате, это уверенность в том, что совершив какую-то работу, человек сможет к своему удовольствию воспользоваться плодами своего труда. Основной принцип мотивации – «Если ты сделаешь это, тебе будет лучше».
- Лень интеллектуальная - самая страшная разновидность лени, когда нет потребности в знаниях, а только в информации. Анализ, причинно-следственные связи для таких людей не важны, а важно поскорее и проще получить результат. Как правило, люди, страдающие этим типом лени, вовсе не считают себя лентяями и от наличия у них такой лени не мучаются. А если при лености ума присутствует тяга к активной деятельности, мы получаем то самое, что грубо обычно называют "дурак с инициативой" [18].
- Лень социальная проявляется, если человек, находится в коллективе, где его вклад не идентифицируется

- Лень ситуативная связана со слабым постоянным стрессом или сильным одномоментным стрессом и порождается нежеланием делать неинтересное, неприятное дело.

Лень мешает людям добиваться успеха в жизни. Лень способствует человеку деградировать как личности. Естественно возникают вопросы, почему люди не могут победить лень? каковы ее причины? Взгляд на причины лени в разных областях науки тоже является неоднозначным. Разные взгляды на причины лени обусловлены ее ситуативным и личностным характером.

Причинами лени, которые частично входят в их типы, могут быть:

- Переутомление, объективная вымотанность организма, растраченность физических, энергетических и эмоциональных ресурсов.
- Несоответствие нашего «должен» нашему «хочу» — когда мы тратим время своей жизни на дела, не являющиеся для нас желанными.
- Интуитивное ощущение ненужности выполняемой в данный момент задачи.
- Неподготовленность к решению предстоящих задач.
- Отсутствие привычки к бодрой и деятельной жизни.
- Большое количество дел и отсутствие плана.
- Желание отдохнуть.

Несмотря на разнообразные причины лени, человечество стремится победить лень, но лень является нашей реальностью, с которой мы сталкиваемся каждый день.

В студенческой среде лень встречается часто: она не дает многим студентам успешно учиться и даже закончить учебное заведение, мешает студентам почувствовать себя успешными, препятствует достижению в жизни поставленной цели и т.п. Изучая образ жизни первых студентов средневековья можно прийти к выводу, что лень поселилась в университетах с момента их основания. Во всяком случае, образ средневекового студента весьма определенен [19, 20]: вечно голодный интеллектуал, готовый спорить ночь напролет о высоких материях, а потом вместо лекций пойти в пивную. И даже на картине Ян Давидс де Хема, которая названа «Занимающийся студент», изображен молодой человек, явно смотрящий в сторону от своих учебников.

Современные студенты выглядят более озабоченными учебой. Но и им лень не чужда, как всем другим людям. Из приведенных типов лени можно выделить основные типы, характерные для студентов, и эти типы несколько отличаются для студентов младших и старших курсов (Рис. 1 и 2).

Рис. 1. Характерные типы лени для студентов младших курсов

Рис. 2. Характерные типы лени для студентов старших курсов

Различия в типах лени для студентов младших и старших курсов достаточно понятны. На младших курсах лень больше проявляется и воспринимается как личностное качество. В этом случае лень может быть следствием неправильного воспитания в детстве:

- детей не приучали к труду родители, и они привыкли лениться;

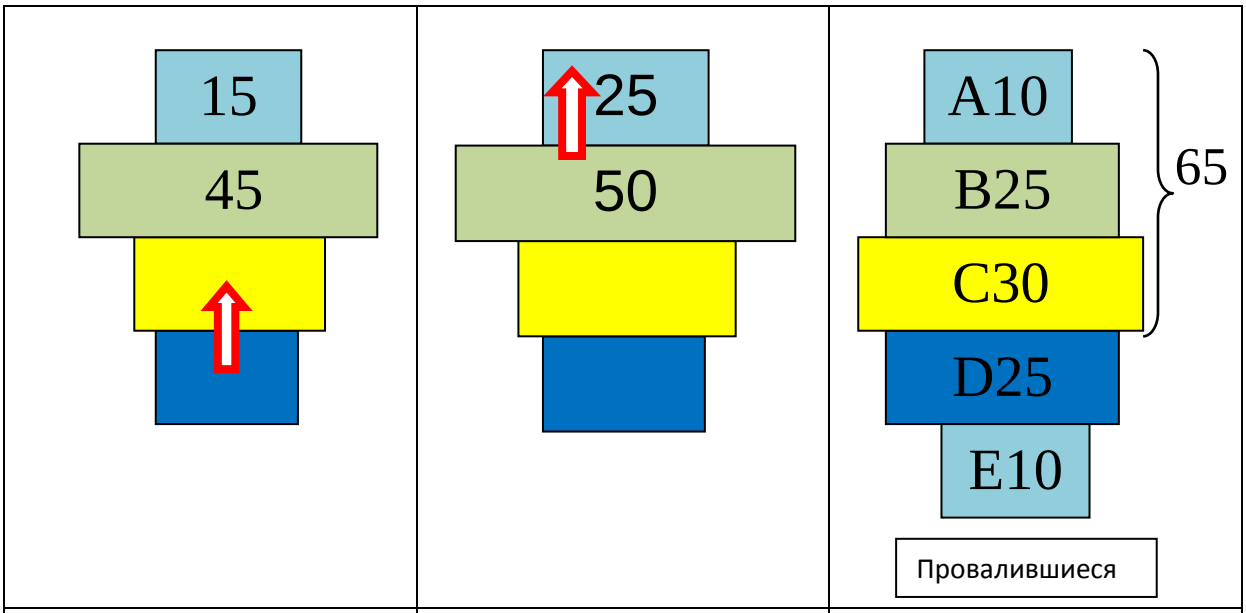
- детям давали непосильные задания, которые они не могли выполнить хорошо, постоянная неудача порождала стойкое желание ничего не делать и становилась личностным качеством;

- или дети были лишены возможности увидеть замечательные мультфильмы на тему детской лени.

На младших курсах характерна лень ситуативная и лень как признак защитной реакция, депрессии и несоответствия характера деятельности структуре личности студента.

Можно, конечно погрузиться в исследование причин лени каждого студента, но это доступно только профессионалам психологам и врачам. Кроме того лень не входит в перечень девиантного поведения студентов и потому, как таковая, осуждению не подлежит. Поэтому внимание организаторов учебного процесса должно быть сосредоточено на следствии лени – показателях учебного процесса, т.е. успеваемости.

Как правило, спонтанно показываемая студентами младших курсов успеваемость не отвечает требованиям вуза, и предпринимаются меры для воздействия на студентов с целью улучшения ее показателей. Наиболее эффективны на этом этапе методы стимуляции, когда студентам доходчиво объясняется, что с ними будет, если они не найдут в себе силы исправить свое положение с учебой, т.е. преодолеть свою лень. Эти методы направлены в основном на студентов, у которых проблемы с успеваемостью (Рис. 3а).



а. б. в.

Рис. 3. Качественная успеваемость студентов (%): а – на младших курсах; б – на старших курсах; в – рекомендации Болонского Соглашения (ECTS). Стрелками обозначена стимуляция на младших курсах и мотивация на старших

На старших курсах картина несколько меняется и здесь основными типами лени являются: интеллектуальная, социальная, и лень как защитная реакция и связанная с отсутствием мотивации. Соответственно меняются и методы воздействия на студентов. Старшекурсников уже не запугать, и не надо этого делать. Для них используются способы не стимуляции, а мотивации, т.е. набор поощрений, если они будут работать интенсивнее. Именно этому служат всевозможные гранты, фонды, именные стипендии, технопарки и др. К сожалению, все эти поощрения направлены в основном на хорошо успевающих студентов (Рис. 3б).

Однако, если принять во внимание рекомендации Болонского соглашения [21], то можно легко заметить, что эти рекомендации имеют показателям успеваемости ниже, по сравнению с принятыми в отечественных вузах (рис. 3в). Рекомендации Болонского соглашения построены на анализе возможностей молодых людей к обучению, высокой требовательность к оценке результатов учебы и мотивацией обучающихся.

Выводы

1. Лень это отсутствие или недостаток трудолюбия.
2. Существует три отношения к лени: позитивное, негативное и как к болезни. Во всех случаях лень не дает возможности успешно учиться, почувствовать себя успешными, добиться в жизни поставленной цели.
3. Как личностная черта лень проявляется в результате неправильного воспитания или как особенность нервной системы.
4. На младших курсах характерна лень ситуативная и лень, как признак защитной реакция, депрессии или несоответствия характера учебы структуре личности студента.
5. На старших курсах основными типами лени являются: интеллектуальная, социальная, лень как защитная реакция или связанная с отсутствием мотивации.
6. Лень не входит в перечень девиантного поведения студентов и потому, как таковая, осуждению не подлежит. Поэтому внимание организаторов учебного процесса должно быть сосредоточено на следствиях лени – показателях учебного процесса, т.е. успеваемости студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лень. Материал из Википедии — свободной энциклопедии. [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Лень (дата обращения 22.04.2016)
2. Мор Т. Утопия. Издательство Академии наук СССР, 1947, 268 с.
3. Штекли А.Э. Город Солнца: утопия и наука. М.: Наука, 1978, с. 43–63.

4. Оуэн Р. Избранные сочинения, том 1, Изд-во. Медиа, 1950, 419 с.
5. Лафарг П. Право на лень. Религия капитала, Серия: "Из наследия мировой политологии", Изд-во: Книжный дом "Либроком", 2012, ISBN: 978-5-397-02426-6.
6. Бэрон Р.С. Социальная психология группы: процессы, решения, действия / Р. Бэрон, Н. Керр, Н. Миллер. – СПб.: Питер, 2003. – 269 с.
7. Архангельский Г. Тайм-драйв. Как успевать жить и работать. — Манн, Иванов и Фербер, 2011, 272 с., ISBN 978-5-91657-335-0.
8. Фрейд З. По ту сторону принципа удовольствия. - Харьков: Фолио; М: ООО «Изд-во АСТ», 2001, 616 с.
9. Юнг К. Психологические типы. / Пер. с Нем. Софии Лорие. М.: Изд-во ЭКСМО-Пресс, 2001, 480 с.
10. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии. - СПб: Питер, 2000, 712 с., ISBN 5-314-00016-4.
11. Франкл В. Психотерапия на практике./Пер. с нем. СПб: Речь, 2001, 256 с.
12. Капустина А.Н. Многофакторная личностная методика Р.Кеттелла. СПб.: Речь, 2001, 112 с.
13. Лень в представлениях обыденного сознания / Михайлова Е. Л. // Психологические проблемы самореализации личности / Под ред. Л. А. Коростылёвой. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. — Вып. 8. — С. 274—282.
14. Грозданович Д. Искусство почти ничего не делать / Пер. с фр. О. Чураковой. — М.: Текст, 2013. — 288 с., ISBN 978-5-7516-1149-1.
15. Нарицын Н.Н. Лень. [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://www.naritsyn.ru/laziness.htm# (дата обращения 23.04.2016).
16. Ильин Е. П. Работа и личность. Трудоголизм, перфекционизм, лень. М.: Питер. 2011, 224 с.
17. Кантерев П.Ф. О лени. Развитие личности, №2, 1999, с. 104-139.
18. Гранин Д. Иду на грозу. Изд.-во М.-Л.: Советский писатель, 1964, 437 с.
19. Гехт А. Гранитный стол науки. Научно-популярный журнал «Машины и механизмы», 2015, №6(117), с. 80-85.
20. Глаголева Е.В. Повседневная жизнь европейских студентов от Средневековья до эпохи Просвещения, Молодая гвардия, 2014, 320 с., ISBN: 978-5-235-03697-0.
21. Bologna Agreement [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://www.hesge.ch/heg/en/studying-heg/reference-documents/bologna-agreement (дата обращения 23.04.2016).

L.B.Aksenov

STUDENT'S LAZINESS: CONDEMNATION AND UNDERSTANDING

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper presents an analysis of the types of laziness for the modern student environment. There are discussed the most effective ways of motivation for each type of laziness, peculiar for students. There is the connection of academic excellence of students with their educational activity and motivation and also the compliance of academic excellence to requirements of universities and with the recommendations of the Bologna Agreement.

Key words: types of laziness, students, motivation of educational process, academic excellence, the Bologna Agreement

REFERENCES

[1] Len'. Material iz Wikipedia — svobodnoj ehntsiklopedii. (rus). Retrieved: https://ru.wikipedia.org/wiki/Len (Accessed 22.04.2016)
[2] Mor T. Utopiya. Izdatelstvo Akademii nauk SSSR. 1947.- 268 p. (rus.)
[3] Shtekli A.E. «Gorod Solntsa»: utopiya i nauka. M.: Nauka.- 1978.- p. 43–63. (rus.)
[4] Ouen R. Izbrannyie sochineniya. Tom 1. Izd-vo. Media. 1950.- 419 p. (rus)
[5] Lafarg P. Pravo na len. Religiya kapitala. Seriya: "Iz naslediya mirovoy politologii", Izd-vo: Knizhnyiy dom "Librokom". 2012.- (rus). ISBN: 978-5-397-02426-6.
[6] Len v predstavleniyah obyidennogo soznaniya / Mihaylova E. L. // Psihologicheskie problemyi samorealizatsii lichnosti / Pod red. L. A. KorostyilYovoy. — SPb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta, 2004. — Vyip. 8. p. 274—282. (rus)
[7] Grozdanovich D. Iskusstvo pochti nichego ne delat / Per. s fr. O. Churakovoy. — M.: Tekst, 2013. — 288 p. (rus). ISBN 978-5-7516-1149-1.
[8] Geht A. Granitnyiy stol nauki. Nauchno-populyarnyiy zhurnal «Mashinyi i mehanizmyi». 2015, #6(117), p. 80-85. (rus).
[9] Beron Robert S., Kerr Norbert L., Miller Norman Sotsialnaya psihologiya gruppyi: protsessyi, resheniya, deystviya. 2003. — 272 p. (rus). ISBN 5-94723-041-0.
[10] Arhangelskiy G. Taym-drayv. Kak uspevat zhit i rabotat. — Mann, Ivanov i Ferber. 2011.- 272 p. (rus). ISBN 978-5-91657-335-0.
[11] Naritsyin N.N. Len, (rus) Retrieved: http://www.naritsyn.ru/laziness.htm# (Accessed 23.04.2016).
[12] Glagoleva E.V. Povsednevnaya zhizn evropeyskih studentov ot Srednevekovya do epohi Prosvescheniya. Molodaya gvardiya. 2014.- 320 p. (rus). ISBN: 978-5-235-03697-0.
[13] Ilin E. P. Rabota i lichnost. Trudogolizm, perfektsionizm, len. M.: Piter. 2011.- 224 p. (rus).
[14] Kanterev P.F. O leni. Razvitie lichnosti, #2, 1999.- p. 104-139. (rus).

[15] Kapustina A.N. Mnogofaktornaya lichnostnaya metodika R.Kettella. SPb.: Rech. 2001.- 112 p. (rus).
[16] Frejd 3. Po tu storonu printsipa udovol'stviya. - Khar'kov: Folio; M: OOO «Izd-vo AST», 2001, 616 p. (rus).
[17] Yung K. Psikhologicheskie tipy. / Per. s Nem. Sofii Lorie. M.: Izd-vo EHKSMO-Press, 2001, 480 p. (rus).
[18] Granin D. Idu na grozu. Izd.-vo M.-L.: Sovetskiy pisatel, 1964, 437 p. (rus).
[19] Rubinshtejn S.L. Osnovy obshhej psikhologii. - SPb: Piter, 2000, 712 p. (rus). ISBN 5-314-00016-4.
[20] Frankl V. Psikhoterapiya na praktike./Per. s nem. SPb: Rech', 2001, 256 p.
[21] Bologna Agreement Retrieved: https://www.hesge.ch/heg/en/studying-heg/reference-documents/bologna-agreement (Accessed 23.04.2016).

УДК 378.146:744.4; DOI 10.1872/MMF-2016-2

S.I. Atanasova

AN APPROACH FOR EVALUATING THE DISCIPLINE “APPLIED GEOMETRY AND ENGINEERING GRAPHICS”

Atanasova Snezhanka Ivanova, PhD, Assoc. professor
University of Food technologies – Plovdiv
Bul. Maritza 26, Plovdiv 4000, Bulgaria
Num.:+359 32 603 823, E-mail: sneja_atan@yahoo.com

Abstract

The work is proposing an approach for assessing the course "Applied geometry and engineering graphics", taught at the University of Food Technologies in Plovdiv, Bulgaria by a score system for objective and comprehensive assessment of all the tasks on which is formed final grade.

Keywords: points system, applied geometry and engineering graphics.

Students in Universities with a technical focus are evaluated on the general technical disciplines using exam or a current grade. For some disciplines where a current grade is used as a form of control, it is formed as a general result of the forms of the semester evaluation. In assessing students' knowledge in general science courses, ending with a current grade different approaches can be used that can lead to a real and objective assessment of knowledge [8, 9]. The most common method of evaluating the knowledge in a certain discipline, connected with Engineering Graphics and technical documentation, ending with a current grade is the written control by conducting two tests during the semester on a theoretical question and graphic tasks and elaborating a set of design documents with graduation thesis. For a more objective assessment of knowledge and to enhance the learning process a test control of the lectures can be used [5, 7].

The Discipline Applied Geometry and Engineering Graphics for the majors Industrial Heat Engineering, Food Engineering and Machinery for the food industry at the University of Food Technologies is consisted of two parts. In Part I of the course the types of design and basic methods of displaying spatial geometric bodies are discussed. Part II of the course covers the development and shaping of different types of design documents that make up the technical documentation and the use of the CAD system SolidWorks for this purpose. The approach used to combine traditional teaching methods using computer aided design contributes to better learning the school material, develop more effective

spatial vision of the students and increases their interest in the discipline [1, 3, 4, 10]. The assessment on both parts of the course is through current grade.

Objectivity in assessing, improving the motivation of the students for systematic training has always been a topical issue, particularly in relation to achieving greater mobility of trainee students within the European Union.

The purpose of this work is to develop a scoring system to evaluate the knowledge and skills in the discipline Applied Geometry and Engineering Graphics II, ending with current degree.

At the beginning of each semester the rules for the valuation of the acquired knowledge and skills in a particular discipline are announced. During the semester the student is gaining points by performing various tasks based on which the final grade is formed. In Table 1 is shown the correlation between the acquired points and the result in the six-point evaluation system.

Table 1

Grade	2	3	4	5	6
Points	<46	46÷58	59÷72	73÷86	87÷100

The University system in England and in the United States allows obtaining a grade on a certain course at the end of the semester without having to appear in an exam in the end of the semester. For this purpose during the semester the students work is graded and when gaining a certain number of points or credits, the student receives ongoing assessment, which at the end of the semester becomes final evaluation. Table 2 shows the correlation between the points collected and the grade obtained in universities in the United States.

Table 2

Grade	F	D-	D	D+	C-	C	C+	B-	B	B+	A-	A	A+
	Failure	Pass			Fair			Good			Very good	Excellent	
Total	0÷59	60÷62	63÷66	67÷69	70÷72	73÷76	77÷79	80÷82	83÷86	87÷89	90÷92	93÷97	98÷100

The credit hours for the discipline Applied Geometry and Engineering Graphics II are 15 hours of lectures and 60 hours of laboratory exercises. The lectures are held in a lecture hall by using a multimedia presentation and the laboratory exercises are held in a multifunctional laboratory containing a separate part to work with drawings and items from nature, as well as individual computer workstations for design of technical documentation through the system SolidWorks.

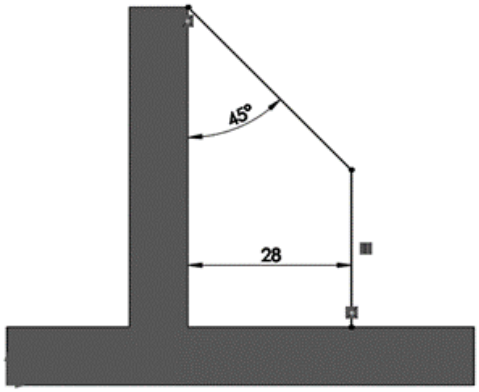
Laboratory exercises:

During half of the laboratory exercises sketches of three parts are developed (a simple prismatic detail, rotary detail and complicated) by nature and from assembled unit, assembly drawing of the assembled unit with standardized connecting details and list of the component parts [6]. In the

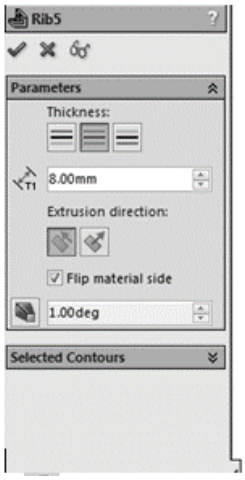
developed sketches of details the students develop drawings as an independent extracurricular task. The drawings can be implemented manually or by computer.

During the other half of the labs 3D models are developed of components of an exemplary assembled unit, drawings of special parts, drawing on the general appearance of the assembled unit and the list of the constituent parts through the automated system SolidWorks in a stepwise instructions from [2]. When working with the detailed instructions of sequential steps students are introduced simultaneously with the basic principles of the system SolidWorks, the location of the individual tools and how to use them. Figure 1 shows part of the instructions for forming the 3D models of the components of the model assembled unit.

- Избира се Front plane от Фичър Мениджъра и се задава Skech .
- Чертае се следната скица, състояща се от една наклонена и една вертикална линия с Line и се оразмерява със Smart Dimension .



- Задава се Rib с дебелина 8mm, симетрично спрямо въведената скица и посока навътре (към детайла).



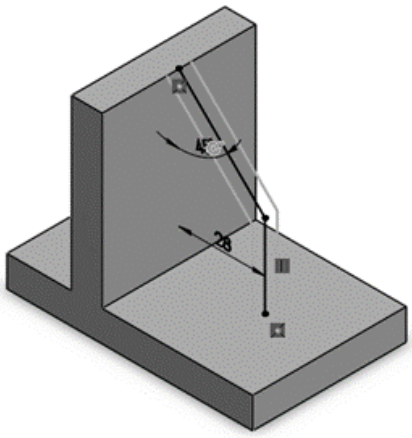


Fig.1 Construction of 3D models of components of an exemplary assembled unit with instructions step by step.

When developing the detailed drawings is necessary to determine the number and type of projections, in order to clarify any specific surfaces. This creates motivation for further accumulation of knowledge when using the graphics system SolidWorks, and when developing the design documentation of

the mechanical device. For the implementation of various types of cuts, the students must set properly the cutting planes, while when hatching is necessary to edit the elements which by the standardization requirements should not be hatched. Before assembling the mechanical device all the non-standardization details must be modeled as for the standardized can be inserted from the available libraries of the system. The assembly of the individual components is carried out by their common surfaces by importing various geometric limitations: incidence of surfaces and edges, tangency, concentricity, etc.

Course work:

For each student is given an independent course work which consists of developing 3D models of the components of the assembled unit, drawings of irregular details, 3D model of the assembled unit, drawing of the general appearance of the assembled unit and list of the constituent parts through SolidWorks. Figure 2 presents a 3D model of the assembled unit, developed and presented by a student in an individual assignment, as for Figure 3 is showing a developed drawing of the general appearance of the same assembled unit.

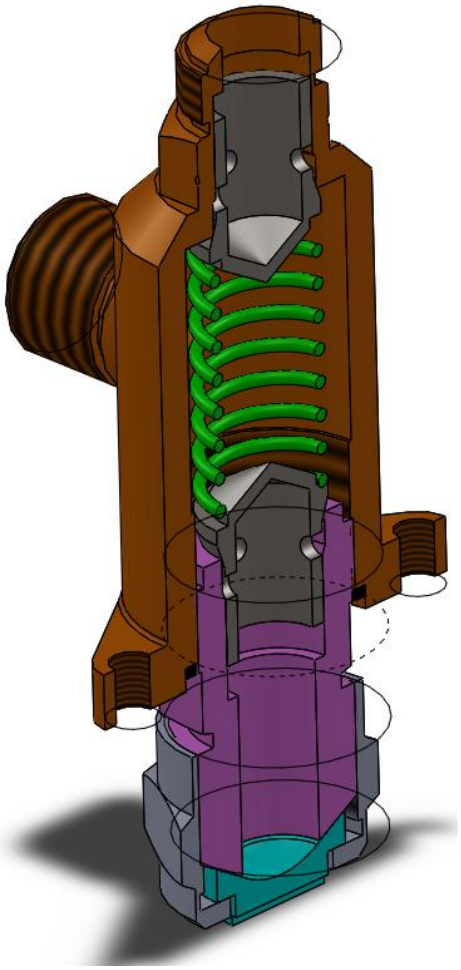


Fig. 2

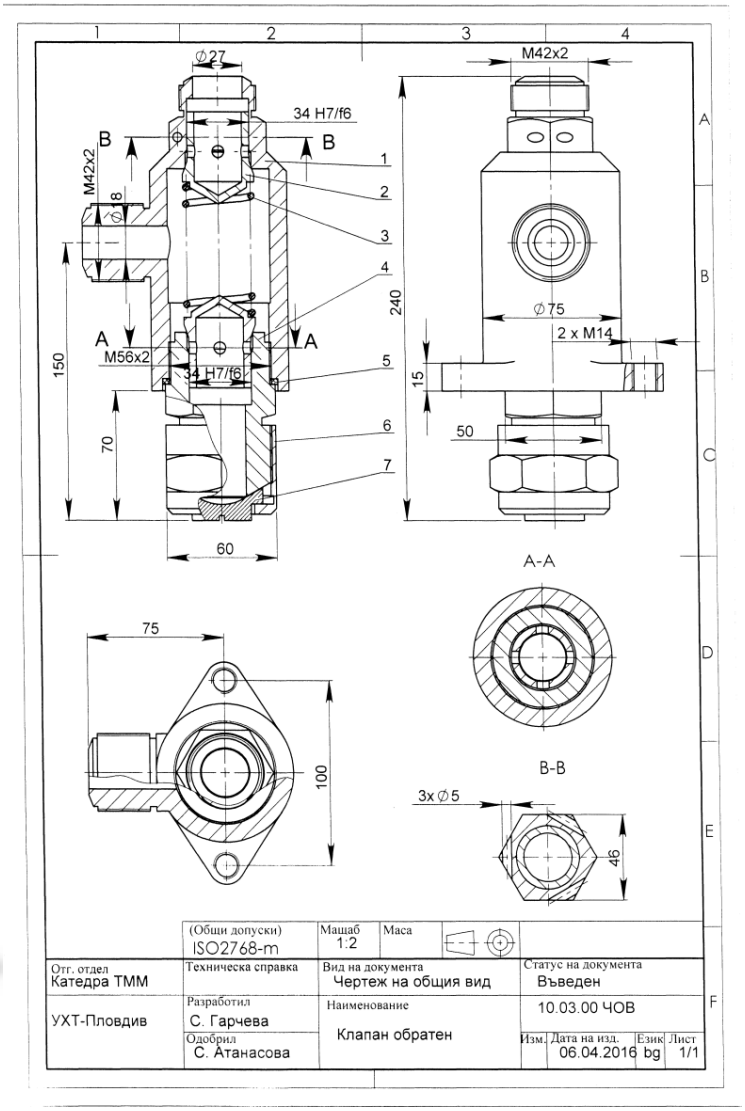


Fig.3

Written control:

The written assessment is conducted on two graphics tasks to develop sketches of details from nature and from the assembled unit and a task to interpret the assembly, graphical representation of the tolerance fields and determining the nature of the compound.

Final evaluation:

The final grade is complex and in its formation is necessary to take into account all tasks that students have met during the semester, and assess their severity. Table 3 shows the maximum number of points that students can acquire for the fulfillment of the various tasks.

Table 3

Working-out various tasks when forming the final assessment	Maximum points
Laboratory work (sketches and drawings from the laboratory).	20
Course work with SolidWorks.	20
Regular attendance of classes and work during classes.	5
Tasks of the written review: Sketch of a piece of nature. Sketch of detail of the assembled unit. Reliance fit tolerance	 25 25 5

The evaluation of the tasks from the written control is performed by point assessment of the individual elements from the task depending on its complexity. In Table 4 is presented the congruency of the points when evaluating the individual elements during the performance of the graphic tasks.

Table 4

Evaluated elements from the task of drawing on a piece of nature or assembled unit.	Maximum points
Compliance of the link of projection between the images.	2
Properly selected and displayed views (without foreign parts).	6
Appropriate use of cuts and sections.	6
Properly applied and shaped dimensions.	6
Appropriately inflicted roughness and geometric tolerances.	5

Results

In Table 5 are presented the results of the evaluation of six students with the proposed point system to evaluate the course "Applied Geometry and Engineering Graphics II".

Table 5

Students			1	2	3	4	5	6
Laboratory exercises			15	20	12	18	15	15
Course work			15	18	16	18	15	15
Attendance and work during classes			5	5	3	4	4	3
Written control	Sketch on a piece of nature	Projection connection	1	1	1	2	2	2
		Views	3	5	6	6	5	5
		Cuts and sections	3	4	4	6	4	0
		Dimensioning	3	4	4	6	4	3
		Roughness and geometrical tolerances	2	3	3	3	0	1
	Sketch of a detail of the assembled unit	Projection connection	0	1	2	2	1	1
		Views	3	5	4	4	3	4
		Cuts and sections	3	4	4	4	3	2
		Dimensioning	2	4	4	5	3	2
		Roughness and geometrical tolerances	0	4	4	3	0	1
	Reliance fit tolerance		5	3	2	0	0	5
Total number of points			60	81	69	81	59	59
Final grade			4	5	4	5	4	4

Conclusion

When teaching the course "Applied geometry and engineering graphics" at the University of Food Technologies in Plovdiv, Bulgaria is used an approach of combining traditional teaching methods using computer aided design SolidWorks, which contributes to better learning the school material and is

developing a more efficient spatial vision of the students and increasing their interest in the discipline.

The proposed approach for evaluating the discipline Applied geometry and engineering graphics through a point system:

• Reduces the influence of subjective factors.

• Allows for more accurate, more comprehensive assessment of students' knowledge.

• Increases the motivation of the students for regular attendance and completion of tasks on schedule, and also of their success.

REFERENCES

[1] Alshakova E.L. Komputernie technologii prepodavanii graficheskih discipline. // Nauchnie truda. Vol. 18 (90). - M.: MATI. -2011. - p. 324-328. (rus)

[2] Atanasova S.I. Metodichno rakovodstvo za uprazhnenia po Prilozhna geometria i inzhenerna grafika s SolidWorks. - Academic Publishing UFT-Plovdiv.-2008. (bul)

[3] Dinev D., Gizdov N. About automated documentation in teaching Basics of design documentation and CAD. // Bulgarian magazine for engineering design.-2009.-№2.-p.74-80. (bul)

[4] Ispolyzovanie tehnologiy 3D modelirovaniya dlya izuchenia prostranstvennih form v curse "Nachertatelynaya geometry. / N.S. Ivanova [i dr.]// Visokie intellektualynie Technologiy i Innovacii v obrazovanii i nauke: materiali XVI mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferencii 13-14 fevralya 2009 goda, Sankt- Peterburg. - SPB.: Izd. Politehn. Un-ta, -2009. - p. 314-315. (rus)

[5] Nikitina T.A., Smirnova I.S. Osobennosti razrabotki kontrolno-izmeritelnih materialov po discipline „Inzhenerna grafika“// Sovremennoe mashinostroenie: Nauka I obrazovanie: Materiali 4 mezhdunarodnoi nauchno-praktocheskoi konferencii. / Pod. Red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. Un-ta, 2014. – p. 92 – 100. (rus)

[6] Osnovi na konstruiraneto. Rakovodstvo za uprazhnenia I kursovi zadachi po Inzhenerna grafika, Tehnichesko dokumentirane I Prilozhna geometria I inzhenerna grafika/ Atanasova S.I. [i dr.]: Akademichno izdatelstvo na UFT-Plovdiv.-2013. (bul)

[7] Testov control v konstruktorskoto dokumentirane po Osnovi na konstruiraneto i CAD/ G. Dinev [i dr.]// 8 international conference advanced manufacturing operations, Kranevo08, -2008. - P.391-394. (bul)

[8] About constructive documentation by design of mechanical product. / G. Dinev [and other]// Journal of the technical university at Plovdiv “Fundamental sciences and applications”, vol.13.-2006.-P.23-28.

[9] Dinev G., Dzhadzhev V. Some interpretations about assessment of skills on engineering graphics subjects. // Journal of the technical university at Plovdiv “Fundamental sciences and applications”, vol.13.-2006.-P.31-36.

[10] Atanasova S.I. Instructing in applied geometry and engineering drawing with the use of CAD software. // Bulgarian magazine for engineering design.-2009.-№2.-P.63-68.

УДК 378.514; DOI 10.1872/MMF-2016-3

И.Б. Афанасьева[1], Е. В. Князева[2]

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

[1]Афанасьева Ирина Борисовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru

[2]Князева Елена Валерьевна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: evk1503@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы использования современных электронных средств в обучении студентов. Рассмотрены методические и технические преимущества мультимедиа технологий, их средства и инструменты, а также особенности представления графической информации в учебной деятельности.

Ключевые слова: электронные средства, графика, мультимедиа технология, геометрия

Лавинообразный поток информации и бурное развитие информационных технологий послужило толчком к развитию общества, построенного на использовании различной информации и получившего название «информационное общество». Роль поступающей информации в профессиональной, социальной и личной жизни человека настолько велика, что трудно дать какое-либо однозначное определение этому понятию.

Информация [лат. Information - разъяснение, изложение] - сведения, передаваемые одними людьми в процессе непосредственного общения или каким-либо другим способом (письменно, с помощью условных сигналов, с помощью технических средств и т.д.), а также процесс передачи или

получения этих сведений [5]. В широком смысле информация – это отражение реального мира.

По подсчетам статистов, к концу XX века объем информации в мировом пространстве увеличился более, чем в 30 раз, это явление получило название “информационный взрыв**”.** Причем 70% информации имеет графическую форму предъявления.

Учитывая мировую тенденцию развития графической информатизации, современное образование должно разработать новые методы и способы в подаче и представлении графической информации так, чтобы сформировать у будущего специалиста информационно-графическую культуру.

Понятие информационно-графической культуры базируется на трех фундаментальных понятиях – **информация, графика и культура**. С точки зрения культуры, информационно-графическая культура является частью общей культуры человека, которая помогает студенту самостоятельно наращивать графические знания, востребованные в повседневном учебном процессе. Она включает следующие составляющие:

- культуру поиска графической информации;
- умение использовать всевозможные информационные технологии для получения графической информации;
- культуру просмотра, чтения и восприятия графической информации как средства получения знаний;
- готовность не только получать графическую информацию, но и уметь ее перерабатывать и применять;
- умение четко и грамотно предъявлять результаты собственной графической деятельности.

Согласно исследованиям советских ученых, таких, как Б.Ф. Ломов, Б.А. Душков, А.Д. Ботвинников, Н.Ф. Четверухин и др. геометро-графические дисциплины (начертательная геометрия и инженерная графика) являются наилучшим средством развития у студентов пространственного воображения.

Современные отечественные ученые-геометры акцентируют внимание на необходимости изучения геометро-графических дисциплин с применением мультимедийных ресурсов в обучении с целью развития у студентов пространственного мышления, творческих способностей, геометро-графической грамотности и т.п., как залога качественного инженерно-технического образования (В.В. Волков, С. И Ротков, Д.Е. Тихонов-Бугров и др.) [3,11,12,17]

Аналогичное мнение высказали и наши иностранные коллеги. На Международной конференции по геометрии и графике (ICGG 2014), прошедшей в Австрии (г. Инсбрук) было отмечено, что и в настоящее время начертательная геометрия занимает равноправное место среди других геометрических наук, она востребована, как учебная дисциплина и

как прикладная наука, а современные графические САПР – это инструментарий для реализации и получения геометро-графических знаний [3].

Однако все исследователи придерживаются мнения, что без живой силы воображения и наглядности мышления невозможно что-либо создать или разработать [14,15].

В проекте VI Международной научно-практической Интернет-конференции «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации» (Пермь, 2016 г.), было отмечено: «В современных рамках ГГП практически утвердились технологии и методики, базирующиеся на информационных технологиях и 3D моделях, сохраняя целесообразность традиционного чертежа и методов ручной графики как средства оперативного проектно-конструкторского диалога и элемента общей культуры обучаемых» [10].

Для преподавателей кафедры «Инженерная графика и дизайн» СПбПУ основными формами проведения учебных занятий по дисциплинам «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика» являются лекционные и практические занятия. В современных условиях преподавания с каждым годом сокращается количество аудиторных часов отводимых на изучение геометро-графических дисциплин, что ведет к увеличению часов самостоятельной работы студентов. Процессы модернизации современного профессионального образования требует от преподавателя непрерывного совершенствования, поиска новых форм и способов в подаче графического материала в сочетании с новыми информационно-образовательными технологиями. Система обучения должна быть ориентирована на подготовку высококвалифицированных инженерно-технических специалистов.

В процессе обучения графическим дисциплинам преподаватели кафедры широко используют мультимедиа технологии. Для сопровождения учебных практических занятий по геометро-графическим дисциплинам часть материала излагается в электронном виде: презентации, демонстрация видео-плакатов, двухмерные чертежи и трехмерные модели, интерактивные учебные и методические пособия, а также электронные справочные пособия, необходимые для выполнения графических заданий.

Следует отметить, что внедрение мультимедиа технологий в процесс преподавания геометро-графических дисциплин требует четкого соблюдения баланса между традиционными методами обучения (ручное выполнение эпюров и чертежей) и новыми информационными подходами в подаче графического материала. Такая интеграция будет зависеть от возможности использования мультимедийных технологий в учебном процессе в вузе и подготовленности профессорско-преподавательского состава для обеспечения нового уровня образования.

Особенности представления графической информации

Традиционные печатные источники получения геометро-графической информации уходят на второй план, и для повышения познавательной информационно-графической активности студентов требуются новые формы представления учебного геометро-графического материала. Таким образом, технология смешанного обучения геометро-графическим дисциплинам в современных условиях являются приоритетной. Это, в свою очередь, требует электронизации методического обеспечения, а также разработки специализированных контрольных средств, электронных тестовых заданий, электронных учебно-методических комплексов и пр.[4]. Внедрение новых информационных технологий в учебный процесс становится уже нормой, влечет за собой информатизацию образования, тем самым создавая психологически комфортную среду, обеспечивающую свободу обучаемым в выборе образовательных траекторий, форм и методов и поднимающую качество образования на новый виток развития [16].

При разработке мультимедиа технологий появляется понятие кумулятивности информации, т.е. способности к уплотнению и более строгому, обобщенному и компактному изложению информационно-графического материала, и как следствие, возможности дать ссылки на десятки и даже сотни электронных источников. В отличие от печатных источников, мультимедиа технологии обладают высокой наглядностью, разнообразием форм представления графической информации и различными средствами: текст, иллюстрации, видео, звук и прочее. Повышается эффективность обучения и сокращается время изучения разделов учебного курса, а также повышается мотивация и интерес к обучению у студентов. Ранее в традиционном обучении графическим дисциплинам качество лекции напрямую зависело от ораторских и художественно-графических способностей лектора. Сегодня электронные лекции, строящиеся по инновационной схеме, имеют эстетическое оформление и дидактическую значимость.

Графическая информация обладает большой скоростью зрительного восприятия, так среднее время на распознавание изображения короче, чем на символ. Например, в системах отображения информации среднее время реакции на предмет (3D-графический образ) — 0,4 с, на цветной рисунок — 0,9 с, а на слово (символ) — 2,8 с [6,15].

Именно это делает возможным широкое применение в обучении графическим дисциплинам различных электронных форм представления графической информации. При передаче информации с помощью графических средств, в основе обучения лежит доминирующий канал восприятия, в результате время на процессы ее восприятия — распознавания — реагирования сокращается приблизительно в 3 —7 раз. По исследованиям психологов время реакции на восприятие [6,15]:

• зрительного сигнала − 0,15÷0,22 с;
• слухового сигнала − 0,12÷0,18 с;
• тактильного сигнала − 0,09÷0,19 с.

При формировании образа восприятия происходит взаимодействие ощущений, но всегда один из каналов восприятия доминирует. Современные мультимедийные обучающие устройства создают мультисенсорное обучающее окружение и, следовательно, предпосылки для эффективной индивидуализации обучения. Индивидуальная диалоговая коммуникация, ориентированная на индивидуальный доминирующий канал с помощью видео, графических, текстовых и музыкально-речевых вставок, максимально сокращает время восприятия обучающей информации и, в сравнении с традиционными методами, информационное воздействие усиливает.

В то же время использование мультимедийных средств имеет психофизиологические границы применимости. Предъявление информации студенту должно соответствовать возможностям мозга среднестатистического обучаемого воспринять, запомнить, переработать эту информацию.

Необходимо избегать переизбытка графической информации, неграмотной композиционной компоновки в плоскости экранного формата, излишней насыщенности и неординарности расположения цветовых пятен, избытков движения на экране, а также примитивной графической информации, которая обедняет образное мышление, что приводит к психофизиологическим или психологическим проблемами восприятия и запоминания.

Работа преподавателя становится профессиональным графическим искусством: в форме передачи обучающей информации необходимо использовать когнитивную графику, выбрав оптимальный способ подачи графического материала, в соответствии с индивидуальными особенностями студентов, тем самым активизировать их пространственное воображения и мыслительную деятельность [1,2,8,15].

Средства представления графической информации

Оптимальный выбор средств и программ, а именно достаточное наполнение теоретическими положениями, формулами, изображениями (рисунки, фотографии, анимация) и др., а также грамотный выбор средств и инструментов представления учебной графической информации может превратить учебно-методический комплекс в качественный электронный ресурс [4].

Современными средствами представления графической информации являются статичные иллюстрации и сопроводительный текст к ним. Инструментами, способными создать простейшую электронную разработку, являются такие программы, как Microsoft Word, Excel, Power

Point и др., в которых существует возможность вставки рисунков, фотографий, графиков и др.

По опубликованным данным педагогического сообщества в области геометро-графических дисциплин из ведущих университетов страны (Балтийского государственного технического университета «Военмех», Казанского государственного энергетического университета, Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Омского государственного технического университета, Пермского национального исследовательского политехнического университета, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, и др.), создание и/или преобразование 2D иллюстраций, в основном, выполняются с помощью следующих программ: Adobe Photoshop, Corel PhotoPaint, Corel PhotoPaint, которые ориентированы на создание синтезированных 2D изображений и их редактирования. Графические пакеты Corel Draw и PhotoPaint обладают более широкими возможностями (объединение пакетов векторной и растровой графики, поддержка других приложений, наличие огромной библиотеки готовых изображений).

Такие пакеты, как Adobe Illustrator и Macromedia FreeHand в преподавании геометро-графических дисциплин используют реже, т.к. они ориентированы на подготовку студентов художественно-графических специальностей (дизайнеров, архитекторов, художников и пр.).

Анимация 2D графических элементов позволяет представить изучаемый объект в динамике, поэтому она является оптимальным средством представления графической информации. Анимация может быть реализована следующими программами GIF Animator, Macromedia Flash, Animation Shop, имеющими свои преимущества: хранение нескольких изображений с заданием момента, места и длительности появления изображения на экране; наличие встроенных редакторов векторной графики и инструментов анимации изображения. Для анимации 3D графических объектов используют графические редакторы: 3D Studio MAX, TrueSpace и Maya. Наравне с компьютерной анимацией обучающие электронные ресурсы могут содержать видеофрагменты. Их позволяют редактировать графические пакеты Adobe Premiere и Ulead VideoStudio. Выбор соответствующих инструментов и средств представления графической информации зависит от поставленных учебных целей и пользовательской квалификации преподавателя [12,17].

Технологии применения средств мультимедиа в учебном процессе

Доминантой инженерно-технического образования является графическая информация — чертежи, схемы, графики, изображения

устройств, приборов и пр. Информационные технологии открывают широкие возможности для представления учебного графического материала, например, в процессе обучения преподаватель может заменить демонстрацию пространственных объектов, представлявшихся ранее 2D рисунком (чертежом) на доске, виртуальными пространственными 3D моделями, которые можно "рассмотреть со всех сторон", «увидеть насквозь», образно говоря «потрогать».

Средства мультимедиа, к которым можно отнести средства изображения, звука, графики, анимации и т.д., широко применяются для более эффективного проведения лекций и практических занятий по различным графическим дисциплинам.

В настоящее время существует несколько вариантов представления учебного материала, и каждый из них имеет свои достоинства и свои недостатки.

Авторы статьи приводят обзор современных электронных способов представления графической информации, некоторые из которых применяют на кафедре «Инженерная графика и дизайн» СПбПУ в процессе обучения студентов геометро-графическим дисциплинам.

1. Использование мультимедиа презентаций

Мультимедиа презентация в настоящее время является самым распространенным вариантом представления учебного материала. Различными фирмами разработаны пользовательские оболочки с дружественным интерфейсом, которые можно предложить для подготовки презентаций. В таком случае преподаватель имеет возможность не только передать текстовый материал, но и сделать его более наглядным и насыщенным благодаря средствам анимации и мультипликации. Этому способствует и оснащение аудиторий специальной стационарной аппаратурой, например, компьютером с мультимедиа проекторами. Применение анимированных слайдов позволяет значительно повысить темп чтения лекции и динамику подачи учебного материала. Как показал опыт, использование мультимедиа презентаций в учебном процессе способствует повышению качества и эффективности занятий и позволяет сэкономить учебное время.

Использование информационных технологий в современном образовательном процессе предъявляет и определенные требования к подготовленности самих студентов. Опыт проведения лекций с использованием мультимедиа презентаций выявил некоторую психологическую неподготовленность студентов первого курса к применению подобных технологий обучения, поскольку от студентов требуется предельная концентрация внимания. Здесь также сказываются сложность адаптационного периода, отсутствия навыков конспектирования и умения грамотно организовать собственную учебную

деятельность. Как следствие, появляются трудности в восприятии и усвоении материала, чувство интеллектуальной несостоятельности и снижение уровня мотивации.

Сформулируем основные рекомендации по созданию учебных презентаций по геометро-графическим дисциплинам:

- Использование единого стиля и дизайна слайдов презентации.
- Использование единого шрифта
- Контраст фона и шрифта. Текст должен быть четко виден: белый или светлый фон - черный или темный шрифт и наоборот.
- Текст на слайдах должен занимать 20% от плоскости слайда, легко читаться и быть виден на расстоянии.
- Рисунки, таблицы и диаграммы должны иметь названия.
- При использовании анимационных эффектов, первым на слайде всегда должен появляется заголовок, затем текст.
- Оптимальное соотношение цифрового и графического материала.
- Графические построения и элементы, на которых следует акцентировать внимание, выделяют красным цветом.
- Презентация должна иметь возможностью перехода по слайдам и открытия с помощью гиперссылок необходимых чертежей, схем, выдержек из нормативной документации и т.д.
- Звук в презентации также является средством запоминания учебного материала «на слух», и поэтому его наличие поможет многим студентам, у которых преобладает аудиальная память. Таким образом, в презентации материал адресуется визуальным и аудиальным каналам восприятия информации человеком, а это, в свою очередь, облегчает усвоение и запоминание учебного материала.

2. Представление электронных графических и текстовых слайдов в сопровождении комментариев преподавателя

Достаточно простой способ замены традиционной доски – представление электронных слайдов. Благодаря этому у преподавателя появляется определенная мобильность изложения материала (при необходимости можно вернуться к предыдущему слайду или продвинуться вперед), в этом несомненный плюс. Электронные графические и текстовые слайды необходимо скомпоновать в удобном для применения формате (.jpg, .gif и пр.). При изучении соответствующей темы, присвоив слайдам имена и задав нужный порядок в папке для просмотра, преподаватель имеет возможность последовательно демонстрировать их на лекциях или в процессе практического занятия, делая соответствующие комментарии и повторяя ключевые моменты.

3. ***Видео-лекции и видео-уроки***

Образование через Интернет как новая модель обучения появилась за рубежом в 60-х годах XX века, у нас в стране система электронного обучения перешла в стадию активного развития в последнее 8-10 лет [9]. С появлением интернета широкое распространение получили видео-лекции и видео-уроки.

Благодаря постоянному развитию компьютерных и коммуникационных технологий, преподаватели имеют возможность постоянно усовершенствовать данный вид электронного обучения. Например, курс лекций можно фрагментировать, структурировать и снабдить пользовательским интерфейсом, который позволит пользователю мультимедиа технологий гибко маневрировать в рамках изучаемого материала. Другими словами, фрагменты лекции, практических занятий, обучающие и демонстрационные видео-уроки можно включить в оболочку, снабженную навигатором, позволяющим лучше ориентироваться в информационной среде, в состав системы можно включить главные и контекстные меню и т.д. [12,17] .

4. Учебные видео-плакаты

Учебно-технический плакат – конструкторский документ, содержащий в упрощенной и обобщенной форме сведения о конструкции изделия, принципах действия, приемах использования, техническом обслуживании, областях технических знаний и других технических данных с необходимым иллюстративным материалом. На учебных плакатах как правило изображаются фотографии, иллюстрации, графики, таблицы и текст. В целом плакат должен представлять законченную единицу графическо-текстовой информации, которая позволит ознакомить студента с некоторыми вопросами изучаемой темы. Основная цель создания плаката - повышение наглядности графической информации и эффективности процесса обучения. В этом плане бумажный плакат имеет определенные ограничения по способам и глубине представления данных [7]. Этих недостатков лишены электронные плакаты, которые разделяются на следующие виды:

- ***Мультимедийный плакат***, содержащий совокупность видео-, аудио-, информации, а также статичную графику (обычные иллюстрации) и текст;
- ***Интерактивный плакат,*** также может являться мультимедийным, но обладает еще и дополнительными свойствами, обеспечивающими обратную связь с пользователем;
- ***Трехмерный плакат,*** представляющий собой разновидность интерактивного плаката и обеспечивающий пользователю более широкие возможности получения информации.

Использование учебных плакатов способствует появлению представлений, отображающих действительность [7].

Кроме перечисленных, существует еще немало вариантов электронного представления графической информации в учебном процессе, причем их количество постоянно растет. При этом возникает вопрос выбора оптимального варианта. Однозначного ответа на этот вопрос не существует, т.к. выбор варианта зависит от многих причин: прежде всего это уровень знаний начальной графической подготовки студентов 1 курса, от специфики геометро-графического курса, уровня его сложности; от количества часов, отводимых на дисциплину, от возможностей преподавателя и много другого. Каждый преподаватель должен сам решить, в какой мере ему следует применять те или иные информационные технологии и какой вариант изложения учебного графического материала следует выбрать в процессе построения учебного занятия.

В заключение отметим следующее. Введение новых технологий в образовательный процесс способствует интеграции академического обучения с инновационными, в том числе дистанционными, формами обучения. Оптимальное сочетание предметного и функционального подходов к графической подготовке позволит будущим специалистам достигнуть мобильности и конкурентоспособности на рынке труда. Дидактический потенциал обучения на основе интегрированного применения традиционных и современных информационных методов позволяет создать информационно-графическую среду для формирования графической культуры и профессионально значимых качеств личности [1,8].

Современные средства представления информации постоянно развиваются, обладая определенными и достоинствами, и недостатками. К несомненным достоинствам можно отнести следующие:

-визуализация, за счет более детальной проработки последовательности или более подробной детализации методики изложения учебного материала ;

-возможность использования для самостоятельной подготовки студентов;

-возможность внедрения анимации и интерактивных моделей в электронный учебно-методический комплекс и др. [4,9].

К техническим достоинствам можно отнести:

-возможность поэтапной реализации; например, поэтапное выполнение чертежей и рисунков;

-возможность наблюдать последовательность выполнения графических построений;

-возможность зафиксировать или остановить отдельные моменты графических построений;

-возможность выделить цветом наиболее важные моменты в процессе графического построения или подчеркнуть в тексте те аспекты, на которые необходимо обратить внимание студентов.

К методическим достоинствам относятся:

-удобство представления различных этапов анимации в соответствии с планом изложения учебного материала, а также использования различных ее фрагментов для разъяснения алгоритмов геометрических построений и преобразований, как на лекциях, так и на практических занятиях;

-дополнительные возможности для преподавателя выстраивать индивидуализации траектории обучения с учетом психофизиологических особенностей восприятия студентов.

Современные электронные способы представления графического учебного материала позволяют визуализировать пространственные объекты и связи, их динамические и статические преобразования, облегчая зрительное восприятие сложных пространственных форм и построений. Учет психофизиологических и когнитивно-интеллектуальных особенностей студентов в обучении повышает уровень и качество усвоения учебного графического материала студентами, развивает их готовность к самостоятельной учебно-познавательной деятельности. Этот факт в значительной степени повышает мотивацию в изучении геометро-графических дисциплин, а также положительно влияет на успеваемость, и позволяет достичь главной цели – научить первокурсников учиться и обеспечить достаточный уровень знаний, гарантирующий дальнейшее успешное обучение дисциплинам профессионального цикла.

Список литературы

1. Афанасьева И.Б. Формирование интеллектуальных умений в обучении [Текст] //Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование» /СПбПУ.-СПб. 2010.№4 (110).С.349-356.
2. Афанасьева И.Б. Учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении/ И.Б. Афанасьева//Известия РГПУ им.А.И. Герцена № 105: научный журнал. – СПб., 2009. № 105, С.60-65.
3. Волков В.В. Современное направление и перспективы научных исследований по геометрии и графике: обзор докладов на международной конференции ICGG2014. /В.В. Волков, Н.В. Кайгородцева, К.Л. Панчук// Материалы V Международной научно- практической конференции «Проблемы качества графической подготовки: традиции и инновации». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2015. – С.90-99
4. Голдобина Л.А., Бочков А.Л. Использование электронных учебно-

методических комплексов при изучении графических дисциплин. Современное машиностроение наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 49-59.

5. Гомоюнов К.К. Теория и практика высшего профессионального образования / К.К. Гомоюнов, В.Н. Козлов, В.И. Никифоров, А.И. Сурыгин. — СПб.:Изд-во СПбГПУ, 2008. — 140с.
6. Душков Б.А. и др. Основы инженерной психологии: учеб. пособие/ под ред. Б.Ф. Ломова. М.: Высшая школа, 1977. — 335 с.
7. Князева Е.В. ,Бурова А.Ю Исторический анализ плаката // XXXVII Неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской международной научной конференции студентов и аспирантов. Ч. IV – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.- С.73-76
8. Князева Е.В. Формирование графической культуры в системе непрерывного профессионального образования// Проблемы математической и естественно - научной подготовки в инженерном образовании. сб.тезисов докладов. Международной научно-методической конференции, 11-12 ноября 2010г./ Под общ.ред. В.А. Ходаковского.- СПб: ПГУПС, 2010г.- 268с.- С.99-101
9. Морозов И. Современные модели управления процессами дистанционного обучения // E-Learning Word. 2007. №2-3(18).
10. Проект решения VI Международная научно-практическая Интернет-конференция КГП-2016 «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации» Пермь, февраль-март 2016 г., Режим доступа http://dgng.pstu.ru/conf2016/.
11. Ротков С.И. Применение информационных технологий при организации учебного процесса по геометро-графическим дисциплинам / С.И. Ротков, Т.В. Машкова// Материалы IV Международной научно- практической конференции «Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2014. – С.303-309
12. Современное образование: содержание, технологии, качество: XXI Междунар. науч.-метод. конф.: в 2 т. Т.2. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.
13. Соловов А.В. Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология. — Самара: «Новая техника», 2006. — 464 с: ил.
14. Фокин Ю.Г. Психодидактика высшей школы: психолого-дидактические основы преподавания. М: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2000. 424 с. (Серия «Педагогика в техническом университете»).
15. Холодная М.А. Психология интеллекта. Парадоксы исследований [Текст]. СПб.: Питер, 2002. 272 с.
16. Хуторской А.В. Современная дидактика. [Текст].СПб.: Питер, 2001. 544 с.
17. Электронный ресурс: Режим доступа: http://dgng.pstu.ru/conf2016/.

I.B.Afanasyeva[1], E.V.Knyazeva[1]

MODERN ELECTRONIC MEANS TO REPREZENT GRAPHICAL INFORMATION IN THE LEARNING PROCESS

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper describes using of modern electronic tools in teaching students. There are presented the methodological and technical advantages of multimedia technologies, their tools and instruments, as well as features representing graphical information in training activities.
Keywords: electronic means, graphics, multimedia technology, geometry

REFERENCES

[1] I.B. Afanasyeva. Formation of Intellectual Skills in Learning [Text] // and Technical Statements of SPbSPU: scientific journal, series "Science and Education" / SPbSPU.-SPb. 2010. No.4 (110) .P.349-356.

[2] I.B. Afanasyeva. Accounting of Cognitive Style Characteristics of Students in Learning / I.B. Afanasyeva // Izvestiya of Herzen State Pedagogical University of Russia No. 105: scientific journal. - SPb, 2009 No. 105, P.60-65.

[3] V.V. Volkov. Modern Trends and Prospects of scientific research on Geometry and Graphics: Review of Reports on International ICGG2014 Conference. / V.V. Volkov, N.V. Kaygorodtseva, K.L. Panchuk // Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference "Problems of Quality of Graphic Preparation: Tradition and Innovation" - Perm. Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2015. - P.90-99

[4] L.A. Goldobina, A.L. Boshkov. Use of Electronic Teaching and Methodical Complexes in Teaching Graphic Disciplines. Modern Mechanical Engineering. Science and education: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference / the 4th International Scientific and Practical Conference / Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2014. - P. 49-59

[5] K.K. Gomoyunov. Theory and Practice of Higher Professional Education / K.K. Gomoyunov, V.N. Kozlov, V.I. Nikiforov, A.I. Surygin – SPb: SPbSPU Publishing House, 2008. – P. 140

[6] B.A. Dushkov, et al. Fundamentals of Engineering Psychology: Textbook / edited by B.F. Lomov M .: Higher school, 1977. –P. 335

[7] E.V. Knyazeva, A.Y. Burov. Poster Historic Analysis // 37th Week of SPbSPU. Materials of Russian International Scientific Conference of

Students and Postgraduate Students. Part 4 - SPb .: SPbSPU Publishing House, 2008.- P.73-76
[8] E.V. Knyazeva. Formation of Graphic Culture in the System of Continuing Professional Education // "Problems of Mathematical and Natural Scientific Training in Engineering Education. Collection of Abstracts. International Scientific Conference, November 11-12, 2010. / Edited by V.A. Khodakovskogo.- St. Petersburg: St. Petersburg State University of Communication, 2010.- P. 268.- P.99-101
[9] I.A. Morozov. Modern Process Control Models of Distance Learning // E-Learning Word. 2007. No. 2-3 (18).
[10] Draft of Decision of the 6th International Scientific and Practical Internet Conference PCG-2016 "Quality Problems of Graphic Preparation of Students in a Technical College: Tradition and Innovation" Perm, February-March 2016, access http://dgng.pstu.ru/conf2016 /.
[11] S.I. Rotkov. Implementation of Information Technology in Educational Process in Geometric and Graphic disciplines / S.I. Rothkov, T.V. Mashkova // Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference " Quality Problems of Graphic Preparation of Students in a Technical College: Tradition and Innovation." -Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2014. - P.303-309
[12] Modern Education: Content, Technology, Quality: 21 International Scientific Conference: in 2 vol. Vol.2. St. Petersburg: SPbETU "LETI" Publishing House, 2015. P. 248
[13] A.V. Solovov E-learning: Problems, Didactics, Technology. - Samara: "New technology", 2006. – P. 464: illustration.
[14] Yu.G Fokin. Psychodidactics in Higher School: Psycho-Didactic Bases of Teaching. M: Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2000. P. 424 ("Pedagogy at the Technical University" series).
[15] M.A. Kholodnaya. Psychology of Intelligence. Paradoxes of Research [Text]. SPb.: Piter, 2002. P. 272
[16] A.V. Khutorskoy Modern didactics. [Text] .SPb .: Piter, 2001.P. 544
[17] Electronic resource: Access: http://dgng.pstu.ru/confZ01 b /

УДК 514.85; DOI 10.1872/MMF-2016-4

И.Б. Афанасьева[1], М.С. Кокорин [2]

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКЦИИ КАК ИЛЛЮСТРАЦИЯ СХЕМЫ ГАУКА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ В КУРСЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

[1]Афанасьева Ирина Борисовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru

[2]Кокорин Михаил Станиславович, доцент, к.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: korms63@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены некоторые вопросы курса геометрического моделирования, связанные с рассмотрением перспективных проекций, как частного случая схемы Гаука. Рассмотрена геометрическая модель перспективы на вертикальной и наклонной плоскостях. Полученные результаты проектирования совпадают с иными известными методами проектирования.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, метод дополнительного центрального проецирования, перспектива, схема Гаука.

Авторы продолжают знакомство читателей с особенностями курса геометрического моделирования, читаемого в ряде средних учебных заведений г. Санкт-Петербурга [1, 2] и опытом руководства учебно-исследовательскими работами учащихся, в основе которых лежит углубленное изучение отдельных глав курса.

Изучение курса геометрического моделирования базируется на работах Валькова К.И. [3, 4, 5] и созданной им научной школы [6, 7]. Практический опыт, накопленный в процессе рассмотрения курса, может быть применен и в различных курсах читаемых студентам, в первую очередь таких как начертательная геометрия, технический рисунок, основы проектной графики.

Значительная часть курса геометрического моделирования посвящена изучению теории изображений, используемых в практике инженерного проектирования. Значимость некоторых изображений (например, аксонометрии) все менее весома, что связано с развитием систем трехмерной графики, имеющих, как правило, возможность построения аксонометрии в различных координатных системах. Значимость других изображений, например, перспективных изображений, по-прежнему высока ввиду их широкого практического применения в инженерном проектировании и дизайне.

Известно, что геометрической основой перспективы является метод центрального проецирования. Рассматривая геометрическую схему образования перспективных проекций [8, 9] приходим к выводу, что взаимное положение центра проекций (точки зрения), объекта и плоскости проекций должно удовлетворять определенным условиям, при которых изображение предмета было бы наиболее близким к его зрительному восприятию в натуре. В общем случае, при построении перспективы положение плоскости проекций в пространстве может быть произвольным, в частном случае – вертикальным. В практике создания дизайн-проектов (рис. 1) и архитектурного проектирования в подавляющем большинстве применяется вертикальная плоскость проекций. Это обусловлено достаточно полно разработанной методикой построений, сравнительной простотой этих построений и, в известной мере сложившейся традицией. Однако перспективы на вертикальной картине обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является наличие значительных искажений в передаче видимых форм.

В значительной мере отмеченные искажения устраняются в перспективе на наклонной плоскости. Несовершенство линейных перспектив на вертикальной плоскости и необходимость широкого внедрения в проектную практику перспектив на наклонной плоскости неоднократно отмечались в работах современных геометров и архитекторов: А.Я. Зметного [10], М.В. Федорова, Ю.И. Короева [11], Н.С. Кузнецова, А.Г. Климухина, И.А. Шерешевского [12] и многих других.

Говоря о зрительном восприятии проектируемых объектов, необходимо отметить, что восприятие перспективы на наклонной плоскости и восприятие объекта в натуре во многом сходны. Это положение подтверждается, в частности, И.А. Шерешевским на основании сравнения контрольных фотоснимков возведенных сооружений и вычерченных перспективных изображений. В качестве примера сравнивалась перспектива на наклонной плоскости купола кассового зала станции «Кировский завод» Петербургского метрополитена (рис. 2) и фотоснимок с натуры этого же купола. Большое сходство перспективы и натурной фотографии объясняется не только удачным графическим

выражением замысла архитектора и его воплощением в натуре, но и удачным выбором геометрических и оптических параметров перспективы.

Рис. 1. Дизайн-проект тротуароуборочной машины

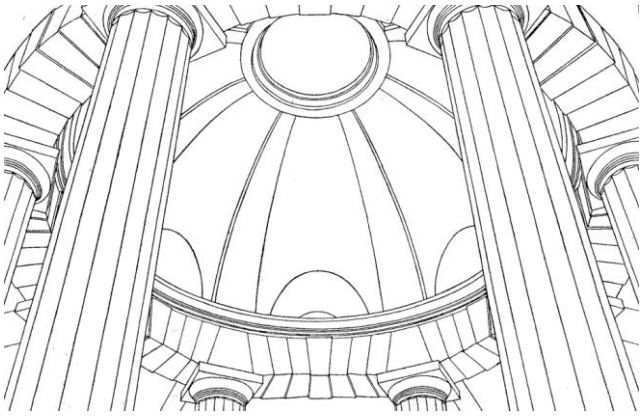


Рис. 2. Перспективное изображение купола кассового зала станции метро «Кировский завод» Санкт-Петербургского метрополитена

На практике существуют два подхода к построению перспективного изображения: перспективное изображение может быть рассмотрено как одиночное изображение, полученное с использованием аппарата центрального проецирования, и перспектива может быть рассмотрена как самостоятельная проекционная модель являющаяся частным случаем метода двух изображений.

В курсе геометрического моделирования, представляемого авторами, различные виды изображений объединены на основе единого подхода, связанного с использованием общей схемы построения изображения на некотором избыточном поле проекций, известном как схема Гаука [7].

Схема Гаука является общим алгоритмом построения дополнительной проекции объекта в некоторой новой плоскости проекций π_3 (рис. 3).

Каждая пара полей проекций $\pi_1 - \pi_3$, $\pi_2 - \pi_3$ представляет собой модель, построенную по методу двух изображений. Следовательно, в полях проекций $\pi_1 - \pi_3$, $\pi_2 - \pi_3$ могут быть определены исключенные точки, являющиеся вершинами пучков V_1, V_3 и W_2, W_3 соответственно.

Вершины пучков определяют как

$V_1 = S_1S_2 \cap \pi_1$ $V_3 = S_1S_2 \cap \pi_3$ $W_2 = S_2S_3 \cap \pi_2$ $W_3 = S_2S_3 \cap \pi_3$.

Согласно методу двух изображений проекции A_1 и A_3 произвольной точки A располагаются на соответственных лучах перспективных по X_{13} пучков (V_1), (V_3). Аналогично, проекции A_2 и A_3 располагаются на соответственных лучах перспективных по X_{23} пучков (W_2), (W_3) (рис. 4).

При переходе к одной картинной плоскости перспективность пучков может быть нарушена и тогда в общем случае пучки (V_1), (V_3) и (W_2), (W_3) становятся попарно проективными.

Таким образом, если даны изображения объекта в плоскостях π_1 и π_2 и определена проективность пучков $(V_1) - (V_3)$ и $(W_2) - (W_3)$, то возможно определение дополнительной проекции объекта в избыточной плоскости проекций π_3.

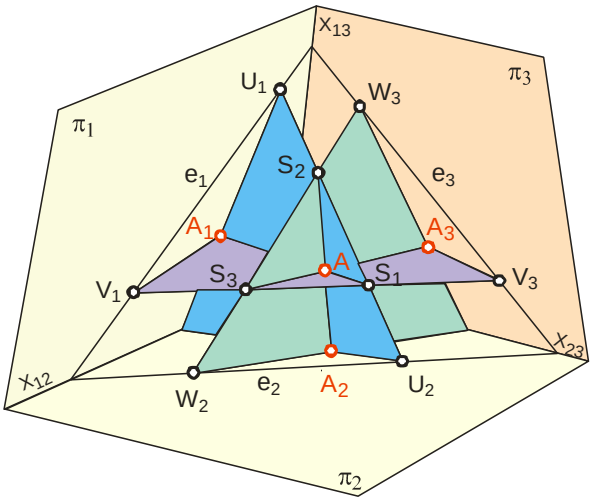


Рис. 3. Построение дополнительной центральной проекции

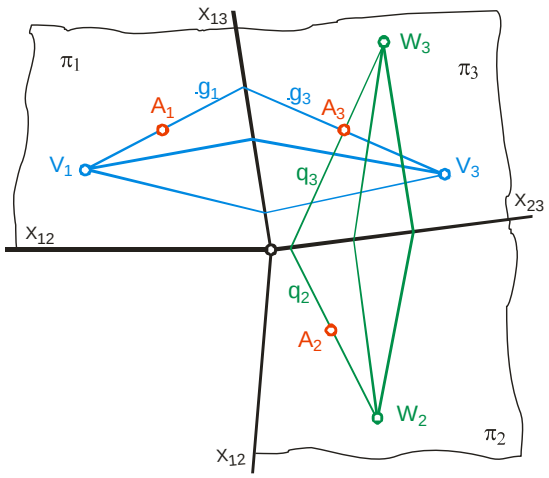


Рис. 4. Схема Гаука. Частный случай

Разрабатываемая на основе схемы Гаука геометрическая модель построения перспективного изображения на вертикальной или наклонной картинной плоскости, включает в себя следующие этапы:

1. Определение оптических и геометрических параметров схемы построения перспективной проекции.
2. Определение параметров схемы Гаука применительно к выбранным геометрическим параметрам схемы.
3. Построение перспективного изображения, удовлетворяющего выбранным условиям.

Рассмотрим подробнее указанные этапы построения геометрической модели перспективного изображения.

1. Геометрические параметры схемы

Определению геометрических параметров, влияющих на создаваемую геометрическую модель, посвящен ряд работ [8, 10, 11].

Авторы этих работ приводят следующие геометрические параметры, характеризующие схему построения перспективной проекции и их оптимальные значения:

– α – линейный угол между плоскостью фасада и линией горизонта (или основанием картины).

– φ – горизонтальный угол зрения.

– ψ – вертикальный угол зрения.

– ρ – угол наклона плоскости картины

– δ – ракурсный угол.

Оптимальные значения геометрических параметров:

$\alpha_{опт}$ = 20–35º $\varphi_{опт}$ = 25–30º $\psi_{опт}$ = 20–55º $\rho_{опт}$ = 95–125º $\delta_{опт}$ = 1–10º

2. Определение параметров схемы Гаука применительно к выбранным геометрическим параметрам схемы.

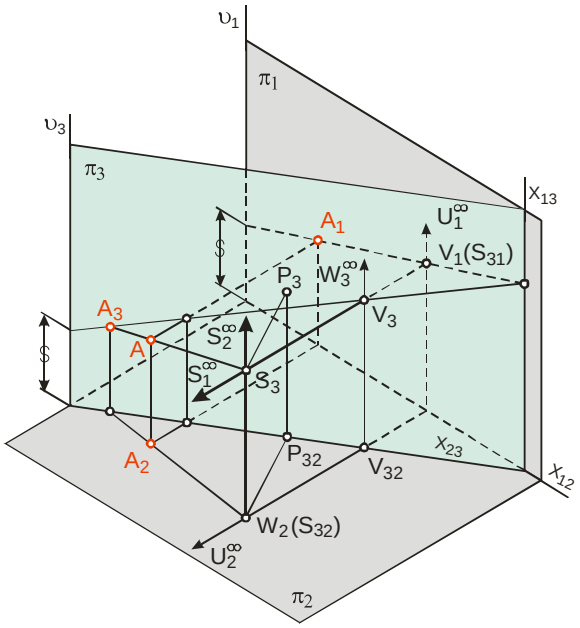


Рис. 5. Элементы схемы Гаука для перспективы на вертикальной плоскости

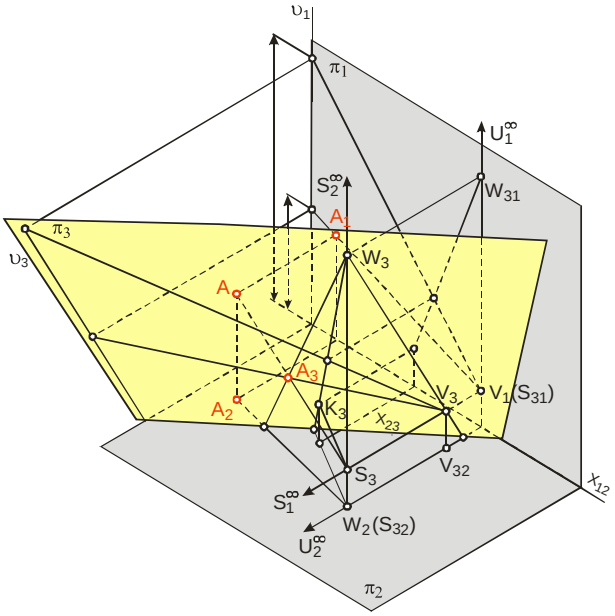


Рис. 6. Элементы схемы Гаука для перспективы на наклонной плоскости

Для того, чтобы воспользоваться схемой Гаука, необходимо определить вершины особых пучков V_1, V_3, W_2, W_3 и установить их проективное соответствие. Согласно терминологии, принятой в алгоритме Гаука, проекции дополнительного центра проецирования S_3 (точки зрения) на плоскости проекций π_1 и π_2 будут являться вершинами пучков V_1 и W_2. Вершинами V_3 и W_3 одноименных пучков будут являться точки пересечения линий центров S_1S_3 и S_2S_3 с полем π_3. Очевидно, что вершина W_3 находится в бесконечности для схемы построения перспективы на вертикальной плоскости (рис. 5) и в картинной плоскости π_3 для схемы построения перспективы на наклонной плоскости (рис. 6). Оси проекций X_{13} и X_{23} пересечения картинной плоскости с плоскостями π_1 и π_2 являются осями перспективности соответственно пучков $(V_1) – (V_3)$ и $(W_2) – (W_3)$.

3. Построение перспективного изображения, удовлетворяющего выбранным условиям.

На эпюре заданы проекции высотного объекта (рис. 7, *а*). Необходимо построить проекции центра S_3 и элементы картины. Обратим внимание на то, чтобы горизонтальный и вертикальный углы зрения не превышали бы

допустимых пределов. Наметим центр композиции P (P_2), проекцию главного луча p_2 и линию горизонта h_1, на которой лежит вершина V_1. Через угол сооружения, перпендикулярно p_2, проведем прямую. Отложим на этой прямой отрезки d и *l*, где *l* – превышение центра S_3 над плоскостью π_2. Далее на луче p_2 строим точку W_2 так, чтобы угол ψ находился в допустимых пределах. Биссектриса p_0 угла ψ является главным лучом, совмещенным с π_2. В данном случае угол γ выявляется при построении. Любая прямая, перпендикулярная p_2, будет линией связи X_{23}.

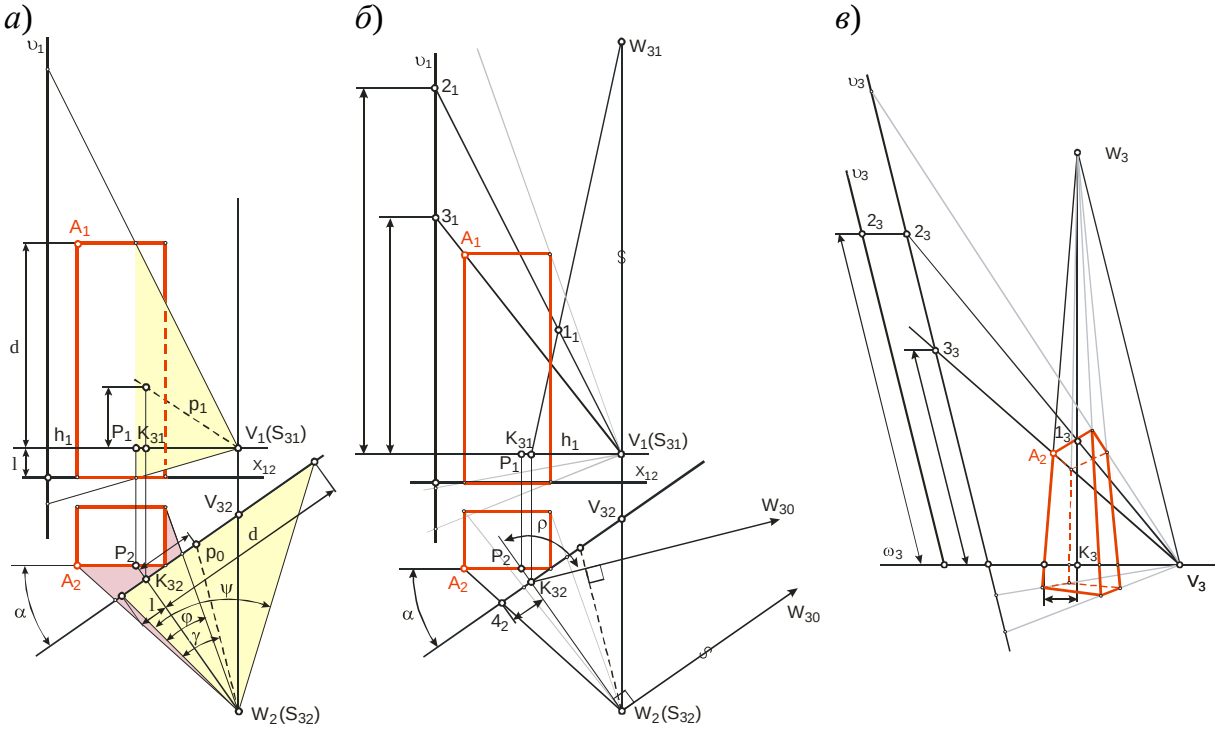


Рис. 7. Геометрическая модель перспективы на наклонной плоскости
а) геометрические параметры перспективной модели
б) определение вершины пучка W_{31}
в) результат построения перспективной модели

Рассмотрим построение точек W_{30} и W_{31} (рис. 7, *б*). Точка W_{30} – это вершина пучка $(W_3) \subset \pi_3$, совмещенная с π_2, а W_{31} – проекция этой вершины на π_1 из центра S_1. В данном случае расстояние $W_{30}W_2 = W_{31}V_1$. Отмеченные точки нужны для следующего, второго, этапа построения дополнительной проекции на наклонной картине.

Рассмотрим рис. 6, который помогает следить за дальнейшими построениями. На рисунке выбраны центр проецирования S_3 и плоскость картины π_3, отмечены точки V_1, V_3 пересечения линии центров S_1S_3 с π_1, π_3 и точки W_2, W_3 пересечения линии центров S_2S_3 с плоскостями π_2, π_3. Из построений очевидно, что треугольник $K_3V_3S_3$ и его проекция из центра S_2 треугольник $K_{32}V_{32}W_{32}$ равны.

Остановимся подробнее на построении дополнительной центральной проекции точки A (A_1-A_2) – точки A_3. Проведем на картине (рис. 7, *в*) линию w_3 – линию горизонта, - на которой зададим вершину пучка V_3 и точку K_3. Отрезок $V_3K_3 = V_{32}K_{32}$ переносим с плоскости π_2. Можно утверждать, что w_3 (ее проекция w_{32}) является линией связи пучков (W_2) и (W_3). Для того, чтобы найти вершину W_3, из точки K_3 восстановим перпендикуляр и отложим на нем отрезок $W_{30}K_{32} = W_3K_3$. Осталось построить линию связи пучков (V_1) и (V_3). В любом месте на поле π_1 проводим линию связи $\upsilon_1 \parallel V_1W_{31}$ и находим соответственную ей линию υ_3 на поле π_3. Любой луч υ_3`, параллельный V_3W_3, можно рассматривать, как линию связи, так как в пучке (V_1) луч $\upsilon_1 \parallel V_1W_{31}$. Если необходимо выдержать построение в масштабе 1:1, проведем луч, делящий $W_{31}K_{31}$ в любом отношении. Затем найдем одноименный луч, разделив W_3K_3 в том же отношении. Далее построим точку 2_3, отложив на прямой υ_3` отрезок 2_13_1. Пересечение прямой, параллельной w_3, с соответствующим лучем выявит точку 2_3. Через эту точку пройдет искомая линия связи υ_3.

Итак, определив линии связи w_3, w_{32} для пучков (W_2), (W_3) и υ_3, υ_1 для пучков (V_3), (V_1), можно строить дополнительную центральную проекцию точки А по общей схеме.

Разработанный геометрический аппарат построения перспективного изображения на наклонной плоскости реализован с использованием системы геометрического моделирования «Симплекс», разработанной в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете Петра Великого [13, 14]. Анализ полученных результатов показал, что созданная геометрическая модель адекватно реагирует на изменяемые параметры схемы, например, изменение точки зрения, изменение уровня горизонта, изменение угла наклона картинной плоскости.

Сравнение полученных графических решений с графическими построениями, непосредственно возникающими в картинной плоскости на основании определения перспективы, показало их совпадение, что подтверждает адекватную работу созданной геометрической модели.

Результаты работы могут служить частью методического обеспечения курсов геометрического моделирования и начертательной геометрии при изложении перспективы и общей теории изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошинов Д.В., Кокорин М.С. Использование метода дополнительного ортогонального проецирования в практике преподавания курса геометрического моделирования [Текст] /Д.В. Волошинов, М.С. Кокорин// Современное машиностроение. Наука и образование: сборник научных трудов по материалам 3-й Международной научно-практической

конференции. СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 1205 с. С.76-84.
2. Афанасьева И.Б.,Кокорин М.С. Формирование интеллектуальных умений учащихся в практике преподавания курса геометрического моделирования [Текст]/И.Б. Афанасьева, М.С. Кокорин// Современное машиностроение. Наука и образование: сборник научных трудов по материалам 4-й Международной научно-практической конференции. СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.- 1308 с. С.30-41.
3. Вальков К.И. Лекции по основам геометрического моделирования. Л.: ЛИСИ, 1970. – 249 с.
4. Вальков К.И. Введение в теорию моделирования. Л.: ЛИСИ, 1974. – 151 с.
5. Вальков К.И. Основы геометрического моделирования: Учебное пособие для студентов всех специальностей и слушателей ФПК/ЛИСИ. Л., 1987. 92 с.
6. Тексты лекций по курсу начертательной геометрии (для студентов всех специальностей ЛИСИ) под. ред. Сухарева Ю.П. Л.: ЛИСИ, 1975. – 160 с.
7. Бударин О.С. Начертательная геометрия. Краткий курс: Учебное пособие. 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 368 с. ил.
8. Тарасов Б.Ф. Методы изображения в транспортном строительстве. – Учеб. Пособие для вузов. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 248 с., ил.
9. Соболев Н.А. Общая теория изображений: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Издательство «Архитектура – С», 2004. – 672 с., ил.
10. Зметный А.Я. Линейная перспектива на наклонной плоскости. Л. Стройиздат, 1968. – 202 с.
11. Короев Ю.И., Фёдоров М.В. Архитектура и особенности зрительного восприятия. – Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре. Москва. – 1954.
12. Шерешевский И.А. Построение изображений методом перспективных координат – М.-Л., Госстройиздат, 1957. – 61 с.
13. Волошинов Д.В. Конструктивное геометрическое моделирование. Теория, практика, автоматизация. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2010. – 355 с.
14. Д.В. Волошинов Применение методов конструктивной геометрии для визуального синтеза и анализа компьютерных программ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2006. -№3(45). – С.65-78.

I.B.Afanasieva[1], M.S.Kokorin[1]

PERSPECTIVE PROJECTION AS AN ILLUSTRATION OF THE HAUCK SCEME USED IN THE COURSE OF GEOMETRIC MODELING

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article considers some issues of the course geometric modeling related to the consideration of the perspective projection as a special case of the Hauck scheme. It is considered the geometric model perspective on the vertical and inclined planes. The results of the projection coincide with other well-known methods of the projection.

Keywords: geometry modeling, method of additional central projection, perspective, scheme of Hauck.

REFERENCES

[1] D.V. Voloshinov, M.S. Kokorin. Use of Additional Orthogonal Projection in Teaching Practice of the Course of Geometric Modeling [Text] /D.V. Voloshinov, M.S. Kokorin // Modern Mechanical Engineering. Science and education: Collection of Research Papers on the materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference. SPbSPU. - SPb: Polytechnic University Publishing House, 2013. P. 1205 P. 76-84.

[2] I.B. Afanasyev, M.S. Kokorin. Formation of Intellectual Skills of Students in Teaching Practice of the course of Geometric Modeling [Text] / K.B. Afanasyev, M.S. Kokorin // Modern Mechanical Engineering. Science and education: Collection of Research Papers on the materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. SPbSPU. - SPb: Polytechnic University Publishing House, 2014.- P. 1308. P. 30-41.

[3] K.I. Valkov. Lectures on Fundamentals of Geometric Modeling. L .: LISI, 1970. – P. 249.

[4] K.I. Valkov. Introduction to Modeling Theory. L .: LISI, 1974. –P. 151

[5] K.I. Valkov. Fundamentals of Geometric Modeling: Textbook for students of all specialties and listeners FPK/LISI. L., 1987. P.92.

[6] Texts of Lectures on Descriptive Geometry (for students of all specialties LISI) edited by Y.P. Sukharev L .: LISI, 1975. –P. 160.

[7] O.S. Budarin. Descriptive Geometry. Short Course: Textbook. 2nd ed., Rev. - SPb .: Lan Publishing House, 2009. – P. 368 . illustration.

[8] B.F. Tarasov. Image methods in Transport Construction. –Textbook for universities. - L .: Stroyizdat. Leningrad Department, 1987. –P. 248, illustration.

[9] N.A. Sobolev. General Theory of Images: Textbook for universities. -M .: Architecture-C Publishing House, 2004. – P. 672, illustration.

[10] A.Y. Zmetny Linear Perspective on Sloping Surface. Stroyizdat L., 1968. – P. 202

[11] Y.I. Koroev, M.V. Fedorov. Architecture and Features of Visual Perception. - State Publishing House of Literature on Construction and Architecture. Moscow. - 1954.

[12] I.A. Shereshevsky. Imaging by Perspective Coordinates - Leningrad, Gosstroiizdat, 1957. –P. 61

[13] D.V. Voloshinov. Constructive Geometrical Modeling. Theory, Practice, Automation. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2010. – P. 355
[14] D.V. Voloshinov. Implementation of Constructive Geometry for Visual Synthesis and Analysis of Computer Programs // Scientific and Technical Statements of SPbSPU. - SPb, 2006. –No.3 (45).. - P.65-78.

УДК 378.1+378.2; DOI 10.1872/MMF-2016-5

Л.Н. Блинов[1], М.Н. Васильев[2], И.А. Соколов[3]

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕКУЛЬТУРНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ – ВАЖНЕЙШИЙ ЭЛЕМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ.

[1]Лев Николаевич Блинов, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, д.х.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6523, E-mail: blinov_ln@spbstu.ru

[2]Михаил Николаевич Васильев, Санкт-Петербургский ГБОУ 630, учитель.
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8- 921-186-11-13, E-mail: ninavitvas@yandex.com

[3]Иван Аристидович Соколов, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, д.х.н., заведующий кафедрой.
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-6880, E-mail: iasokolovspb@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена раскрытию сущности общекультурных компетенций, возможности их формирования у студентов технического направления, а также роли общекультурных компетенций в формировании личности специалиста технического профиля в отношении студентов, обучающихся в СПбПУ.
Ключевые слова: общекультурные компетенции, формирование личности, технические специалисты.

В своем «Новогоднем послании к нации», Владимир Владимирович Путин четко заявил: «Нельзя надеяться на рост мировых цен на нефть, и если не произойдет коренной перестройки народного хозяйства, мы просто-напросто проедим наши резервы, а темпы роста экономики будут колебаться где-то на нулевой отметке. Поэтому надо развивать экспортно-ориентированные производства несырьевого сектора».

Отсюда вытекает целый ряд задач, стоящих перед высшим образованием нашей страны и среди них:

- процесс формирования творческой личности специалиста, способного к саморазвитию, самообразованию, инновационной деятельности;

- процесс формирование личности специалиста, элементами которой станут такие качества как патриотизм, социальная ответственность перед обществом и страной, стремление принести максимальное количество пользы для своего народа;

- формирование специалиста как личности, освоившей основные элементы отечественной и мировой культуры.

Только такие специалисты способны решить поставленную президентом задачу. Превратить Россию из сырьевого поставщика мирового рынка в страну, продавца высоких технологий. Обеспечить обороноспособность, а, значит, и суверенитет страны на основе высоких технологий.

Высшее образование нашего времени сейчас находится в подвижном состоянии, в эпохе быстрого роста, который обусловливается главным образом тремя общими для всего человечества обстоятельствами: 1) развитием знания и его научной организацией, 2) демократизацией общественной и государственной жизни и 3) распространением единой культуры на весь земной шар.

Развитие высшего образования в России связанно не только с изменением структуры самого образования, приспособлением его к мировым стандартам, но и с внедрением нового содержания в процесс высшего образования. Процесс изменения содержания высшего образования связан с введением Федерального Государственного Образовательного Стандарта (ФГОС). Согласно Публичной декларации Министерства образования и науки Российской Федерации введение образовательного стандарта в высших учебных заведениях РФ планируется к 2020 году. На 2015 год планировалось внедрить ФГОС в 56% высших учебных заведений.

Что из себя представляет ФГОС?

Согласно определению Министерства образования и науки РФ: «ФГОС представляют собой совокупность требований, обязательных при реализации основных образовательных программ начального общего, основного общего, среднего (полного) общего, начального профессионального, среднего профессионального и высшего профессионального образования образовательными учреждениями, имеющими государственную аккредитацию». Федеральным законом №309-ФЗ от 1.12.2007 г. была утверждена новая структура государственного образовательного стандарта, и в настоящий момент каждый стандарт включает три вида требований:

1) требования к структуре основных образовательных программ, в том числе требования к соотношению частей основной образовательной

программы и их объёму, а также к соотношению обязательной части основной образовательной программы и части, формируемой участниками образовательного процесса;

2) требования к условиям реализации основных образовательных программ, в том числе кадровым, финансовым, материально-техническим и иным условиям;

3) требования к результатам освоения основных образовательных программ.

Ключевым понятием ФГОС является понятие «компетенция».

Компетенция - это способность специалиста не только обладать суммой знаний, но и активно применять их на практике. Это умение на основе полученных знаний добывать новые знания для решения поставленных задач и ответа на вызовы современного мира. Компетенция позволит специалисту прогнозировать возможное развитие той области, в которой он реализует свои знания и способности, а значит обеспечит такое необходимое качество, как креативность. Компетенции подразделяются на общенаучные, профессиональные и общекультурные. Формирование компетенций реализуется через образовательные программы (ООП), которые разрабатываются каждым вузом исходя из стандартов ФГОС ВПО третьего поколения (бакалавриат), в котором зафиксированы основные компетенции необходимые в конкретной профессии. (Так, например, для ИММиТ СПбПУ это 15.03.05.1 – технология машиностроения, 15.03.05.3 – металлообрабатывающие станки и комплексы, 15.03.05.3 – технология машиностроения).

Таким образом, личность специалиста, сформировавшуюся после реализации ООП, можно представить в виде следующей матрицы:

Здесь общенаучные компетенции - это сумма знаний естественных наук, которая позволяет специалисту свободно ориентироваться в поставленной проблеме, находить пути ее реализации и получать новые знания необходимые для решения данной проблемы.

Специальные компетенции - это набор знаний, необходимых для данной специальности, и если мы говорим о машиностроении, то это производственно-технологическая деятельность:

- способность разрабатывать технические задания по проектированию и изготовлению узлов и агрегатов стандартных и нестандартных машин, оборудования и систем, способность обоснованно выбирать оборудование и технологическую оснастку и т.д. (ПК-1);

- способность разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы расхода материалов, заготовок, топлива и электроэнергии (ПК-2);

- умение оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии (ПК-3);

- умение разрабатывать методические и нормативные материалы и мероприятия по осуществлению разработанных проектов и программ (ПК-4);

- умение осуществлять экспертизу технической документации (ПК-5);

- организационно-управленческая деятельность:

- умение организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать работы по модернизации, унификации выпускаемых изделий и их элементов, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов (ПК-6);

- способность к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными проектами, создавать в коллективах отношений делового сотрудничества (ПК-7);

- способность выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства (ПК-8);

- способность подготавливать заявки на изобретения и промышленные образцы, организовывать работы по осуществлению авторского надзора при изготовлении, монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию выпускаемых изделий и объектов (ПК-9);

- способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, оценивать инновационные и технологические риски при внедрении новых технологий, организовывать повышение квалификации и тренинг сотрудников подразделений в области инновационной деятельности и координировать работу персонала при комплексном решении инновационных проблем (ПК-10);

- умение обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности (ПК-11);

- способность подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения (ПК-12);

- способность проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий (ПК-13);

- способность обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений (ПК-14);

- способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов производства (ПК-15);

- способность изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, систематизировать их и обобщать (ПК-16);

- способность организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников (ПК-17);

- умение организовать развитие творческой инициативы, рационализации, изобретательства, внедрение достижений отечественной и зарубежной науки, техники, использование передового опыта, обеспечивающих эффективную работу подразделения, предприятия (ПК-18);

- научно-исследовательская и педагогическая деятельность:

- умение организовать и проводить научные исследования, по разработке проектов и программ, проводить работы по стандартизации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов (ПК-19);

- способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, систем, процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере, разрабатывать методики и организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов (ПК-20);

- способность подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований (ПК-21);

- способность и готовность использовать современные психолого-педагогические теории и методы в профессиональной деятельности (ПК-22);

- проектно-конструкторская деятельность:

- способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической

документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения (ПК-23). (ФГОС по направлению машиностроение, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 555 от 9 ноября 2009 г.).

Практический опыт - это навыки, полученные обучающимся в процессе участия в научной деятельности университета.

Общекультурные компетенции - это способность совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень (ОК-1);

- способность к обобщению, анализу, критическому осмыслению, систематизации, прогнозированию при постановке целей в сфере профессиональной деятельности с выбором путей их достижения (ОК-2);

- способность критически оценивать освоенные теории и концепции, переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности (ОК-3);

- способность собирать, обрабатывать с использованием современных информационных технологий и интерпретировать необходимые данные для формирования суждений по соответствующим социальным, научным и этическим проблемам (ОК-4);

- способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности (ОК-5);

- способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении (ОК-6);

- способность на научной основе организовывать свой труд, самостоятельно оценивать результаты свой деятельности, владеть навыками самостоятельной работы в сфере проведения научных исследований (ОК-7);

- способность получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, умеет применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения, в том числе в режиме удаленного доступа (ОК-8);

- способность свободно пользоваться литературной и деловой письменной и устной речью на русском языке, умение создавать и редактировать тексты профессионального назначения, владение иностранным языком как средством делового общения (ОК-9);

- способность проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности, учитывая цену ошибки, вести обучение и оказывать помощь сотрудникам (ОК-10).

Кроме всего, изложенного выше, выпускник технического ВУЗа должен обладать и профессиональными компетенциями (ПК).

В области производственно-технологической деятельности, это:

- способность разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения, выбирать оборудование и технологическую оснастку (ПК-1);

- способность разрабатывать нормы выработки и технологические нормативы на расход материалов, заготовок, топлива и электроэнергии (ПК-2);

- умение оценивать технико-экономическую эффективность проектирования, исследования, изготовления машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов, принимать участие в создании системы менеджмента качества на предприятии (ПК-3);

- умение разрабатывать методические и нормативные материалы, а также предложения и мероприятия по осуществлению разработанных проектов и программ (ПК-4);

- умение осуществлять экспертизу технической документации (ПК-5).

В области организационно-управленческой деятельности, это:

- умение организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации, унификации выпускаемых изделий и их элементов, по разработке проектов стандартов и сертификатов, обеспечивать адаптацию современных версий систем управления качеством к конкретным условиям производства на основе международных стандартов (ПК-6);

- способность к работе в многонациональных коллективах, в том числе при работе над междисциплинарными и инновационными проектами, создавать в коллективах отношений делового сотрудничества (ПК-7);

- способность выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства (ПК-8);

- способность подготавливать заявки на изобретения и промышленные образцы, организовывать работы по осуществлению авторского надзора при изготовлении, монтаже, наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию выпускаемых изделий и объектов (ПК-9);

- способность разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, оценивать инновационные и технологические риски при внедрении новых технологий, организовывать повышение квалификации и тренинг сотрудников подразделений в области инновационной деятельности и координировать работу персонала при комплексном решении инновационных проблем (ПК-10);

- умение обеспечивать защиту и оценку стоимости объектов интеллектуальной деятельности (ПК-11);

- способность подготавливать отзывы и заключения на проекты стандартов, рационализаторские предложения и изобретения (ПК-12);

- способность проводить маркетинговые исследования и подготавливать бизнес-планы выпуска и реализации перспективных и конкурентоспособных изделий (ПК-13);

- способность обеспечивать управление программами освоения новой продукции и технологий, проводить оценку производственных и непроизводственных затрат на обеспечение требуемого качества продукции, анализировать результаты деятельности производственных подразделений (ПК-14);

- способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов производства (ПК-15);

- способность изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, систематизировать их и обобщать (ПК-16);

- способность организовывать работу по повышению научно-технических знаний работников (ПК-17);

- умение организовать развитие творческой инициативы, рационализации, изобретательства, внедрение достижений отечественной и зарубежной науки, техники, использование передового опыта, обеспечивающих эффективную работу подразделения, предприятия (ПК-18).

Возникает вопрос: а зачем инженеру (или любому техническому специалисту) общекультурные компетенции?

Если рассматривать компетенции как систему наработанных поведенческих реакций, как себя вести (разумно, продуктивно, приемлемо для окружающих и т.п.) в стандартных и нестандартных профессиональных ситуациях, то общекультурные компетенции позволяют сформировать приемлемую для общества модель поведения в непрофессиональных ситуациях, прежде всего, сформировать навык общения и совместной продуктивной деятельности в коллективе. И совсем неважно, какой это коллектив - группа сотрудников, коллег, семья или дружеская компания.

Комфортное существование в каждой из этих групп положительно сказывается на результатах деятельности, а, например, ОК-4 позволяет специалисту грамотно ориентироваться в современном потоке информации определять наиболее перспективные отрасли знаний. Одним словом, общекультурные компетенции помогают сформировать творческую, креативную личность.

Каким же образом должны формироваться компетенции?

В общем случае за формирование одной компетенции должны отвечать несколько различных дисциплин, сгруппированные особым образом (естественно, возможны ситуации, когда одна компетенция формируется одним предметом или даже частью одного предмета) [1]. Совокупность предметов, формирующих одну компетенцию или группу родственных компетенций, называют модулем. Формирование одной компетенции может включать изучение различных дисциплин, участие в студенческих конференциях, прохождение практики и выполнение различных самостоятельных и научных работ.

Что касается общекультурных компетенций, то они формируются как за счет предметных модулей, так и за счет практических действий студентов и преподавателей.

В программе «Образовательная политика в части управления и реализации модулей образовательных программ высшего образования» (утвержденных ученым советом СПбПУ от 25.01.2016 года) [2], модулями, формирующими общекультурные компетенции, являются обязательные унифицированные дисциплинарные модули (Fundamentals).

Эти модули включают в себя такие учебные дисциплины как, философия, история, экономика. По выбору могут изучаться и другие дисциплины, формирующие общекультурные компетенции будущих специалистов [3].

Кроме того, формирование общекультурных компетенций может проходить и через внеучебную работу. Это и участие в научных проектах, которые проводятся на базе СПбПУ, и участие в общественных организациях и многое другое. В СПбПУ для этого имеется ряд программ, таких как «Развитие национального исследовательского университета» и «Программа развития деятельности студенческих объединений». Последняя может существенно повлиять на формирование общекультурных компетенций и социально необходимых качеств личности, таких как социальная ответственность и патриотизм.

Возможность формирования указанных компетенций в процессе обучения в СПбПУ, можно рассмотреть, используя матрицу SWOT. Она состоит из следующих показателей: Strengths (свойства проекта или коллектива, дающие преимущества перед другими в отрасли), Weaknesses (свойства, ослабляющие проект) - эти показатели характеризуют внутреннее состояние объекта или процесса. Opportunities (внешние вероятные факторы, дающие дополнительные возможности по достижению цели), Threats (внешние вероятные факторы, которые могут осложнить достижение цели), если составить матрицу процесса формирования общекультурных компетенций, то она будет выглядеть следующим образом:

Таким образом, на основе анализа всех перечисленных выше параметров матрицы процесса формирования общекультурных компетенций применительно к Санкт-Петербургскому политехническому университету Петра Великого, есть все основания полагать, что процесс подготовки технических специалистов в СПбПУ вполне позволяет сформировать у обучающихся все необходимые общекультурные компетенции, соответствующие ФГОС третьего поколения [4], а наша страна получит грамотных социально ориентированных и широко эрудированных специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Я.Аршанский Теория и практика организации методической подготовки будущего учителя химии на основе компетентностного подхода. - Сб. трудов Междунар. научн.-метод. конф. «Методика преподавания химических и экологических дисциплин», 26-27 ноября 2015 г., г. Брест. БрГТУ. 2015. С.5-8.
2. «Образовательная политика в части управления и реализации модулей образовательных программ высшего образования» (в редакции приказа от 21.03.2016 №395), СПбПУ, 2016 г. - www.spbstu.ru/university/organizational-documents/administation-catalogue/.
3. Н.П.Танцура, Л.Н.Блинов, И.А.Соколов. Инновационно-системный подход к преподаванию химии в технических вузах. Мат.3Междунар.научн-практ.конф. Современное машиностроение. Наука и образование. 20-21.6.2013/ - СПб, изд. Политен.ун-та. 2013 с.172-179.
4. М.Н.Васильев, Л.Н.Блинов, И.А.Соколов. Подходы к формированию общекультурной компетенции ОК-9 как важной составляющей процесса «модернизации» человека и общества. - В сб. «Scientific Discoveries: Proceedings of articles the international scientific conference». Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, 28-

29.01.2016. ISBN 978-80-7534-076-4 + ISBN 978-5-00090-093-2, p.217-224.

L.N. Blinov, M.N. Vasilev, I.A. Sokolov

FORMING OF GENERAL CULTURAL COMPETENCES – AN IMPORTANT ELEMENT IN THE PREPARATION OF TECHNICAL SPECIALIZATION STUDENTS IN HIGHER EDUCATION

Abstract

The work is dedicated to the disclosure of the essence of common cultural competence , the possibility of their formation at students of technical directions, as well as the role of common cultural competence in shaping the personality of technical specialists with regard to students enrolled in Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University.

Key words: general cultural competence, personality development , technical specialists.

REFERENCES

[1] E.Ya.Arshansky Theory and practice of methodical preparation of the future teachers of chemistry on the basis of competence approach. Coll. Intern works . nauchn. method . Conf. "Methods of teaching of chemical and environmental sciences " , November 26-27, 2015. Brest. BrSTU . 2015. P.5-8.

[2] " Educational policy regarding the management and implementation of educational programs of higher education modules " (in the wording of the order from 21.03.2016 №395). Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. 2016 - www.spbstu.ru/university/organizational-documents/administation-catalogue/.

[3] N.P.Tantsura, L.N.Blinov, I.A.Sokolov. Innovation and systematic approach to the teaching of chemistry in technical colleges . Mat.3 Internat. conf. Modern engineering. Science and education. 20-21.6.2013 , St. Petersburg . - Ed . Polytechnic Univ. 2013. p.172-179 .

[4] M.N.Vasilev, L.N.Blinov, I.A.Sokolov. Approaches to the formation of general cultural competence of the OK - 9 as an important component of the process of "modernization" of man and society. Mat. Internat. conf. «Scientific Discoveries: Proceedings of articles the international scientific conference». Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, 28-29.01.2016 . ISBN 978-80-7534-076-4 + ISBN 978-5-00090-093-2, p.217-224.

УДК 378.1; DOI 10.1872/MMF-2016-6

Н.И. Бойко[1], Е.Б. Шевченко[2]

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРЕПОДАВАНИЯ. МЕТОДИКА ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

[1] Николай Иванович Бойко
Донецкий национальный технический университет,
Институт гражданской защиты Донбасса
Донецк
E-mail: boyko_nick@mail.ru.

[2] Екатерина Борисовна Шевченко
Донецкий национальный технический университет,
Институт горного дела и геологии
Донецк
E-mail: shevik@ukr.net.

Аннотация

Актуальность темы обоснована внедрением в учебный процесс современных информационных технологий, позволяющих сделать образовательный процесс более эффективным. Использование информационных технологий способствует экономии учебного времени, активизации мыслительной деятельности студентов, повышению мотивации обучения студентов, что соответствует современным тенденциям в системе высшего профессионального образования, для которого характерна интенсивная смена репродуктивной технологии обучения на инновационную.

Цель работы – провести анализ существующих технологий обучения, выявить характерные недостатки, предложить пути их устранения, определить наиболее актуальную модель технологий для современного образовательного процесса подготовки будущих инженеров.

Ключевые слова: педагогика, технология преподавания, концепция преподавания, образовательный процесс, методика образовательного процесса, информационные технологии.

В настоящее время активно развивается применение информационных технологий в процессе обучения будущих инженеров. В системе высшего профессионального образования с применением данных технологий расширяется спектр предоставляемых образовательных услуг, резко возрастает уровень подготовки будущих специалистов.

Актуальность исследования этого вопроса продиктована следующими противоречиями:

- стандартный вид обучения и темпы, с которыми появляются новые знания;

- имея большой потенциал возможностей для обучения, на данный момент информационные технологии используются недостаточным образом;

- в современных условиях высока потребность в кадрах, которые имеют хороший уровень информационной подготовки, однако фактический уровень подготовки не соответствует требованиям.

Информатизация высшего образования – осуществление мер, которые направлены на улучшение подготовки специалистов-инженеров с помощью использования информационных технологий в образовательном процессе.

В настоящее время люди постоянно должны пользоваться своими исследовательскими способностями, поскольку окружающая среда регулярно изменяется и создает новые условия жизни [9].

Распространение и популяризация исследовательских работ активно проявляется и в образовательной практике. Достижение поставленных результатов возможно при эффективной педагогической работе, осуществление которой возлагается на педагогов-профессионалов.

Преподаватели-исследователи должны четко ориентироваться во всех направлениях развития предмета, который они преподают, это обусловлено стремительным движением современной жизни [8].

Изменение приоритетов общества на сегодня связано с возникновением понятия постиндустриального общества, которое максимально заинтересовано в способности своих граждан самостоятельно принимать решения, активно действовать, приспосабливаться к новым условиям жизни. Это привело к изменению образовательных парадигм. Вследствие чего появилась потребность в переосмыслении содержания учебных дисциплин, а также технологий обучения в свете системы ценностей и приоритетов в образовательной политике. Процесс образования постоянно пополняется новыми составляющими, такими как умение оперировать информацией, творческий подход к решению проблем, развитие способностей личности и новые процессуальные умения.

В условиях усовершенствования образования многие исследователи придают все большее значение активизации самостоятельного творческого мышления студентов, их личностной ориентации. Немаловажную роль в реализации эффективности процесса образования играет его активизация, которая основана на использовании новых педагогических технологий с использованием компьютерных технологий [10].

Все эти новые тенденции и особенности современного общества ставят перед образовательными учреждениями задачи для подготовки выпускников, которые могут:

- ориентироваться в изменяющихся жизненных обстоятельствах, самостоятельно приобретать необходимые знания, применять их на практике при решении различных появляющихся проблем, чтобы в дальнейшем иметь возможность найти в жизни свое место;
- видеть появляющиеся проблемы, находить пути их решения, критически размышлять, использовать при этом новые технологии; понимать, где и когда получаемые ими знания могут пригодиться; творчески мыслить и находить новые идеи;
- грамотно обрабатывать информацию: находить необходимые факты, проводить их анализ, формулировать четкие выводы, сравнительные анализы с подобными или альтернативными вариантами решения, выявлять закономерности (статистические, логические), делать обобщения о полученной информации, применять опыт при решении проблем;
- быть активными, коммуникабельными, общительными в различных кругах, умеющими коллективно и командно работать в различных направлениях и ситуациях, избегать конфликтных ситуации;
- заниматься саморазвитием, работой над собственными знаниями, интеллектом, уровнем культуры, моральными качествами [3].

Еще в начале 70-х годов прошлого века о появлении первого этажа педагогической технологии заявила Т.А. Ильина: «Проблема целей обучения является одной из важнейших как для определения содержания и планирования учебного процесса, так и для проверки овладения учебным материалом». Первый вклад в разработку этой проблемы в теоретическом плане был внесен комиссией, возглавляемой профессором Чикагского университета Бенджамином Блумом, результатом работы которой явилась книга «Таксономия задач обучения», имеющая подзаголовок «Классификация целей обучения». Последовательная ориентация на четко определенные цели, таким образом, становится лейтмотивом технологического построения учебного процесса.

Вторым этажом педагогической технологии становится идея полной управляемости учебным процессом на основе обратной связи, также заимствованная и из программированного обучения и из кибернетики. Яркими представителями кибернетического программированного обучения были Л.Н. Ланда, П.М. Эрдниев, Л.Б. Ительсон. Начиная с работы Т.А. Ильиной интерес педагогов смещается с проблем управления на проблемы содержания и методики программированного обучения. Работы названных ученых послужили предпосылкой для разработки теоретических основ программированного обучения. Н.Ф. Талызина объединила два подхода – кибернетический и психолого-педагогический –

и в целом ряде работ предложила психологическую теорию поэтапного формирования умственных действий [1].

Теоретическим основам программированного обучения посвящен ряд работ В.П. Беспалько, который соединил психологические концепции усвоения (ассоциативно-рефлекторную и поэтапного формирования умственных действий) с информационным подходом, с теорией управления и слагаемыми процесса обучения (целями, содержанием, методами) [4].

Термин «технология обучения» – это возможность реализации содержания обучения, которое предусмотрено учебными программами и включает в себя систему форм, средств и методов обучения, благодаря которым обеспечивается максимально эффективное достижение целей. В педагогике принято классифицировать методы обучения, имеющие различные основания – источник учебной информации (игровой, наглядный, практический, словесный); способ взаимодействия обучающих и обучающихся (объяснительно-иллюстративный, частично-поисковый, проблемный, исследовательский) [11].

Можно определить основные причины появления новых психолого-педагогических технологий. К ним относятся следующие:

- потребность в более детальном и глубоком учете и использовании личностных особенностей студентов;
- понимание необходимости внедрения системно-деятельностного подхода вместо словесного способа передачи информации;
- возможность составление учебного процесса, способа общения преподавателей и студентов, которые могут обеспечить гарантированный результат обучения и достижения поставленных целей [6].

Существуют такие признаки технологии преподавания:

- двусторонняя деятельность преподавателей и студентов;
- комплекс методов и приемов;
- организация и проектирование учебного процесса;
- существование условий для раскрытия личностных качеств, потенциала студентов, реализации их потенциала.

Все технологии преподавания включают в себя: определенное целевое направление; научные течения и идеи, которые являются опорой; правила поведения преподавателей и учащихся; критерии оценки результатов; ограничения в использовании.

Основными характеристиками современных технологий преподавания являются следующие позиции:

- технологии разрабатываются под определенную педагогическую идею, в их основе лежат четкие методологические и философские позиции автора;

- технологический порядок действий, который выстраивается исключительно в соответствии с ожидаемыми результатами и поставленными целями;
- результативная работа технологии основывается на взаимосвязанной деятельности студентов и преподавателей, реализации технических возможностей, человеческих качеств по средствам диалога и общения;
- систематическая реализация всех пунктов и элементов технологии должна быть воплощена любым преподавателем и при этом должно стать основой для достижения ожидаемых результатов каждым студентом;
- органической частью педагогической технологии являются диагностические процедуры, содержащие критерии, показатели и инструментарий измерения результатов деятельности [11].

На сегодняшний день формулировка термина «технология» заключается в представлении научной или практически обоснованной системы деятельности, которая применяется человеком для производства материальных благ, усовершенствования окружающей среды. Все технологии на данный момент делятся на две группы:
- промышленные технологии – это комплекс вариантов приемов и способов получения, переработки и обработки изделий, материалов и сырья, которые осуществляются в разнообразных отраслях промышленности;
- социальные технологии – комплекс способов решения социальных проблем, который направлен на создание благоприятных условий жизни и развитие социальной структуры, общественных отношений. Целью социальных технологий является создание условий для реализации возможностей, интересов, потребностей человека в рамках существующей системы ценностей.

Социальными технологиями принято считать психолого-педагогические, культурологические, PR-технологии, социологические и другие.

Понятие «методика» в научной литературе последних лет регулярно заменяется на понятие «технология», и это вызывает ряд вопросов.

В основе понятия «методика» лежит понятие «метод». Метод (от греч. *methodos* – исследование) – прием, способ или образ действия; способ исследования явлений действительности. Если рассматривать метод со стороны дидактической категории, то можно сказать, что это комплекс способов, приемов для осознания конкретной области практических и теоретических знаний какой-либо деятельности. Это путь познания, способ организации процесса познания, достижения поставленной дидактической цели.

Педагогический метод является основой педагогических технологий и представляет собой систему целенаправленных действий для решения конкретных педагогических задач, которые включают в себя:

- обновленные педагогические средства, позволяющие хранить, обновлять и обмениваться информацией;
- различные виды взаимодействия между субъектами процесса образования (коллективные, индивидуальные, групповые);
- деятельностные позиции участников образовательного процесса относительно педагогических средств и друг друга;
- способы, которые обуславливают глубину воздействия педагогических средств.

Методика – эта система норм и правил изложения способов обучения любой дисциплины или выполнения различной работы.

Методика преподавания учебной дисциплины – раздел педагогики, который исследует и изучает законы, особенности изложения содержания дисциплины и разрабатывает применение их на практике.

Составляющими частями методики преподавания любой учебной дисциплины являются локальные методики – для отдельных разделов или тем, организации разнообразных форм занятий, формирования навыков и умений.

Методика в узком смысле слова – совокупность приемов проведения занятий, а в широком смысле слова – наука о закономерностях организации массового процесса обучения. Таким образом, многие исследователи этой проблемы сходятся во мнении, что методики в узком смысле слова входят в состав технологий, а в широком смысле слова «методика» шире понятия «технология», поскольку в рамках методики преподавания какого-либо предмета могут использоваться различные технологии. Сейчас технологический подход применяется ко всем составляющим образовательной системы (финансированию, управлению и т.д.), что приводит к отсутствию единой формулировки понятия «образовательная технология».

Педагогическая технология – это комплексное функционирование всех составляющих компонентов педагогического процесса, которое построено на научной основе, запрограммировано по времени, в пространстве и приводит к поставленным результатам. На сегодняшний день существует около 300 различных вариантов понятия «технология». Это представляет определенный интерес, поскольку само понятие является содержательным обобщением, вбирающим в себя смыслы разнообразных определений различных авторов.

В общем понимании – «технология» – это наука о мастерстве, в строгом и узком понимании – это фиксированная и структурированная последовательность операций, которые гарантируют получение ожидаемого результата. Технология содержит в себе четкий алгоритм для решения поставленных задач.

Поскольку сфера образования является крайне многогранной и неоднозначной с точки зрения действия норм, законов, технологии в ней

не имеют универсального характера, что приводит к использованию в большинстве случаев более гибких подходов к пояснению технологий преподавания.

Различные мнения возникают из-за различных подходов к понятиям «педагогические» и «образовательные» технологии [2].

Первый подход. Педагогическая технология рассматривается как системный метод применения, создания, определения целостного процесса преподавания и усвоения полученных знаний учитывая технические и человеческие ресурсы и их взаимодействие. Образовательная технология – это процессная система совместной деятельности учащихся и учителя по проектированию (планированию), организации, ориентированию и корректированию образовательного процесса с целью достижения конкретного результата при обеспечении комфортных условий участникам.

Второй подход. Педагогические технологии относятся к образовательному процессу в целом (образование и воспитание), образовательные – затрагивают только учебную деятельность.

Третий подход. Исключает понятие «педагогические технологии» и дает представление о единственно возможном понятии «образовательные технологии». В данном контексте, если говорить о словосочетании «образовательные технологии», то оно также используется как собирательный термин, включающий весь перечень технологий, используемых в образовании.

Четвертый подход. Педагогические технологии, которые появились в 50-х годах прошлого века в противовес нечеткости и неопределенности традиционного методического подхода, – это те технологии, цель и результат которых жестко взаимосвязаны, а результативность диагностируема. По классификации М.В. Кларина, это так называемые «жесткие» или «строгие» технологии. Это технологии, направленные, в основном, на усвоение содержания, например «модель полного усвоения», или освоение несложных (диагностируемых) умений. В данном контексте образовательными технологиями (термин, ставший общепринятым для педагогических технологий 90-х годов) принято считать технологии, ставящие более «широкие» цели (исследовательские, творческие способности ученика, развитие критического мышления), не позволяющие строго диагностировать результаты обучения. Это технологии, направленные на развитие самостоятельности, субъектности обучаемого. Часто понятие «образовательные технологии» 90-х заменяют понятием «личностно ориентированные образовательные технологии».

Л.В. Загрекова [5] считает важными признаками технологии преподавания такие факторы как диагностическое целеобразование, однозначное достижение целей, корректируемость, целостность.

Таким образом, на основе анализа существующих подходов к определению признаков «технологии» в образовании, можно выделить основные признаки технологии обучения, принятые на современном этапе развития педагогической науки:

- диагностичность описания цели (цели учебного занятия должны быть описаны так, чтобы они определялись по четко выделенным критериям);
- воспроизводимость педагогического процесса (в т.ч. предписание этапов, соответствующих им целей обучения и характера деятельности обучающего и обучаемого);
- воспроизводимость педагогических результатов.

Технологии обучения должны соответствовать следующим критериям:

- концептуальность – социально-педагогическое, дидактическое, философское и психологическое обоснование образовательных целей;
- содержание;
- организационные формы обучения;
- системность – логика и взаимосвязь всех частей и аспектов процесса, целостность разработки и реализации образовательного процесса;
- управляемость – варьируемость методов и средств обучения с целью коррекции результатов, выявляемых в процессе диагностики;
- эффективность результатов;
- воспроизводимость другими преподавателями.

Работа над созданием современных технологий преподавания должна соответствовать принципам:

- целостности технологии, которая представляет дидактическую систему;
- реализации технологии в конкретной среде педагогики, с целью достижения и реализации поставленных задач;
- нелинейности педагогических структур и приоритетности факторов, влияющих на механизмы самореализации соответствующих педагогических систем;
- адаптации процесса обучения к личности учащегося и его познавательным способностям;
- потенциальной избыточности учебной информации, создающий оптимальные условия для формирования обобщённых знаний.

Важнейшим критерием эффективности должна выступать надежность в достижении результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авво Б.В. Гуманитарные технологии в педагогическом образовании // Педагогика в вузе как учебный предмет: Сборник научных трудов /

Б.В. Авво, Е.С. Заир-Бек. – СПб: РГПУ им. А.И. Герцена, 2001. – С. 88–106.
2. Алексеев С.В., Муштавинская И.В. Применение инновационных образовательных технологий: опыт Санкт-Петербурга: Учебно-методическое пособие для специалистов по управлению образованием / С.В. Алексеев, И.В. Муштавинская. – СПб., 2008. – 84 с.
3. Беспалько В.П. Педагогика и прогрессивные технологии обучения / В.П. Беспалько. – М.: Ин-т проф. обр. РАО, 1995. – 336 с.
4. Беспалько В.П. Слагаемые педагогической технологии / В.П. Беспалько. – М.: Педагогика, 1989. – С. 3.
5. Загрекова Л.В. Основы педагогических технологий / Л.В. Загрекова // Высшее образование в России. – 1997. – № 4. – С. 97–108.
6. Лебедев О.Е. Компетентностный подход в образовании / О.Е. Лебедев // Школьные технологии. – 2004. – № 5. – С. 3–12.
7. Мануйлов В. Современные технологии в инженерном образовании / В. Мануйлов, И. Федоров, М. Благовещенская // Высшее образование в России. – 2003. – № 3. – С. 117–123.
8. Полат Е.С. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования: Учеб. пособие для студ. пед. вузов и системы повыш. квалиф. пед. Кадров / Е.С. Полат. – М.: Изд. центр «Академия», 1999.
9. Селевко Г.К. Современные образовательные технологии: Учебное пособие / Г.К. Селевко. – М.: Народное образование, 1998. – 256 с.
10. Стефаненко П.В. Основы педагогики высшей школы / П.В. Стефаненко. – Донецк: ДонГАУ, 1998. – 82 с.
11. Филиппова В.М. Реформы образования: Аналитический обзор / В.М. Филиппова. – М.: Центр образовательной политики, 2003.

N.I. Boyko[1], E.B. Shevchenko[2]

ANALYSIS TECHNOLOGIES OF TEACHING. METHODS OF IMPLEMENTATION OF NEW TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF TEACHING STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES

[1] Donetsk National Technical University;
[2]Donetsk National Technical University.

Abstract

Background justified the introduction into the educational process of modern information technologies allowing to make the educational process more effective. Use of information technologies helps to save instructional time, activation of mental activity of students, increase student motivation training.

intense change of reproductive technology training for innovative characteristic for higher education.

The purpose of work – to analyze existing learning technologies to identify specific shortcomings, suggest ways to overcome them, to determine the most current model of modern technologies for the educational process.

Keywords: pedagogy, teaching technology, teaching concept, the educational process, methods of the educational process, information technology.

REFERENCES

[1] Avvo B.V. Humanitarian technologies in pedagogical education // Pedagogics in institution of higher learning as an educational object: Collection of scientific works / B.V. Avvo, E.S. Zair-Bek. – Saint Petersburg: Russian State Pedagogical University of the name A.I. Gertsena, 2001. – P. 88–106. (rus.)

[2] Alekseev S.V., Mushtavinskaya I.V. Application of innovative educational technologies : experience of Saint Pe tersburg: Educational is a methodical manual for specialists on a management by formation / S.V. Alekseev, I.V. Mushtavinskaya. – Saint Petersburg, 2008. – 84 p. (rus.)

[3] Bespalko V.P. Pedagogics and progressive technologies of educating / V.P. Bespalko. – Moscow: Institute of trade education of Russian Academy of Education, 1995. – 336 p. (rus.)

[4] Bespalko V.P. Elements of pedagogical technology / V.P. Bespalko. – Moscow: Pedagogics, 1989. – P. 3. (rus.)

[5] Zagrekova L.V. Bases of pedagogical technologies / L.V. Zagrekova // Higher education in Russia. – 1997. – № 4. – P. 97–108. (rus.)

[6] Lebedev O.E. Competence approach in education / O.E. Lebedev // School technology. – 2004. – № 5. – P. 3–12. (rus.)

[7] Manuylov V. Modern technologies in engineering education / V. Manuylov, I. Fedorov, M. Blagoveschenskaya // Higher education in Russia. – 2003. – № 3. – P. 117–123. (rus.)

[8] Polat E.S. New pedagogical and information technologies in the system of education : train aid for the students of pedagogical institutions of higher learning and system of in-plant training of pedagogical shots / E.S. Polat. – Moscow: Publishing center "Academy", 1999. (rus.)

[9] Selevko G.K. Sovremennyie obrazovatelnyie tehnologii: Uchebnoe posobie / G.K. Selevko. – M.: Narodnoe obrazovanie, 1998. – 256 p. (rus.)

[10] Stefanenko P.V. Bases of pedagogics of higher school / P.V. Stefanenko. – Donetsk: the Donetsk state academy of management, 1998. – 82 p. (rus.)

[11] Filippova V.M. Reforms of education: the State-of-the-art review / V.M. Filippova. – Moscow: Center of educational politics, 2003. (rus.)

УДК 378.147 + 303.522.4; DOI 10.1872/MMF-2016-7

Буляница А.Л.[1,2]

ОЦЕНКА СТУДЕНТАМИ ИВТОБ СОДЕРЖАНИЯ КУРСА «СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАТЕМАТИКИ» – ПРИНЦИПЫ, ПОДХОДЫ, ВЫВОДЫ

Буляница Антон Леонидович, д.ф.-м.н., профессор
[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
[2] Институт аналитического приборостроения РАН, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552 12-93, E-mail: antbulyan@yandex.ru

Аннотация

Проанализированы результаты анкетирования студентов 2-го курса Институт военно-технического образования и безопасности (ИВТОБ), касающиеся оценивания содержания курса «Специальные разделы математики». Помимо формальных итогов обработки анкет, представляет интерес мотивировка студентами выбора определенного варианта ответа, критерии оценки важности и значимости различных разделов курса, а также возможные корректировки способов изложения и подбора материала курса.

Ключевые слова: специальные разделы высшей математики, дифференциальные уравнения, решение систем линейных алгебраических уравнений, теория вероятностей, актуальность темы, теоретическая значимость, наглядность и выразительность.

При формировании любой программы учебной дисциплины одним из важных вопросов, стоящих перед лектором – автором курса является вопрос о степени восприятия представленного материала студентами. При этом, распределение оценок на экзамене может служить лишь косвенным ответом на данный вопрос. Очевидно, что у разных преподавателей могут быть различные критерии оценки. Кроме того, результат сдачи экзамена не всегда определяется уровнем восприятия материала.

В свою очередь, степень восприятия учебного материала, очевидно, зависит от предварительной готовности студента, т.е. от базовых знаний, прежде всего, по предшествующим разделам дисциплины, если изучается какой-либо новый раздел, и от содержания учебного материала. Здесь существенна связь учебного материала изучаемого курса с

предшествующими и изучаемыми параллельно дисциплинами. Возможно, менее важна, но также существенна форма представления материала: соотношение между абстрактными общетеоретическими положениями и прикладными иллюстративными примерами, наглядность и яркость изложения (шоу-элемент), иногда в ущерб строгости. Последнего, разумеется, следует, по возможности, избегать.

Существует мнение, что для большинства студентов желательно именно предельно упрощенное изложение с максимальным присутствием шоу-элемента.

Цель данной работы состоит в доказательстве, по крайней мере, не универсальности такого представления об оценивании содержания учебного курса и стиля его изложения.

В качестве примера использованы результаты анкетирования студентов 2-го курса Институт военно-технического образования и безопасности (ИВТОБ), проведенного после изучения курса «Специальные разделы высшей математики».

Ранее автор доклада имел опыт разработки и преподавания специального курса по высшей математике. Курс по выбору под условным названием «Математическая статистика» для студентов второго курса кафедры «Машиноведение и основы конструирования» Института металлургии, машиностроения и транспорта (ИММиТ) читался во втором семестре общим объемом 3 часа в неделю [1]. С этой точки зрения объема оба курса одинаковы.

Собственно понятие специальных разделов высшей математики достаточно условное. Например, в классическом учебнике [2] для студентов энергетических специальностей высших технических учебных заведений содержится достаточно полное изложение курса теории функций комплексного переменного и операционного исчисления. В учебном пособии [3], предназначенном для аспирантов и студентов ИТМО обучающихся по направлению подготовки 200100 «Приборостроение», приводятся основные положения некоторых разделов математики, касающихся вопросов исследования характера поведения сложных динамических систем, описываемых посредством обыкновенных дифференциальных уравнений. В то же время, дисциплина «Специальные разделы высшей математики», включенная в базовую часть математического и естественнонаучного цикла основной образовательной программы подготовки магистра по направлению 270800.68 «Строительство» Орловского государственного аграрного университета по данным на 2011 г. предполагала изучение уравнений математической физики и их приложений [4].

Основной задачей специального курса было более подробное изложение нескольких прикладных задач (приложений), по возможности связанных с тематикой изучаемых студентами дисциплин. В частности, на

старших курсах студентами ИВТОБ изучалась проблематика, связанная с экологической и техносферной безопасностью. Таким образом, из числа вопросов, ранее изучаемых студентами в рамках общего курса Высшей математики, были выделены три кратких раздела: 1. Простейшие виды обыкновенных дифференциальных уравнений, в первую очередь, с разделяющимися переменными и однородные; 2. Решение систем линейных алгебраических уравнений, как непосредственно, так и как следствие обработки экспериментальных данных; 3. Задачи теории вероятностей, в первую очередь, связанные с элементами теории надежности, основанными на применении алгебры событий.

Приложения и конкретные примеры рассматривались на лекциях (1 час в неделю), а технические аспекты решений типовых задач разбирались на практических занятиях (2 часа в неделю). Тем самым, объем лекционной (теоретической) составляющей курса был 18 часов.

Учебными пособиями могли явиться, как специально разработанные Политехническим университетом опорные конспекты [5-7], так и авторские учебные пособия по отдельным темам, например, [8].

Таким образом, данный курс включал в себя три достаточно контрастных по содержанию фрагмента, формально относящихся к различным разделам курса Высшей математики, а именно, обыкновенные дифференциальные уравнения, линейная алгебра, теория вероятностей.

По завершении семестра студентам была дана анкета, где им в форме ответов на вопросы предлагалось оценить особенности изложения именно лекционной части курса «Специальные разделы высшей математики». Общая численность потока была около 70 человек. Были получены 11 анкет. С большой вероятностью некоторые ответы были не индивидуальны, а носили групповой характер. Разумеется, какие-либо масштабные обобщения на основе результатов анкетирования не будут корректными, но проанализировать и оценить полученные ответы представляется интересным.

Далее будут приведены формулировки вопросов анкеты, распределение вариантов ответов и возможные интерпретации. При этом, часть выводов отражают исключительно позицию автора, но некоторые трактовки выработаны совместно и согласовано с анкетируемыми студентами. В скобках после формулировки вопроса будут приводиться данные, сколько анкетируемых выбрали указанный вариант.

Вопрос 1. Курс включает различные разделы: дифференциальные уравнения, линейная алгебра и теория вероятностей. Это представляется:

А. естественным и приемлемым (10), Б. сложным из-за различия тематики,

В. Искусственным и нелогичным, Г. затрудняюсь ответить (1).

Здесь 10 из 11 анкет содержит ответ А, один из ответов относится к варианту Г.

Наверное, пункт А мог бы быть разделен на два подпункта: естественный и приемлемый по отдельности. Тем не менее, с большой вероятностью можно считать подобный вариант построения курса *приемлемым*. Отсутствие ответов по варианту В, скорее всего, следует объяснить вежливостью и нежеланием обидеть преподавателя, как автора курса.

Вопрос 2. Наиболее важным для изучения представляется раздел:

А. дифференциальные уравнения (8), Б. линейная алгебра (3), В. Теория вероятностей (6).

Здесь варианты ответов распределились, как 8-3-6. В качестве объяснения можно использовать версию самих студентов, что раздел Линейная алгебра имеет наибольшую «удаленность» от того круга вопросов, который студенты предполагают изучать на старших курсах.

Вопрос 3. Изложение курса было:

А. избыточно сложным, Б. приемлемым по сложности (11), В. Излишне простым.

Полное единодушие в ответах и выбор варианта Б, скорее всего, означает, что сложность изложения учебного материала была *избыточно занижена*.

Вопрос 4. Материал, представленный Вам ранее в рамках общего курса Высшей математики для восприятия данного предмета представляется:

А. недостаточным (3), Б. вполне достаточным (5), В. Затрудняюсь ответить (3).

В ответах на этот вопрос был выбран преимущественно вариант Б. Это вполне объяснимо, поскольку при чтении курса практически не использовалось неизученных ранее разделов общего курса математики. Практически единственным исключением представлялась проблема собственных чисел матрицы, ранее не рассмотренная. Эта проблема изучалась нами в упрощенном с вычислительной точки зрения варианте, исключительно для матриц 2x2, и ее рассмотрение позволило поднять проблемы обусловленности матрицы коэффициентов систем линейных уравнений и устойчивости решений к малым вариациям правых частей уравнений.

Вопрос 5. Как бы Вы оценили соотношение между общетеоретическими сведениями и иллюстрирующими прикладными задачами в рамках лекционного курса?

А. избыток теоретических сведений абстрактного характера, Б. достаточно сбалансировано (11), В. Избыток иллюстративных примеров.

В этом случае все анкетируемые согласились, что соотношение между общетеоретическими сведениями и иллюстрирующими примерами было правильным (вариант Б). Собственно, задача формирования курса именно в этом и состояла. Следовательно, ее решение следует признать успешным.

Следующий вопрос и анализ ответов на него в наибольшей степени позволяет проанализировать принципы, которыми руководствовались студенты при оценивании содержания курса.

Вопрос 6. Среди примеров и задач наиболее важными и интересными Вам представляются:

А. модели развития популяций, включая логистический рост (6),

Б. простейшие модели экологической катастрофы (три случая) (5),

В. Движение в среде с сопротивлением («задача о скалолазке») (6),

Г. матричный датчик газового анализа (слабо селективный сенсор) и проблема чувствительности решения к вариациям экспериментальных данных (8),

Д. задача о встрече (геометрическая вероятность) (1),

Е. элементы теории надежности (алгебра сложных событий) (6),

Ж. идея метода Монте-Карло с примером (оценка числа ПИ) (2).

При ответе на этот вопрос можно было выбрать любое число вариантов. Характер этих рассмотренных иллюстративных примеров был различен.

С точки зрения круга вопросов и дисциплин, которые предстояло изучать в дальнейшем, наиболее близкими по тематике были простейшие модели экологической катастрофы и элементы теории надежности. В несколько меньшей степени тематике изучаемых в дальнейшем дисциплин соответствовали модель развития популяций и идеи матричного датчика газового анализа. Остальные примеры по тематике были достаточно далеки от областей научных интересов.

Если проанализировать эти задачи с позиций научной (теоретической) значимости, то очень важными являлись модель развития популяции, понятие геометрической вероятности (задача о встрече), описание идеи метода Монте-Карло и проблема чувствительности решения. Последняя совершенно не обязательно должна была «сопрягаться» именно с матричным датчиком газового анализа.

С точки зрения наглядности, выразительности представления, т.е. шоу-элемента безусловными лидерами являлись модели развития популяций, простейшие модели экологической катастрофы и «задача о скалолазке».

В целом видно, что все три составляющих (перспективы дальнейшего изучения или близость тематики, восприятие научной значимости задачи и шоу-составляющая) оказали сопоставимое влияние на предпочтения студентов при ответе на данный вопрос.

Вопрос 7. Каждая лекция курса в нынешнем виде представляет собой автономный фрагмент курса, что допускает изучение отдельной темы независимо от ознакомления с другими разделами курса. С Вашей точки зрения – это:

А. достоинство и удобство (8),

Б. недостаток и дополнительная сложность,

В. Затрудняюсь ответить (2),

Г. это не так и лекции достаточно тесно тематически связаны друг с другом (1).

Данная в этом пункте характеристика лекционной составляющей курса, как мне кажется, не требует дополнительных комментариев.

Вопрос 8. Полагая, что курс «Специальные разделы высшей математики» сохранится в учебном плане в нынешнем объеме, оцените характер лекционной составляющей курса в целом.

А. вполне приемлем в данном варианте изложения (8),

Б. желательно усиление базовой теоретической составляющей (2),

В. желательно увеличение числа примеров и иллюстраций (1).

Если исключить фактор вежливости по отношению к преподавателю – автору и разработчику курса (ответы по варианту А), то другим мотивом может быть не очень ясное представление о том, что курс должен собой представлять. Возможно, что вполне естественно, у студентов 2-го курса еще не может быть четких критериев отбора учебного материала, даже если они достаточно хорошо разобрались в структуре базового курса Высшей математики и изучали какой-либо схожий по объему краткий спецкурс по другим дисциплинам.

В целом, как мне кажется, студенты продемонстрировали достаточно взвешенный и разумный подход к анализу предложенного им одно семестрового курса Специальные разделы высшей математики. По крайней мере, априорная версия, что студенты желали бы «чего поярче, покороче и попроще» *не подтверждается*.

Хотелось бы выразить благодарность студентам Институт военно-технического образования и безопасности, которые в 2015 году учились на 2-м курсе, являлись слушателями курса Специальные разделы высшей математики и участниками анкетирования. Их оценки, безусловно, очень ценны и информативны для меня, как лектора и автора курса. Возможно, результаты анкетирования покажутся интересными и другим читателям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буляница А.Л. Принципы формирования программы курса по выбору для студентов технических факультетов на примере дисциплины «Математическая статистика» /Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (20-21 июня 2013, Санкт-Петербург) /под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2013. С.69-75
2. Пчелин Б.К. Специальные разделы высшей математики, М: Высшая школа,1973. 462 с.

3. Мусалимов В.М., Резников С.С., Чан Нгок Чау. Специальные разделы высшей математики. Часть первая: Учебное пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. - 80 с.
4. Специальные разделы высшей математики [Электронный ресурс] : — Режим доступа: http:// www.gigabaza.ru›doc/50269.html — Загл. с экрана.
5. Лобкова Н.И., Лагунова М.В., Семенов В.М. Математика. – Вып. 1. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии: Опорный конспект. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 108 с.
6. Лобкова Н.И. Математика. – Вып. 2. Введение в математический анализ. Дифференциальное исчисление функции одной переменной: Опорный конспект. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2003. – 132 с.
7. Бортковская М.Р., Романов М.Ф., Хватов Ю.А. Математика. Выпуск 4. Обыкновенные дифференциальные уравнения, числовые и функциональные ряды, ряды Фурье и интеграл Фурье: Опорный конспект. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. 108 с.
8. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения: Учеб. пособие для ВУЗов. М: Наука. 1984. 272 с.

A.L. Bulyanitsa[1,2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia
[2] Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract

We analyzed the results of the survey of students of 2nd course of Institute of military technical education and security (IMTES) relating to the assessment of contents of the course "Special chapters of mathematics". In addition to the formal results of processing of questionnaires, interest motivation of students selecting a particular answer choice, the criteria for evaluating the importance and significance of the different sections of the course, and possible adjustments to the way of presentation and selection of course material.

Key words: special sections of higher mathematics, differential equations, solution of systems of linear algebraic equations, probability theory, the relevance of the topic, theoretical significance, clarity and expressiveness

REFERENCES

[1] Bulyanitsa A.L. Principles of program’s formation of the choicing branch for students of technical faculties by the example of discipline «Mathematical statistics» / Materials of the 3rd International scientific and practical conference "Modern mechanical engineering. Science and education" (on June 20-21, 2013, St. Petersburg) / eds. by M. M.

Radkevich and A.N. Evgrafov. – SPb: Publishing house Politekhn. Un-ta, 2013. P. 69-75 (rus)
[2] Pchelin B. K. Specialniye razdely vishey mathematiky, Moscow: Vishaya Shckola, 1973. 462 p. (rus)
[3] Musalimov V. M., Reznikov S.S., Chan Ngok Chau. Specialniye razdely vishey mathematiky. Part 1: Manual. - SPb.: University of ITMO, 2006. - 80 p. (rus)
[4] Specialniye razdely vishey mathematiky [An electronic resource]: — Access mode: http:// www.gigabaza.ru›doc/50269.html — Zagl. from the screen (rus)
[5] Lagunova M.V., Lobkova N.I., Semenov V.M. Mathematika. Part 1. Osnovy lineynoy algebry I analyticheskoy geometriy. Oporniy konspect. – SPb: izd-vo Polytekhn. Univ., 2006. – 108 p. (Rus)
[6] Lobkova N.I. Mathematika. Part 2. Vvedenie v mathematicheskiy analiz. Differencialnoye ischisleniye functsiy odnoy peremennoy. Oporniy konspect. – SPb: izd-vo Polytekhn. Univ., 2003. – 132 p. (Rus)
[7] Bortkovskaya M.R., Romanov M. F., Yu.A. Matematika. Part 4. Obiknovenniye differencialniye uravneniea, chisloviye I functionalniye ryady, Fourier's ryad i Fourier's integral: Oporniy konspect. – SPb: izd-vo Polytekhn. Univ., 2006. – 108 p. (Rus)
[8] Arnold V. I. Obiknovenniye differencialniye uravneniea: Ucheb. Posobiye dlya Vuzov. Moscow: Nauka. 1984. 272 p. (rus)

УДК 378.147; DOI 10.1872/MMF-2016-8

В.Е. Васильев[1], М.В. Лагунова[2], Н.В. Ежова[3]

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ-ЗАОЧНИКОВ МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ОТДЕЛЕЛЕНИЯ ИММиТ

[1]Васильев Виталий Евгеньевич, директор ЦЭОРиДТ,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: vitvas@spbstu.ru

[2]Лагунова Марина Витальевна, к.ф-м.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: lagmarina@gmail.com

[3]Ежова Наталья Владимировна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: ezhovanv@gmail.com

Аннотация

В докладе изложена информация о новом подходе в дистанционном обучении студентов бакалавриата механико-машиностроительного отделения ИММиТ, обучающихся заочно, без отрыва от производства. Особое внимание уделено математической подготовке.

Ключевые слова: интернет-технологии в образовании, интернет-ресурсы, видеолекция, дистанционное обучение, тест.

В последнее время интернет-технологии в обучении студентов играют важнейшую роль. Широкое использование дистанционного обучения связано, прежде всего, с возрастающим потоком студентов, желающих получить реальное высшее образование, что неизбежно ведет к укрупнению студенческих потоков. Часто преподавателю просто физически не хватает времени, чтобы пообщаться с каждым студентом.

Кроме того, как показывает практика, современные студенты значительно больше расположены искать необходимую информацию именно в интернете. Библиотеки и читальные залы подходят не каждому. Это, наверное, весьма прискорбный факт, но приходится его признать.

В данном докладе мы хотим сделать упор на преподавании такой дисциплины, как математика. Как известно, математические методы играют значительную роль в подготовке инженеров, особенно инженеров-конструкторов. Дисциплина «Математика» является одной из основных фундаментальных учебных дисциплин; она обеспечивает подготовку бакалавров к успешному освоению дисциплин экономического, естественнонаучного и профессионального циклов.

Целью дисциплины является:

- приобретение базовых математических знаний, способствующих успешному освоению различных курсов (физика, теоретическая механика, сопротивление материалов, информатика, начертательная геометрия и т.д.) и смежных дисциплин;
- обеспечение подготовки студентов к изучению в последующих семестрах ряда специальных дисциплин;
- приобретение навыков построения и применения математических моделей в инженерной практике.

Задачами преподавания дисциплины, связанными с её содержанием, являются:

- развитие логических, познавательных и творческих способностей студентов,
- доведение до понимания студентами роли математики, как языка науки, при изучении вопросов и проблем, возникающих в различных областях науки и техники.

Дисциплина «Математика» относится к базовой части математического и естественнонаучного цикла Б.2 основной образовательной программы бакалавра. Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных по математике в средней школе и соответствующих документу государственного образца о среднем (полном) общем образовании или среднем профессиональном образовании.

Обучение математике предполагает интеграцию знаний из различных предметных дисциплин. Изучение и успешная аттестация по математике являются, наряду с другими дисциплинами данного учебного цикла, необходимыми для эффективного освоения профессиональных дисциплин, таких, как инженерная графика, механика, метрология, стандартизация и сертификация, электротехника, безопасность жизнедеятельности, основы электрохимии, физические методы исследования структуры материалов, физические и механические свойства материалов, технология обработки

материалов, технология соединения материалов, металловедение и термическая обработка материалов, экономика.

Для студентов дневного механико-машиностроительного отделения ИММиТ нами были созданы два дистанционных курса математики, для первого и второго семестра, соответственно. Эти курсы пользуются достаточной популярностью у студентов-первокурсников. На сайте они могут в любое удобное время, даже во время поездки в метро, например, прочитать нужную информацию по прошедшей или предстоящей лекции, пройти тест, чтобы самостоятельно оценить свои знания по предмету. Часть тестов студенты должны выполнить, чтобы получить допуск на экзамен. К сожалению, курсы, составленные для студентов дневного отделения два-три года назад, обладают некоторыми недостатками.

Во-первых, они были написаны именно для студентов дневного отделения, у которых значительно больше времени на освоение материала. Кроме того, курс для дневных студентов был составлен на основе календарного плана, то есть в четкой привязке к датам. Со студентами-заочниками о календарном плане говорить довольно сложно. Каждый выбирает удобное для себя время в соответствии с личным рабочим графиком.

Во-вторых, за эти годы информационные технологии шагнули вперед, а преподаватели математики, в свое время, разумеется, прошедшие курс обучения платформе Moodle, уже не в курсе новых возможностей. Поэтому возникла необходимость в новом курсе, созданном с участием профессионалов в области именно технологий дистанционного обучения.

Новый курс математики был создан на сайте СПбПУ http://immet-dist.spbstu.ru/. Его принципиальное отличие от предыдущих курсов, прежде всего, в том, что он основан на модульной системе. Например, в первом семестре студенту-заочнику необходимо освоить четыре модуля (раздела): линейная алгебра, векторная алгебра, аналитическая геометрия и введение в математический анализ. В предлагаемом курсе студент может изучить всю необходимую информацию или по прилагаемым методическим материалам в виде конспектов лекций, или просмотрев соответствующие видеолекции, пройти тесты по пройденному материалу и завершить изучение материала контрольным тестом, являющимся пропуском на экзамен.

Сами тесты генерируются каждый раз по-новому. То есть имеется банк из 12 – 15 заданий по каждому из разделов. Тест составляется из 10 заданий, случайно выбранных из них. В каждом задании 10 вариантов однотипных задач, число которых мы планируем увеличить со временем. Задания составлены таким образом, чтобы охватить все темы раздела, при этом обычно не требуются особо сложные вычисления или размышления. Однако пройти тест без предварительной подготовки и освоения материала

все же проблематично. Простое угадывание ответов невозможно, поскольку сами ответы – это, как правило, нецелые числа, вычислять которые часто нужно на калькуляторе. За каждую неправильную попытку ответа снимается треть от возможного количества очков за данное задание. Соответственно, на третий раз студент получает ноль очков. При повторном прохождении теста задания будут уже в основном другие, так как генерируется тест, как уже было сказано выше, случайным образом. На такой тест отводится полтора часа. За каждый правильный ответ, данный с первой попытки, начисляется одно очко. В случае если ответ не совсем правильный, студент получает менее одного очка. Это возможно, например, при выполнении задания, в котором из нескольких ответов надо выбрать все правильные. Правила, по которым тест считается пройденным, известны заранее. Так же, как и условия, по которым студент будет допущен к экзамену.

Правила курса и балльно-рейтинговая система

Максимальная сумма, которую студент может набрать за семестр по дисциплине, составляет 100 баллов.

При изучении в баллах оцениваются:

- тестовые задания по разделам – 4 теста по 10 баллов
- итоговый тест – 40 баллов

Контрольное мероприятие считается зачтенным, если полученная оценка составляет не менее 60% от максимальной.

Студент допускается к итоговому тесту только после успешного прохождения всех тестов по модулям.

Условиями допуска на экзамен являются:

- успешное прохождения всех тестов
- не менее 60 баллов по итогам изучения курса

Если говорить об обучении студентов-заочников, то стоит заметить, что всегда были проблемы в том, что касается часов, которые студент потратил на учебу. В том смысле, что невозможно отследить или хоть как-то оценить время, потраченное на изучение материала. Обычно студенты заочного отделения выполняли задания в тетрадях, которые разными способами (в том числе и по обычной почте) отсылали на проверку. Реально оценить труд самого студента при такой практике довольно сложно, если вообще возможно. Часто идеально выполненные домашние задания наводят на определенные размышления. В системе дистанционного обучения, конечно, такие случаи тоже возможны, но мы исходим из того, что тесты, которые проходит студент, даются не все сразу, а открываются и закрываются в строгом соответствии с графиком, оговоренном на сайте (см. Рис.1). Более того, контрольные мероприятия по

различным дисциплинам проходят в определенной последовательности. Например, в этом месяце студенты изучают математику и выполняют все задания из математического цикла. На следующей неделе, возможно, они переключаются на химию.

Временной график изучения дисциплины

	Начало	Конец
Раздел 1	21.03	27.03
Раздел 2	28.03	3.04
Раздел 3	4.04	10.04
Раздел 4	11.04	17.04
Итоговый тест	18.04	24.04

Рис. 1

В заключение приведем пример из практики. В момент написания этой статьи студенты заочного отделения ИММиТ, обучающиеся по специальности «Машиностроение и конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства», проходят уже третий тест по математике. Преподаватель может отслеживать успешность прохождения студентом всех предыдущих тестов (см. рис. 2), а также проверять допущенные ошибки и при необходимости оставлять комментарии.

Есть также возможность корректировать задания и ответы к ним. На рис. 3 и 4 приведены фрагменты экрана, на котором отражена очередная (вторая) попытка студента пройти тест. Со всей очевидностью можно предположить, что тест был пройден хоть и с ошибками, но самостоятельно, что радует.

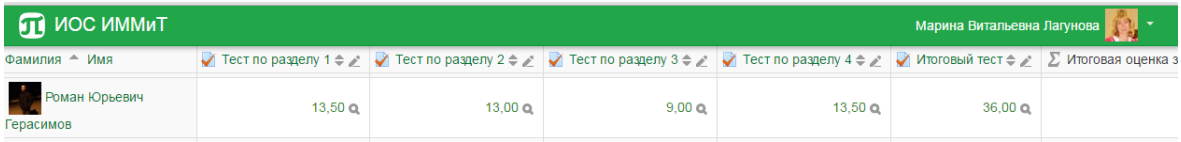


Рис. 2

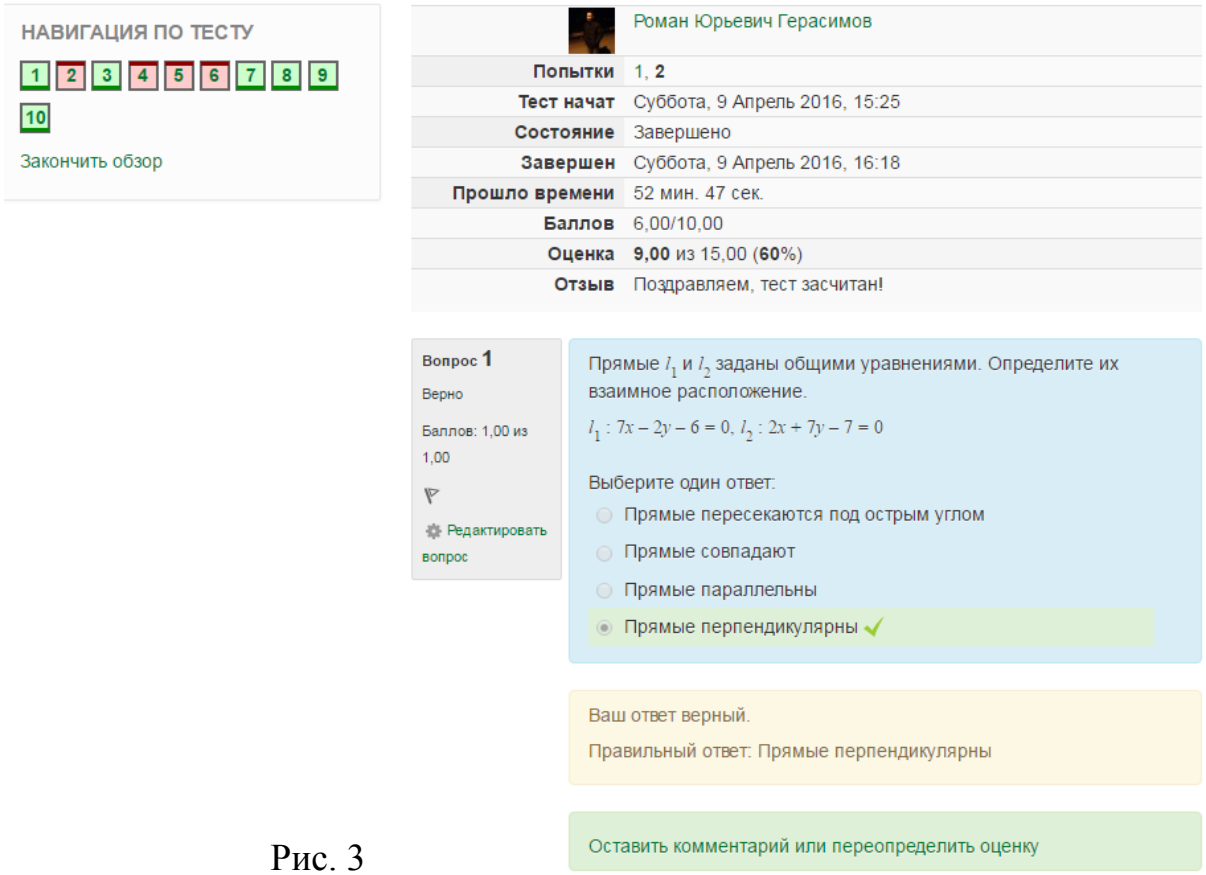


Рис. 3

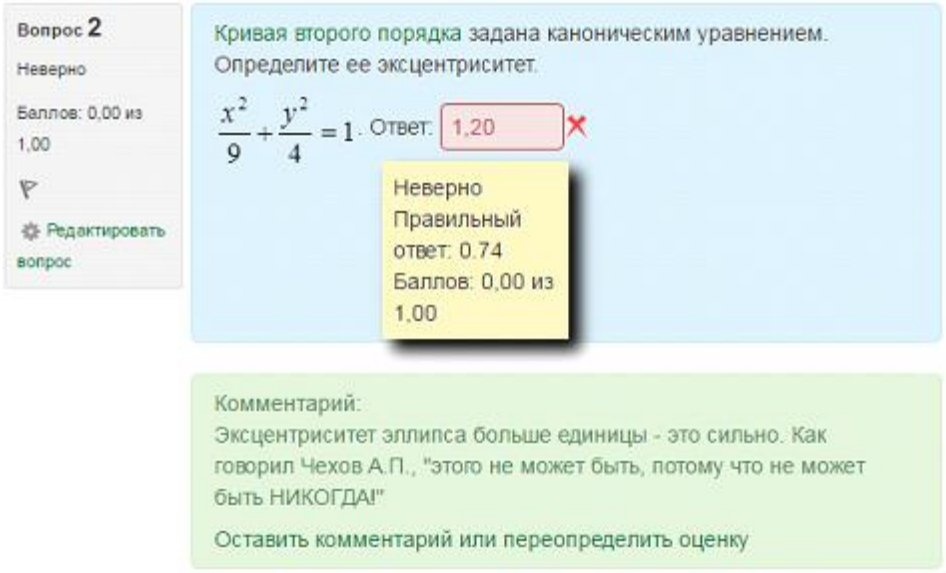


Рис. 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.В. Лагунова, Н.В. Ежова. Интерактивный подход в дистанционном преподавании курса математики студентам механико-машиностроительного

направления. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 67-71
2. И.Б. Афанасьева, Е.В. Князева. Организация самостоятельной работы студентов.// Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 20-29.
3. М.В. Лагунова, Н.В. Ежова, Д.В. Кетов. Использование интернет-технологий в преподавании курса математики для студентов механико-машиностроительного направления ИММиТ // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С.118-123.
4. Н. И. Лобкова, А.Л. Буляница, М.В. Лагунова. Опыт реализации курса математики для бакалавров. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 124-128.
5. А.Л. Буляница. Принципы формирования программы курса по выбору для студентов технических факультетов на примере дисциплины «Математическая статистика». // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 69-75.
6. М.М.Радкевич , Е.Н.Крупкина. Особенности подготовки бакалавров по программе непрерывного обучения «колледж-ВУЗ» // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 101-106.
7. Козликин Д.П., Радкевич М.М. Особенности подготовки бакалавров по новому федеральному государственному образовательному стандарту. // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. 14- 15 июня 2011 года, Санкт-Петербург – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011 – 410 с.
8. Gnudi, A., Fornasa, W., Lorenzi, A., Malvisi, L. Integration of e-Tutoring in a Blended Learning Course on Mathematics, Proceedings of LINC 2007 Conference,Technology-Enabled Education: A Catalyst for Positive Change-Amman, Jordan, 2007.
9. Cavalli E., Gnudi A., Lorenzi A., Malvisi L., The Virtual Classroom within Blended Learning, Proceedings of EDEN 2006 // Annual Conference, Vienna, 2006.
10. M.I. Santally, A. Senteni. Effectiveness of Personalised Learning Paths on Students Learning Experiences in an e-Learning Environment. // http://www.eurodl.org/ 21.03.2013
11. T. Anderson, J. Dron. Learning technology through three generations of technology enhanced distance education pedagogy. // http://www.eurodl.org 13.09.2012

V.E.Vasilyev[1], M.V. Lagunova[2], N.V. Ezhova[3]

DISTANCE EDUCATION OF STUDENTS BY CORRESPONDENCE AT MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF IME&T

[1]V.E.Vasilyev, director, Russia, St. Petersburg
Phone: +7 (812) 290-95-07, E-mail: vitvas@spbstu.ru
[2]Dr. Marina V. Lagunova, Ass. Prof.,Russia, St. Petersburg
Phone: +7 9312562995, E-mail: lagmarina@gmail.com
[3]Natalja V. Ezhova, Sen. Lect., Russia, St. Petersburg
Phone: +7 9117096699, E-mail: ezhovanv@gmail.com

Abstract

The report provides information about a new approach in distance teaching technologies for bachelor students by correspondence in mechanical engineering department of IME&T. Special attention has been given to their mathematical training.

Key words: IT in education, e-tutoring, video lectures, distance learning, distance education, test.

REFERENCES

[1] M.V. Lagunova, N.V. Ezhova. The interactive approach in distant learning of mathematics for students of mechanical engineering department. // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2014. – 67-71 p. (rus)

[2] I.B.Afanas'eva , E.V. Knyazeva . Organization the self-determinated work of students // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2014. – 20-29 p. (rus)

[3] Lagunova M.V., Ezhova N.V., Ketov D.V. The use of internet technology in teaching mathematics for students of mechanical engineering department of IME&T // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2013. – 118-123 p. (rus)

[4] Lobkova N.I., Bulaynitsa A.L., Lagunova M.V. Experience in the implementation of the mathematics courses for bachelors // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2013. – 124-128 p. (rus)

[5] Bulyanitsa A.L. Principles of program's formation of the choicing branch for students of technical faculties by the example of discipline

«Mathematical statistics». // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2013 – 69-75 p. (rus)
[6] M. M. Radkevich, E.N. Krupkina. Bachelor's program features continuing education "College – University"// SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2014. – 101-106 p. (rus)
[7] Kozlikin D.P., Radkevich M.M. Features of preparation of Bachelors on the new federal State educational standard. // Modern engineering. Science and education: the materials of the international scientificallypractical Conference. 14-15 June 2011, St. Petersburg-St. Petersburg: Polytechnic University, 2011.- 410 p. (rus.)
[8] Gnudi, A., Fornasa, W., Lorenzi, A., Malvisi, L. Integration of e-Tutoring in a Blended Learning Course on Mathematics, Proceedings of LINC 2007 Conference,Technology-Enabled Education: A Catalyst for Positive Change- Amman, Jordan, 2007.
[9] Cavalli E., Gnudi A., Lorenzi A., Malvisi L., The Virtual Classroom within Blended Learning, Proceedings of EDEN 2006 // Annual Conference, Vienna, 2006.
[10] M.I. Santally, A. Senteni. Effectiveness of Personalised Learning Paths on Students Learning Experiences in an e-Learning Environment. // http://www.eurodl.org/ 21.03.2013
[11] T. Anderson, J. Dron. Learning technology through three generations of technology enhanced distance education pedagogy. // http://www.eurodl.org 13.09.2012

УДК 378.147 + 514.181; DOI 10.1872/MMF-2016-9

Н.С. Иванова[1], Г.А. Красильникова[2],
И.М. Крыжановская[3], И.С. Смирнова[4]

ИНТЕРНЕТ-СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ НЕУСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ ПО ГРАФИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ

[1]Иванова Наталия Сергеевна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: iv_ns@mail.ru

[2]Красильникова Галина Анатольевна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-75-14, E-mail: kras_gal@mail.ru

[3]Крыжановская Ирина Маратовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: kalambda.ro@yandex.ru

[4]Смирнова Ирина Сергеевна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: kpgd@mail.ru

Аннотация

В статье излагаются методы педагогической терапии, которые применяются на кафедре «Инженерная графика и дизайн» СПбПУ при работе с неуспевающими студентами в рамках курса «Начертательная геометрия и инженерная графика».

Ключевые слова: начертательная геометрия, инженерная графика, дистанционное обучение.

Курс «Начертательная геометрия и инженерная графика» состоит из двух разделов. Раздел «Начертательная геометрия» изучается в течение одного семестра. Учебным планом предусмотрены лекции и практические занятия. Итоговый контроль проводится в виде письменного экзамена (в традиционной форме или в виде теста). Раздел «Инженерная графика» изучается в течение двух семестров на практических занятиях. Форма итогового контроля — зачет, который проставляется по итогам выполненных студентом индивидуальных графических заданий.

При изучении обоих разделов курса предполагается активная самостоятельная работа студентов: повторение пройденного материала по конспектам, учебной литературе; выполнение домашних заданий, графических работ; подготовка к практическим занятиям и экзаменам, освоение компьютерных технологий.

Ввиду насыщенности теоретического материала, большого объёма графических работ, возникает проблема: пропуски занятий приводят к неуспеваемости, а впоследствии, к академической задолженности, которую собственными силами удаётся ликвидировать не всем студентам. Поэтому преподавателю рекомендуется систематически оценивать результаты обучения для выявления пробелов в освоении студентами разделов дисциплины (проводить педагогическую диагностику) и своевременно осуществлять педагогическую терапию по устранению отставания в учебе.

Взаимодействие преподавателя и студента должно быть основано на доброжелательности. Немаловажным является создание педагогом «ситуации успеха» для того, чтобы помочь более сильным студентам реализовать свои возможности в более трудоемкой и сложной деятельности и помочь более слабым выполнить посильный для них, но необходимый (в соответствии с требуемыми результатами обучения) объем работы [1].

В монографии [2] приведена общедидактическая классификация стадий неуспеваемости. В зависимости от стадии неуспеваемости применяются различные методы педагогической терапии.

Эпизодическая неуспеваемость

При изучении начертательной геометрии наряду с задачей индивидуального обучения одаренных студентов (подготовка к предметным олимпиадам, студенческим конференциям) [3], преподаватели сталкиваются с полярной проблемой — необходимостью создания методик преподавания для неуспевающих студентов.

Это — трудоемкий процесс, поэтому, для стимула разработчиков, задачу хотелось бы сформулировать так: разработка методики преподавания для студентов, пропустивших ряд занятий по уважительной причине (болезнь; семейные обстоятельства; различные официальные мероприятия, например, спортивные сборы, профсоюзные слёты) и имеющих эпизодиче-

ские пробелы знаний, которые можно мобильно устранить по ходу семестра.

На кафедре «Инженерная графика и дизайн» СПбПУ разработан комплекс дистанционных тематических обучающе-контролирующих материалов по курсу «Начертательная геометрия». По каждой теме представлен теоретический материал [4, 5, 6], тестовые задания для самоконтроля знаний [7], контрольные задания [8]. Материалы некоторых тем снабжены 3D-моделями, выполненными в среде системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D [9]. Материалы размещены на сайте кафедры и в электронной библиотеке СПбПУ, к ним имеется свободный доступ из сети Интернет (чтение, печать, копирование).

Данные материалы можно использовать не только для восполнения пропущенных занятий, но и, в том числе, для самоконтроля знаний, для повторения пройденного материала.

Предполагается следующая схема действий студента:

- дистанционно: изучение теоретического материала (в рекомендуемых пособиях изложены основные положения теории по разделам курса, рассмотрены решения типовых задач с подробными комментариями и графическими фрагментами последовательности построения);
- дистанционно: решение тестовых заданий для самоконтроля знаний (в прилагаемом пособии приведены условия задач, рекомендации к их решению, графические решения-ответы);
- очно, на консультации: выполнение зачетного задания по теме в присутствии преподавателя (один из вариантов из открытой базы контрольных заданий).

Пример контрольного задания по теме «Пересечение поверхностей» и наглядные изображения к нему представлены, соответственно, на рис. 1 и рис. 2.

С 3D-моделями пересекающихся поверхностей в формате *.m3d можно ознакомиться в среде системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D (если она установлена на персональном компьютере студента) или посмотреть видеоролик в формате *.mp4.

Использование предложенных наглядных материалов помогает студентам решать задачи методами начертательной геометрии, сравнивая и анализируя полученные геометрические образы.

Контроль усвоения студентами учебного материала и оценка их знаний и умений проводятся очно, так как в условиях дистанционного контроля образовательного процесса высока вероятность фальсификации результатов обучения. Несомненно, на консультации осуществляется не только контроль знаний. Студент может обратиться к преподавателю с вопросами, обсудить правильность решения задач, предварительно самостоятельно изучив пропущенный материал и выполнив тестовые задания.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ ПО ТЕМЕ "ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ"
Вариант 8

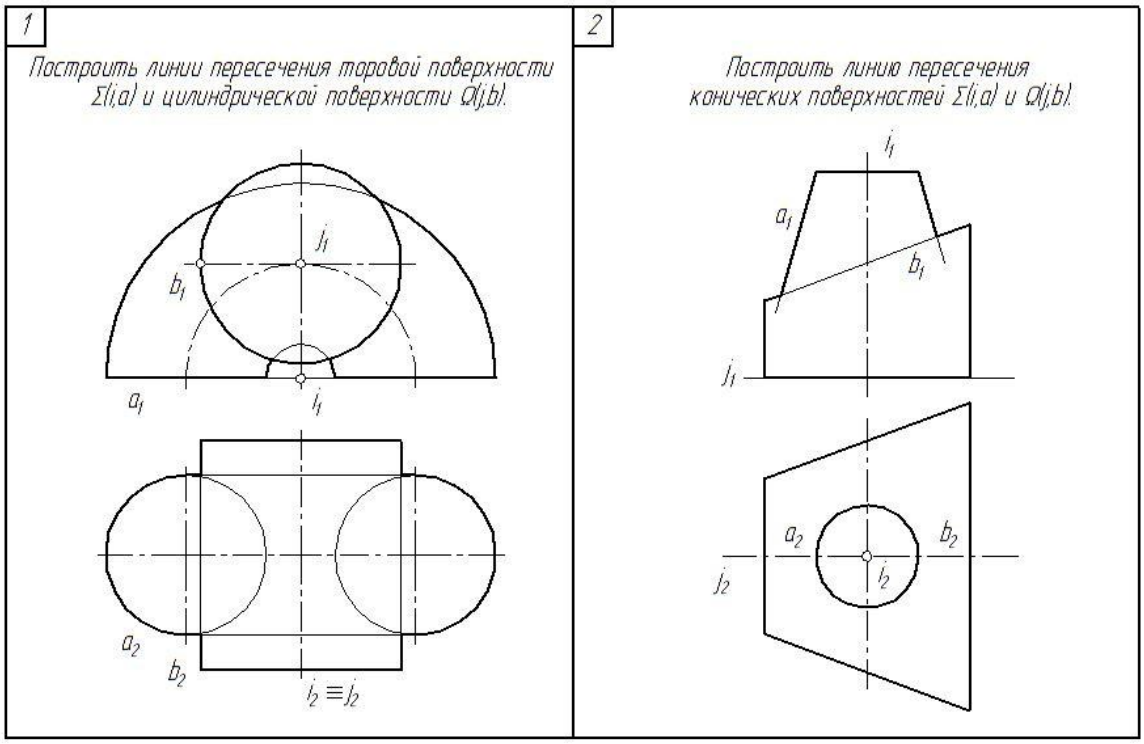


Рис.1

НАГЛЯДНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ТЕМЕ "ПЕРЕСЕЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ"
Вариант 8

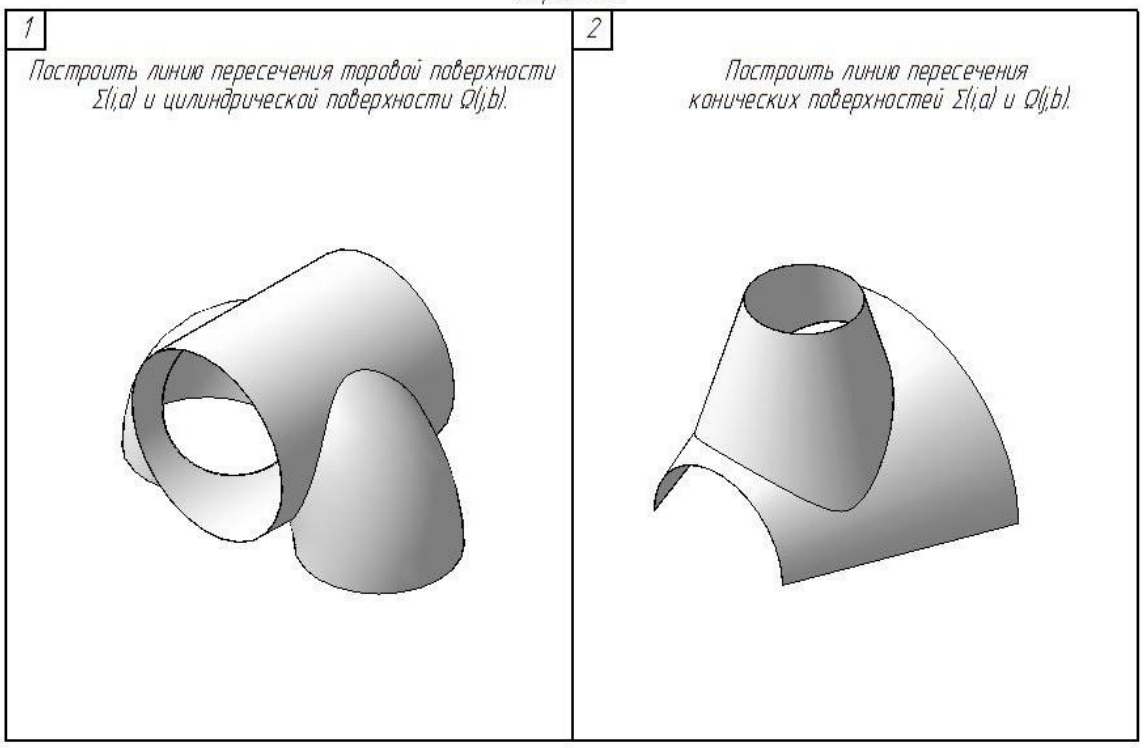


Рис.2

Устойчивая неуспеваемость

При изучении раздела курса «Инженерная графика» чаще встречается другой тип неуспеваемости — устойчивая (семестровая): у студента имеется академическая задолженность в виде невыполненного объёма графических заданий. Сроки ликвидации академической задолженности определяет дирекция института, в котором учится студент.

Также академическая задолженность может возникнуть при переводе студента из одного ВУЗа в другой (из-за разницы в программах). Для этой категории студентов принимающим ВУЗом утверждается индивидуальный учебный план с установленными сроками экзаменов или зачётов.

Так как количество студентов с академической задолженностью значительно, возникает необходимость создания «выравнивающих» смешанных групп с прикреплением к ним кураторов из числа преподавателей. При формировании групп проводится входное тестирование с использованием контрольно-измерительных материалов [10].

Традиционно на занятиях по курсу «Инженерная графика» осуществляется изложение нового материала (в виде вводной лекции по изучаемой теме), поэтапная проверка графических заданий, текущий тестовый контроль по основным темам семестра; в конце семестра — защита курсовых работ, проведение зачётных мероприятий.

Такая же структура соблюдается и на занятиях в «выравнивающих» группах, только она отличается некоторой «гибкостью», с учётом того, что на занятиях присутствуют студенты с разным уровнем знаний.

Для обеспечения студентов учебно-методическими материалами используется сеть Интернет. К каждому графическому заданию из электронного ресурса можно извлечь: методические указания [11, 12], демонстрационные материалы в виде плакатов и презентаций [13,14], электронные базы заданий и образцовых чертежей [15], электронный практикум по освоению компьютерных технологий разработки конструкторской документации [16].

Опыт показывает, что применение современных Интернет-сетевых технологий, как при индивидуальной работе со студентами, так и при работе с группой студентов, является эффективным методом педагогической терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Николаева Е.А.* Неуспевающие студенты как психолого-педагогическая проблема // Молодой ученый. — 2015. — №3. — С. 824 — 827.
2. *Бабанский Ю.К.* Оптимизация процесса обучения (Общедидактический аспект). М., «Педагогика», 1977, — 256 с.

3. Олимпиады по графическим дисциплинам — этап формирования инженерного интеллекта / Н.С. Иванова [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — С. 72 — 81.
4. *Иванова Н.С.* Начертательная геометрия. Инженерная графика. Позиционные задачи на инцидентность геометрических элементов: учеб. пособие / Н.С. Иванова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 78 с.
5. Начертательная геометрия. Инженерная графика. Позиционные задачи. Ч.1: учеб. пособие / Л.Б. Иванова [и др.] — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 86 с.
6. *Красильникова Г.А.* Начертательная геометрия и инженерная графика. Краткий курс лекций по начертательной геометрии: учеб. пособие / Г.А. Красильникова, М.С. Кокорин, Н.С. Иванова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 88 с.
7. *Иванова Н.С.* Начертательная геометрия и инженерная графика. Тестовые задания для самоконтроля знаний по курсу "Начертательная геометрия" [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н.С. Иванова, М.С. Кокорин, Г.А. Красильникова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. — Электрон. текстовые дан. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-47.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
8. *Иванова Н.С.* Начертательная геометрия и инженерная графика. Контрольные задания по начертательной геометрии. Моделирование поверхностей [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н.С. Иванова, И.С. Смирнова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. — Электрон. текстовые дан. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-46.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
9. Начертательная геометрия. Инженерная графика [Электронный ресурс]: учеб. пособие: комплект вариантов заданий к курсовой работе "Пересечение поверхностей" / Н.С. Иванова [и др.] — Электрон. текстовые дан. — СПб., 2011. — URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2040.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
10. *Никитина Т.А.* Инженерная графика. Контрольно-измерительные материалы: учеб. пособие / Т.А. Никитина, И.С. Смирнова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. — 94 с.
11. Инженерная графика. Разработка конструкторской документации на сборочную единицу: методические указания / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; [сост. Л.Б. Иванова [и др.]. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 63 с.

12. Маркова Т.В. Инженерная графика: Обозначение шероховатости поверхностей на чертежах: учебное пособие / Т.В. Маркова, И.М. Крыжановская; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 45 с.
13. Маркова Т.В. Инженерная и компьютерная графика. Демонстрационные материалы [Электронный ресурс]. Ч.2. Изображения - виды, разрезы, сечения: учебное пособие / Т.В. Маркова, Н.А. Долгая, Н.В. Введенская; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. — Электрон. текстовые дан. — Санкт-Петербург, 2015. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/5373.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
14. Никитина Т.А. Инженерная и компьютерная графика. Демонстрационные материалы [Электронный ресурс]. Ч.3. Резьба: учебное пособие / Т.А. Никитина; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. — Электрон. текстовые дан. — Санкт-Петербург, 2015. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/5372.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
15. Разъемные соединения [Электронный ресурс]: комплект вариантов к курсовой работе: учебно-методические указания / И.В. Кожевина, И.С. Смирнова, Н.Ю. Видинеева, И.Б. Афанасьева; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра "Инженерная графика и дизайн". — Электрон. текстовые дан. — Санкт-Петербург, 2015. — URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/8810.pdf (дата обращения: 12.04.2016)
16. Инженерная и компьютерная графика. Компьютерные технологии разработки конструкторской документации: учеб. пособие / Т.В. Маркова [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 92 с.

N.S. Ivanova[1], G.A. Krasilnikova[1],
I.M. Kryzhanovskaya[1], I.S. Smirnova[1]

NETWORK TECHNOLOGY IN PEDAGOGIC THERAPY OF STUDENT'S OF GRAPHIC DISCIPLINES UNDERACHIEVEMENT

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article sets out methods of pedagogic therapy used at the «Engineering graphics and design» department of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic

University during work with students not making satisfactory progress in the course of «Descriptive geometry and engineering graphics».

Key words: descriptive geometry, engineering graphics, distant education.

REFERENCES

[1] E.A. Nikolaeva. Underachieving Students as a Psychological and Pedagogical Problem // Young scientist. - 2015 – No.3. - P. 824 -827.

[2] Y.K. Babansky. Educational Process Optimization (Common Didactic Aspect). M., "Pedagogy", 1977. – P. 256

[3] Competitions in Graphic Disciplines as the Stage of Engineering Intelligence Formation/ N.S. Ivanova [et al.] // Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference / Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2012. - P. 72 - 81.

[4] N.S. Ivanova. Descriptive Geometry. Engineering Graphics. Positional Problems on the Incidence of Geometric Elements: Textbook/ N.S. Ivanova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2009. – P.78

[5] Descriptive Geometry. Engineering Graphics. Positional Problems. Part 1: Textbook/ L.B. Ivanova [et al.] - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2013. – P. 86

[6] G.A. Krasilnikova. Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Short course of Lectures on Descriptive Geometry: Textbook / G.A. Krasilnikova, M.S. Kokorin, N.S. Ivanova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2016. – P. 88

[7] N.S. Ivanova. Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Tests for Self-Knowledge in Course "Descriptive Geometry" [Electronic resource]: Textbook / N.S. Ivanova, M.S. Kokorin, G.A. Krasilnikova; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. - St. Petersburg: Polytechnic. University Publishing House, 2016. - URL: http: //elib.SPbSPU.ru/dl/2/s16-47.pdf (reference date: 12.04.2016)

[8] N.S. Ivanova. Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Control Tasks on Descriptive Geometry. Surface Modeling [Electronic resource]: Textbook / N.S. Ivanova, I.S. Smirnova; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. - St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2016. - URL: http://elib.SPbSPU.ru/dl/2/s16-46.pdf (reference date: 12.04.2016)

[9] Descriptive Geometry. Engineering Graphics [Electronic resource]: Textbook: Set of Tasks for the course "Intersection of Surfaces"/ N.S. Ivanova [et al.] - Electron. text details. - SPb., 2011. - URL: http: //d1.unilib.neva.ru/dl/2040.pdf (reference date: 12.04.2016)

[10] T.A. Nikitina. Engineering Graphics. Control and Measuring Materials: Textbook/ T.A. Nikitina, I.S. Smirnova. - SPb .: Polytechnic. University Publishing House, 2016. – P. 94
[11] Engineering Graphics. Development of Design Documentation for Assembly Unit: Guidance / St. Petersburg State Polytechnic University; [Developed by L.B. Ivanov [et al.]. - St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2007. – P. 63
[12] T.V. Markova. Engineering Graphics: Designation of Surface Roughness on Technical Drawings: Textbook / T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya; St. Petersburg State Polytechnic University. - SPb .: Polytechnic. University Publishing House, 2007. – P. 45
[13] T.V. Markova. Engineering and Computer Graphics. Illustrative Material [Electronic resource]. Part 2. Images - types, crosscut, sections: Textbook / T.V. Markova, N.A. Dolgaya, N.V. Vvedenskaya; Saint Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. -St. Petersburg, 2015. - URL: http://elib.SPbSPU.ru/dl/2/5373.pdf (reference date: 04.12.2016)
[14] T.A. Nikitina. Engineering and Computer Graphics. Illustrative materials [Electronic resource]. Part 3. Carving: Textbook / T.A. Nikitina; Saint Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. - St. Petersburg, 2015. - URL: http: //elib.SPbSPU.ru/dl/2/5372.pdf (reference date: 04.12.2016)
[15] Plug connection [Electronic resource]: Set of Control Tasks for course: teaching and methodical guidelines / I.V. Kozhevina, I.S. Smirnova, N.Y. Vidineeva, I.B. Afanasyeva; Saint Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. - St. Petersburg, 2015. - URL: http://elib.SPbSPU.ru/d1/2/8810. pdf (reference date: 12.04.2016)
[16] Engineering and Computer Graphics. Computer Technology for Design Documentation Development: Textbook./ T.V. Markova [et al.]. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2013. – P. 92

УДК 621:514.181: 004.92; DOI 10.1872/MMF-2016-10

Г. А. Красильникова[1], Т. В. Маркова[2]

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО САМОКОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ГЕОМЕТРИИ ФОРМ И ПОЗИЦИОННЫХ ОТНОШЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ

[1]Красильникова Галина Анатольевна, к. т. н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: kras_gal@mail.ru

[2]Маркова Татьяна Владимировна, к. т. н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: t_markova@mail.ru

Аннотация

В докладе рассматривается использование технологии 3D-моделирования в учебном процессе на заключительном этапе изучения дисциплины «Инженерная и компьютерная графика». Демонстрируется взаимосвязь всех разделов этой дисциплины на примере выполнения задания «Чтение чертежа общего вида», требующего пространственного мышления и способностей к анализу и синтезу геометрических форм машиностроительных изделий.

Ключевые слова: инженерная и компьютерная графика, начертательная геометрия, твердотельное моделирование, КОМПАС-3D.

Постепенное сокращение в учебных планах подготовки специалистов и бакалавров в области машиностроения времени на изучение дисциплин инженерно-графического цикла, а также внедрение в учебный процесс новых компьютерных форм обучения, требующих дополнительных временных затрат на их освоение, привели к определенным изменениям учебных программ соответствующих дисциплин [1].

В частности, при выполнении ряда заданий по инженерной графике, пришлось отказаться от традиционного трудоемкого построения аксонометрических проекций отдельных деталей и сборок, которые способствовали развитию у студентов пространственного представления о формах деталей и их взаимосвязи в сборочных единицах. При внедрении компьютерных графических систем 3D-моделирования, как на машиностроительных предприятиях, так и в учебных заведениях аксонометрические проекции заменились 3D-моделями, которые используются не только для визуализации, но и непосредственно для изготовления деталей.

Однако, зачастую, студенты испытывают трудности при создании моделей по ортогональному чертежу и при работе с ассоциативными чертежами этих моделей, т. к. понимание формы деталей, нередко достаточно сложных, затруднительно без фундаментальных знаний геометрии форм и позиционных отношений, изучаемых в курсе начертательной геометрии.

Полезной практикой для повышения и самоконтроля знаний законов формообразования машиностроительных деталей, их взаимосвязи в сборке, является выполнение студентами задания «Чтение чертежа общего вида», по схеме «чертеж−модель−чертеж» на заключительном этапе изучения дисциплины «Инженерная и компьютерная графика». К этому времени студенты уже изучили теорию [2–9] и выполнили ряд графических и курсовых работ по разделам начертательной геометрии и инженерной графике [10,11],приобрели определенный навык в технике черчения, как традиционным способом, так и с использованием компьютерных технологий 2D-моделирования [12]. Однако данные итогового тестирования знаний студентов показывают, что прочтение форм деталей, их конструктивных элементов, понимание взаимодействия составных частей машиностроительного изделия — наиболее сложный этап формирования компетенций выпускника ООП при изучении дисциплины «Инженерная графика». Для достижения требуемых результатов обучения студентам предлагается, используя технологию 3D-моделирования, выполнить комплект конструкторской документации на машиностроительную сборочную единицу.

Исходными данными для работы являются чертеж общего вида сборочной единицы и перечень составных частей изделия (или сборочный чертеж и спецификация), например, из альбомов для деталирования П. Е. Аксарина и С. К. Боголюбова [13, 14]. Практикуются различные способы работы: индивидуальное выполнение и командное. Соответственно выбирается вариант задания: относительно простая сборка, содержащая в среднем 7-14 оригинальных деталей, или сложная, из 20-25 деталей сложной формы. Студенты, выполняющие совместный проект, учатся не только моделировать и читать чертеж, но и работать в команде, что является важным моментом профессиональной подготовки.

На рис. 1, 2 представлен один из вариантов задания. Используя чертеж как прототип, студенты создают взаимосвязанный комплект рабочей конструкторской документации: 3D-модели деталей, 3D-модель сборки и, если нужно, сборочных единиц, входящих в основную сборку, ассоциативные чертежи деталей, сборочные чертежи и спецификации. Среда проектирования — адаптированная к российским стандартам система автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-3D с прикладными библиотеками стандартных изделий и материалов.

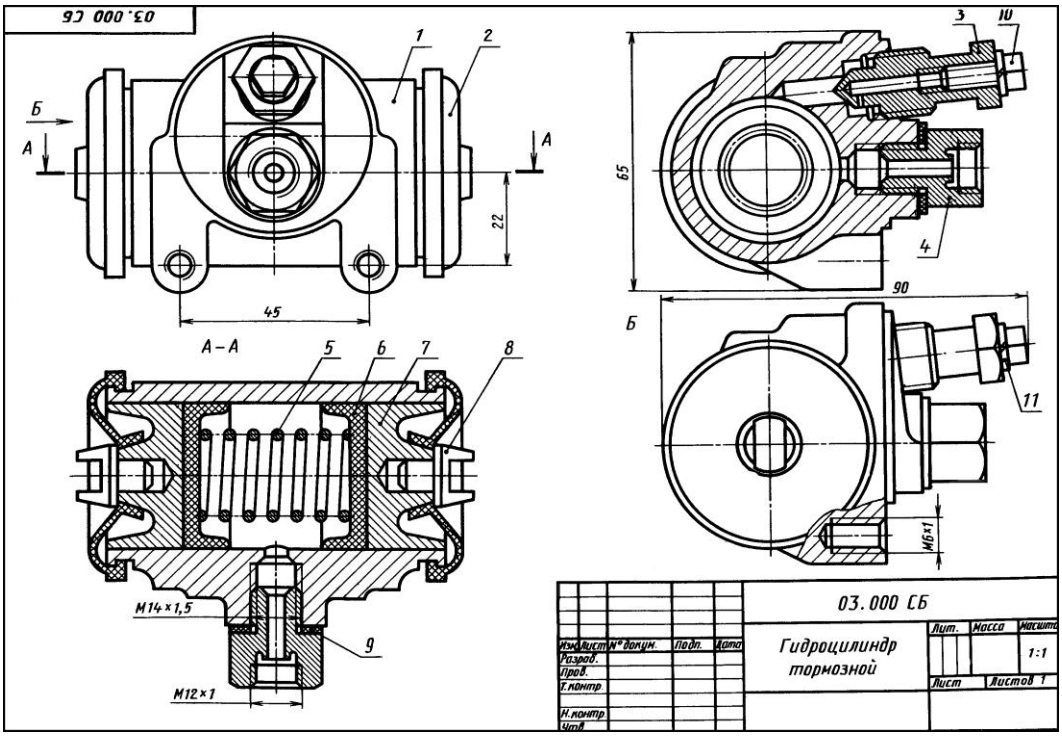


Рис. 1

Формат	Зона	Поз.	Обозначения	Наименование	Кол.	Примечание
				Документация		
А3			03.000 СБ	Сборочный чертеж		
А4			03.000 ТО	Техническое описание		
				Детали		
		1	03.001	Корпус	1	СЧ 18
		2	03.002	Колпак защитный	2	Резина
		3	03.003	Штуцер	1	Ст 3
		4	03.004	Штуцер	1	Ст 3
		5	03.005	Пружина	1	Сталь 65Г
		6	03.006	Манжета	2	Резина
		7	03.007	Поршень	2	АЛ 1
		8	03.008	Вилка	2	Ст 3
		9	03.009	Прокладка	1	Паронит
				Стандартные изделия		
		10		Винт М6х15 ГОСТ 7798-70	1	
		11		Шайба 6 65Г ГОСТ 6402-70	1	

Рис. 2

Выполнение задания требует от студентов демонстрации всех знаний и навыков, полученных в ходе изучения курса инженерной графики и начертательной геометрии. Форма деталей определяется по проекциям на основные и дополнительные плоскости (основным и дополнительным видам), а также разрезам и сечениям, расположенным и оформленным в соответствии со стандартами. Отметим, что на этапе анализа геометрии форм деталей выявляется практическая важность знания основ проекционного моделирования: знания способов задания прямых, плоскостей и поверхностей на комплексном чертеже, умения выделять проецирующие плоскости и поверхности, понимания взаимосвязи ортогональных проекций на основных и дополнительных плоскостях, знания характера линий пересечения поверхностей и способов построения их проекций на чертеже. Встречаются конструкции, где линии пересечения поверхностей дают преимущественную возможность определения формы детали [15].

Процесс моделирования в 3D тесно связан с теоретическими основами формообразования [16]. Операции выдавливания, вращения, кинематическая, по сечениям — наглядная демонстрация изучаемых в курсе начертательной геометрии кинематических способов образования поверхностей, ограничивающих детали. Создать модель самым простым способом, с самым коротким «деревом» — цель, достижимая при условии грамотного использования всех функциональных возможностей системы автоматизированного проектирования и выбора оптимальной стратегии формирования детали, что невозможно без знания теории формообразования.

Правильно организованная работа подразумевает постоянный самоконтроль. Работая одновременно над отдельными деталями, сборкой, чертежами деталей и сборочным чертежом, студенты контролируют правильность формы и размеров деталей, собираемость конструкции. Не исключена возможность конструктивных изменений в изделии, если в процессе моделирования выявляются нетехнологичные элементы для изготовления или сборки.

Выбор крепежных и уплотнительных изделий, конструктивных элементов для них — полезный опыт работы с библиотеками программы, стандартами и другой справочной литературой [17-19]. Студенты на практике видят, например, какие параметры резьбы являются основными и как нужно их задать, чтобы спроектировать резьбовое соединение; от какого параметра зависят размеры проточки и фаски; как выбрать шаг резьбы; как выбрать отверстие для шпильки, болта, винта; что определяет размер канавок для уплотнительных колец и т. п. Знакомство с многообразием существующих стандартных изделий самого разного назначения является хорошей пропедевтикой дальнейших этапов обучения.

Выполняемый проект — с элементами конструирования и, несомненно, требует от учащихся творческого подхода. Хочется обратить

внимание на главную цель работы: это не изучение возможностей системы 3D-моделирования, это закрепление и практическое применение всего комплекса знаний геометро-графического курса, это работа, моделирующая современный производственный процесс разработки конструкторской документации, позволяющая получить первый опыт самостоятельной работы по специальности. Происходит знакомство с профессией, и это, как показывает практика, является дополнительным стимулом для развития активности, ответственности и заинтересованности студентов. Достаточно большая трудоемкость задания компенсируется полученным удовольствием от процесса моделирования, удовлетворением видимыми результатами своего труда.

Опыт проведения занятий показывает, что успешно с заданием справляются студенты с хорошими базовыми знаниями начертательной геометрии и инженерной графики, а также приобретенными навыками выполнения машиностроительных чертежей средствами 2D-моделирования, полученными на начальном этапе обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы комплексного обучения студентов инженерной и компьютерной графике / Н. С. Иванова [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 90 - 99.
2. Красильникова Г. А. Начертательная геометрия и инженерная графика. Краткий курс лекций по начертательной геометрии : учеб.пособие / Г. А. Красильникова, М. С. Кокорин, Н. С. Иванова. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2016. – 88 с.
3. Начертательная геометрия и инженерная графика. Позиционныезадачи. Ч.1.: учеб.пособие / Л. Б. Иванова [и др.]. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. – 86 с.
4. Иванов Г. С. Начертательная геометрия: учеб. / Г. С. Иванов – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. – 338 с.
5. Инженерная графика. Основы оформления конструкторской документации: учеб.пособие / Иванова Л. Б. [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 140 с.
6. Использование технологий 3D-моделирования для изучения пространственных форм в курсе "Начертательная геометрия" / Н. С. Иванова [и др.] // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: Материалы XVI Междунар. науч.-метод. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 314 - 315.
7. Маркова Т. В., Крыжановская И. М.Инженерная графика. Обозначение шероховатости поверхностей на чертежах: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 45 с.

8. Чекмарев А. А.Инженерная графика. Машиностроительное черчение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов высшего образования в машиностроении Москва : ИНФРА – М , 2011. – 394с. – ил.
9. Левицкий В. С.«Машиностроительное черчение и автоматизация выполнения чертежей. Учебник для бакалавров. Гриф МО»–М.: Юрайт, 2016. – 436 с.
10. Иванова Л. Б., Маркова Т. В.,Крыжановская И. М. Инженерная графика. Разработка конструкторской документации на сборочную единицу: метод.указания. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 63 с.
11. Инженерная графика. Разъемные соединения: учеб. пособие / Ю. Я. Андрейченко [и др.]. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 90 с.
12. Инженерная и компьютерная графика. Компьютерные технологии разработки конструкторской документации: учеб.пособие / Т.В. Маркова [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 92 с.
13. Боголюбов С. К. Чтение и деталирование сборочных чертежей. Альбом: учебн. пособие для учащихся машиностроительных техникумов. – М.: Машиностроение, 1986. – 84 с., ил.
14. Аксарин П. Е. Чертежи для деталирования: учеб. Пособие для студентов высших учебных заведений.– 2-изд., доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 160с., ил.
15. Олимпиады по графическим дисциплинам — этап формирования инженерного интеллекта / Н. С. Иванова [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 72-81.
16. Самсонов В. В., Красильникова Г. А.Автоматизация конструкторских работ в среде Компас - 3D: учеб.пособие. – М.: Изд-во «Академия», 2009. – 224 с.
17. Единая система конструкторской документации. Общие правила выполнения чертежей: сборник. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 384 с.
18. Попова Г. Н., Алексеев С. Ю.Машиностроительное черчение: справочник. – Санкт-Петербург Политехника, 2013. – 484с.
19. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х томах, В. И. Анурьев, Издание 9-е, переработанное и дополненное, под ред. И. Н. Жестковой. – Т.1–3. –М.: Машиностроение, 2006. – 2816 с.

G. A. Krasilnikova[1], T. V. Markova[1]

KNOWLEDGE OF THE SHAPE GEOMETRY AND COMPONENTS POSITIONING RATIO IN AN ENGINEERED PRODUCT WITHIN 3D SELF-TESTING MODELING TOOLS

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The report examines an utilization of 3D modeling technology in the education process in the final stage of the discipline “engineering and computer graphics”. A correlation among sections is demonstrated by completing a task called “general view drawing examination”, that requires spatial thinking and the ability to synthesize and analyze geometric forms of engineering products.

*Key word*s: engineering and computer graphics, descriptive geometry, solid modeling, KOMPAS-3D.

REFERENCES

[1] Problems of Comprehensive Teaching Students Engineering and Computer Graphics / N.S. Ivanova [et al.] // Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the International Scientific and Practical Conference. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2013. - P. 90 - 99.

[2] G.A. Krasilnikova. Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Short Course of Lectures on Descriptive Geometry: Textbook / G.A. Krasilnikova, M.S. Kokorin, N.S. Ivanova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2016. – P. 88

[3] Descriptive Geometry and Engineering Graphics. Positional Tasks. Part 1: Textbook / L.B. Ivanova [et al.]. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2013. – P. 86

[4] G.S. Ivanov. Descriptive Geometry: Textbook / G.S. Ivanov-M .: SEI HPE Moscow State Forest University, 2008. – P. 338

[5] Engineering Graphics. Fundamentals of Engineering Documentation Design -: Textbook / L.B. Ivanova [et al.]. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2008. – P. 140

[6] Using 3D Modeling Technologies for the Study of Dimensional Configuration in the course "Descriptive Geometry" / N.S. Ivanova [et al.] // High Intelligent Technology and Innovation in Education and Science: Materials of 16 International Scientific and Practical Conference. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2009. - P. 314 - 315.

[7] T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya. Engineering Graphics. Designation of Surface Roughness on Technical Drawings: Textbook / T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya; St. Petersburg State Polytechnic University. - SPb .: Polytechnic. University Publishing House, 2007. – P. 45

[8] A.A. Chekmarev. Engineering Graphics. Mechanical Drawing: Textbook for University Students Studying in the Field of Mechanical Engineering, Moscow: INFRA - M, 2011.- P. 394

[9] V.S. Levitsky Engineering Drawing and Automated Drawing. Textbook for undergraduate. Grif MO "-M .: Urait, 2016. – P. 436

[10] L.B. Ivanova, T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya. Engineering Graphics. Development of Design Documentation for Assembly Unit: Guidance. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2007. – P.63

[11] Engineering Graphics. Plug connections: Textbook / Y.Y. Andreychenko [et al.]. - SPb .: SPbSPU Publishing House, 2001. – P. 90
[12] Engineering and Computer Graphics. Computer Technology for Design Documentation Development: Textbook / T.V. Markova [et al.]. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2013. –P. 92
[13] S.K. Bogolyubov Reading and Detailing of Assembly Drawings. Album: Textbook for Students of the Mechanical Engineering Schools. - M .: Mechanical Engineering, 1986. – P. 84, illustration
[14] P.E. Aksarin. Detailed Drawing: Textbook for University Students.- 2 edition., Ext. - M .: Mechanical Engineering, 1993. –P. 160, illustration.
[15] Competitions in Graphic Disciplines as the Stage of Engineering Intelligence Formation/ N.S. Ivanova [et al.] // Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference / Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2012. - P. 72 - 81.
[16] V.V. Samsonov, G.A. Krasilnikova. Automation of Construction Work in Compass - 3D Environment: Textbook. - M .: Academy Publishing House, 2009. –P. 224
[17] Unified System for Design Documentation. General rules of Drawing: Collection. - M .: Publishing House of Standards, 2001. – P.384
[18] G.N. Popova, S.Y. Alekseev. Mechanical Engineering Drawing: Handbook. - St. Petersburg Politécnica, 2013. – P. 484
[19] Handbook Constructional Engineer. In the 3 volumes, V.I. Anura, 9th edition, revised and extended, Ed. I.N. Zhestkova. – Vol.1-3. -M .: Mechanical Engineering, 2006. –P. 2816.

УДК 769.91:744:378.147.335; DOI 10.1872/MMF-2016-11

Т. В. Маркова[1], Т. А. Никитина[2], Н. А. Долгая [3]

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ УЧЕБНЫХ ПЛАКАТОВ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ

[1]Маркова Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: t_markova@mail.ru

[2]Никитина Татьяна Александровна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: nik_tatiana@mail.ru

[3]Долгая Нина Александровна, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7514, E-mail: nina_2000@rambler.ru

Аннотация

Рассматриваются особенности разработки учебных плакатов по инженерной графике как средства активизации и оптимизации учебного процесса. Приводится два подхода к созданию и использованию плакатов. Описаны композиционные принципы построения и графическое оформление.

Ключевые слова: графическая информация, учебный плакат, инженерная графика

Сокращение времени, отводимого на изучение графических дисциплин, определяет необходимость использования различных методик и способов подачи материала, позволяющих учащимся освоить предмет без содержательных потерь. Наряду с быстро развивающимися новыми информационными технологиями, а также такими традиционными средствами обучения, как учебники и методические указания, электронные презентации, и наглядные пособия, серьезного внимания заслуживают плакаты, являющиеся отличным средством оптимизации и активизации учебного процесса.

«Инженерная графика» — дисциплина, где практически вся методическая информация существует в графическом виде [1, 2, 12, 17]. В реальной инженерной практике, например, в машиностроении — 92 % процесса конструирования основано также на графике, остальные 8 % разделены между математикой, письменной и устной речью [19]. Язык графики, являющийся основным языком изложения мыслей для инженеров и других технических специалистов, как один из самых наглядных и универсальных для человека способов передачи информации, используется и в плакате.

Плакат — это крупноформатное наглядное изображение, сопровождаемое кратким текстом, которое может быть использовано в агитационных, информационных, рекламных или учебных целях [3].

Учебный плакат, напечатанный на бумаге или электронный, обладает ярко выраженными иллюстративными возможностями. Его применение при объяснении нового материала оживляет учебный процесс, целенаправленно и без потери целостности, фиксирует внимание учащихся на деталях рассматриваемого объекта, одновременно снимая избыточное напряжение.

В то же время, учебно-технический плакат — это конструкторский документ, который может представлять в упрощенной и обобщенной форме, с необходимым иллюстративным материалом, сведения о конструкции, принципах действия, приемах использования, техническом обслуживании и других технических данных изделия [3].

Согласно ГОСТ 2.605-68 [3] учебно-технический плакат должен содержать краткий заголовок, пояснительный текст (при необходимости) и изобразительную часть. Изображения на плакатах должны выполняться в аксонометрических проекциях в соответствии с требованиями ГОСТ 2.317-69 или в перспективе. Отдельные несложные изображения допускается выполнять по методу прямоугольного проецирования. Количество цветов на плакате не должно превышать шести, включая черный. Других, четких требований по цветовому оформлению, а также требований к содержанию плаката и компоновке его элементов ГОСТ 2605-68 не содержит. Таким образом, художественно-графические приемы оформления, относящиеся к области творческих вопросов, стандартом не регламентируются. В целом, плакат должен представлять собой законченную единицу графическо-текстовой информации, которая позволила бы раскрыть для учащегося суть раздела, главы или темы по изучаемой дисциплине.

В настоящее время на кафедре «Инженерная графика и дизайн» (ИГД) Санкт-Петербургского политехнического университета ведется разработка комплекта плакатов по инженерной графике [8, 9]. По мнению авторов, представление части разделов и тем этой дисциплины в виде учебных плакатов способствует повышению эффективности обучения: позволяет лучше структурировать материал; повысить наглядность его изложения;

определить содержание разделов курса, подлежащее контролю; сократить время выполнения графических работ; выделить отдельные темы для самостоятельного изучения студентами и, как следствие, на занятиях больше внимания уделить вопросам, требующим разъяснений преподавателя.

Необходимость создания нового собственного комплекта плакатов была выявлена после детального изучения возможностей использования существующего методического материала фонда кафедры и предложений коммерческих фирм, реализующих учебные пособия по различным дисциплинам высшей школы. Анализ показал, что рассматриваемые материалы либо устарели в связи с изменениями многих базовых стандартов ЕСКД, либо не охватывают содержательную часть курса, изучаемого в Политехническом университете.

В работе принимают участие педагоги-практики с многолетним стажем преподавания. Задействованы материалы выпущенных на кафедре учебных пособий, заданий и тестов [4-7, 10, 13], а также плакаты С. К. Боголюбова издательства «Машиностроение» [2], значительно переработанные и дополненные.

Запланированный комплект содержит порядка сорока плакатов, основная часть работы выполнена. Разрабатываемые с учетом особенностей учебного процесса, принятого на кафедре ИГД, плакаты охватывают следующие разделы:

- стандарты ЕСКД и оформление чертежа;
- изображения на чертеже;
- выполнение эскизов деталей машин;
- резьба и ее обозначение на чертежах;
- крепежные изделия и разъемные соединения;
- неразъемные соединения;
- сборочный чертеж и спецификация;
- рабочий чертеж детали;
- обозначение шероховатости поверхностей;
- методы решения задач начертательной геометрии.

При создании плакатов использовались два подхода:

1. Плакат как иллюстрация некоторых положений дисциплины. В этом случае он содержит минимальное количество текста и состоит преимущественно из фрагментов чертежей и пояснительных иллюстраций (рис. 1).

2. Плакат, построенный по принципу опорного конспекта, большое внимание в котором уделено не только чертежам, но и текстовой информации справочного характера в виде разъяснений и таблиц с выдержками из нормативной документации (рис. 2).

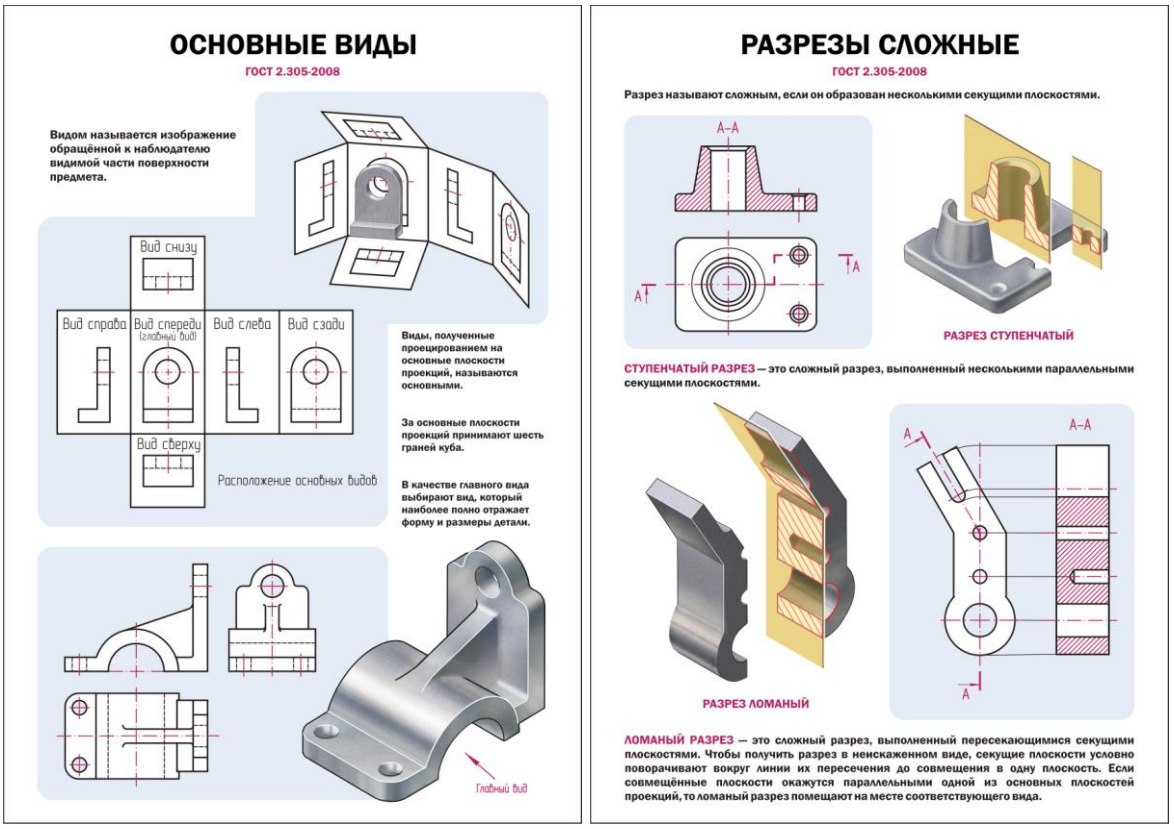

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ
ГОСТ 2.305-2008
Видом называется изображение обращённой к наблюдателю видимой части поверхности предмета.
Вид снизу
Вид справа
Вид спереди (главный вид)
Вид слева
Вид сзади
Вид сверху
Расположение основных видов
Виды, полученные проецированием на основные плоскости проекций, называются основными.
За основные плоскости проекций принимают шесть граней куба.
В качестве главного вида выбирают вид, который наиболее полно отражает форму и размеры детали.
Главный вид
РАЗРЕЗЫ СЛОЖНЫЕ
ГОСТ 2.305-2008
Разрез называют сложным, если он образован несколькими секущими плоскостями.
А–А
РАЗРЕЗ СТУПЕНЧАТЫЙ
СТУПЕНЧАТЫЙ РАЗРЕЗ — это сложный разрез, выполненный несколькими параллельными секущими плоскостями.
РАЗРЕЗ ЛОМАНЫЙ
ЛОМАНЫЙ РАЗРЕЗ — это сложный разрез, выполненный пересекающимися секущими плоскостями. Чтобы получить разрез в неискаженном виде, секущие плоскости условно поворачивают вокруг линии их пересечения до совмещения в одну плоскость. Если совмещённые плоскости окажутся параллельными одной из основных плоскостей проекций, то ломаный разрез помещают на месте соответствующего вида.

Рис. 1

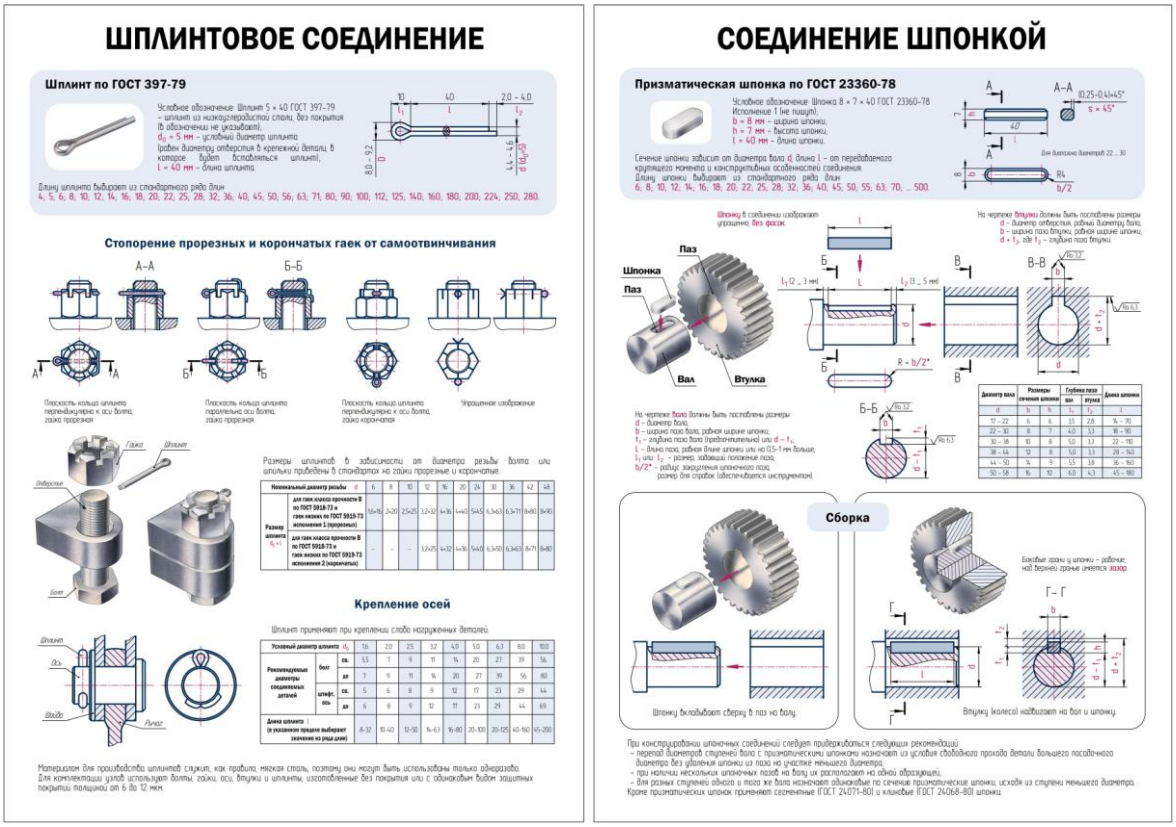

ШПЛИНТОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ
Шплинт по ГОСТ 397-79
Стопорение прорезных и корончатых гаек от самоотвинчивания
Крепление осей
СОЕДИНЕНИЕ ШПОНКОЙ
Призматическая шпонка по ГОСТ 23360-78
Паз
Шпонка
Вал
Втулка
Сборка

Рис. 2

Реализованные подходы определяют и способы использования плакатов в учебном процессе. Это и формирование визуального образа для облегчения восприятия нового теоретического материала, и обеспечение легкого доступа к необходимой для выполнения практических работ информации.

Графическое оформление всех плакатов выполнено с учетом объективных ограничений и особенностей восприятия зрительной информации человеком. Так, например, в заголовках, для легкости запоминания, использовано не более шести слов, высота букв — 20 мм, что является оптимальным при рассматривании на расстоянии в пределах двух метров [16]. При этом площадь заголовка составляет 10-15% от размера плаката, как принято в продукции информационного и рекламного характера [18]. Шрифт заголовков и поясняющего текста — рубленный, сочетающий в себе простоту графики с максимальной четкостью. Иллюстрации — художественно реализованные изображения деталей и соединений, выполненные с помощью графических редакторов Adobe Photoshop, CorelDRAW и системы автоматизированного твердотельного моделирования КОМПАС-3D.

В цветовом решении плакатов учтено психологическое и физиологическое воздействие цвета на зрителя. Для привлечения и концентрации внимания, а также для создания единого стиля оформления используются оттенки синего цвета, которые хорошо различаются периферийным зрением. Например, фон голубого цвета — для выделения текста в таблицах, а также отдельных иллюстраций и фрагментов чертежей; темно-голубой цвет — в изображениях и чертежах. При изложении основного материала применяется сочетание синего с белым — традиционная гамма в материалах информационного характера (доски объявлений, указания по технике безопасности, предписывающие знаки). Для акцентирования внимания выбран оттенок красного (малинового) цвета [15, 16].

Композиционно в плакатах осуществлен принцип формального равновесия (абсолютная симметрия), а также неформального равновесия, достигаемого путем размещения элементов различных форм, размеров и цветовой интенсивности на разном расстоянии от оптического центра [3, 11, 14]. Учитывались и другие принципы формирования композиции [18]:

– перемещение (применение цветного фона для выделения текста или иллюстрации);

– контрастность (использование контрастных цветов);

– выделение пробелами (пустое пространство между текстом и иллюстрацией).

Таким образом, при работе над плакатами поднимались вопросы использования самых различных композиционных, цветографических и других художественных приёмов и принципов. Поэтому помимо участия

преподавателей технических дисциплин были привлечены специалисты в области дизайна, в том числе и дизайнеры – выпускники кафедры.

Разработанный комплект плакатов по инженерной графике активно применяется в учебном процессе на практических занятиях при объяснении необходимых для решения задач и выполнения графических работ теоретических вопросов, при создании электронных презентаций по дисциплине, при проведении консультаций и организации самостоятельной работы учащихся.

Опыт использования учебных плакатов в процессе инженерно-графической подготовки студентов кафедры ИГД позволяет отметить видимый рост активности учебно-познавательной деятельности учащихся. Наблюдения показали, что студенты в процессе работы предпочитают чаще обращаться к плакату, чем к текстовому учебному пособию или собственному конспекту.

Таким образом, хотя работа не закончена, и разработанные в настоящее время учебные плакаты пока не охватывают всё содержание дисциплины «Инженерная графика», они уже доказали свою востребованность, наглядность и эффективность использования. Внедрение плакатов в учебный процесс облегчило работу преподавателей, инициировало тенденцию к повышению уровня усвоения материала, облегчило его адаптацию, сделало подачу информации более интересной и запоминающейся для большинства студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов С.К. Инженерная графика: Учебник для средних специальных учебных заведений. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 392 с.
2. Боголюбов С.К. Плакаты по черчению – М.: Машиностроение, 1984. –23 плаката.
3. Единая система конструкторской документации. Плакаты учебно-технические. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2008. – 6 с.
4. Иванова Л. Б., Маркова Т. В., Крыжановская И. М. Инженерная графика. Разработка конструкторской документации на сборочную единицу: метод. указания. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 63 с.
5. Инженерная графика. Основы оформления конструкторской документации: учеб. пособие / Иванова Л.Б. [и др.], – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 140 с.
6. Инженерная графика. Разъемные соединения: учеб. пособие / Ю.Я. Андрейченко [и др.], – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 90 с.
7. Инженерная графика. Тестовые задания к разделу разъемные соединения [Электронный ресурс]: методическое пособие / В.В. Самсонов,

Т.А. Никитина; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2,44 Мб). – Санкт-Петербург, 2014.
8. Инженерная и компьютерная графика. Демонстрационные материалы [Электронный ресурс]: учебное пособие. Ч. 2. Изображения – виды, разрезы, сечения / Т.В. Маркова, Н.А. Долгая, Н.В. Введенская; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2,14 Мб). – Санкт-Петербург, 2015.
9. Инженерная и компьютерная графика. Демонстрационные материалы [Электронный ресурс]: учебное пособие. Ч. 3. Резьба / Т.А. Никитина; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна . – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 1,14 Мб) . – Санкт-Петербург, 2015.
10. Кожевина И.В., Димент Л.И., Князева Е.В. Инженерная графика. Простановка размеров на чертежах деталей машин: учебное пособие / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007 – 34 с.
11. Кудин П.А., Ломов Б.Ф., Митькин А.А. Психология восприятия и искусство плаката. – Москва, «Плакат», 1987. – 208 с.
12. Левицкий В. С. Машиностроительное черчение и автоматизация выполнения чертежей. Учебник для бакалавров. Гриф МО – М.: Юрайт, 2016. – 436 с.
13. Маркова Т.В., Крыжановская И.М., Инженерная графика. Обозначение шероховатости поверхностей на чертежах: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 45 с.
14. Методические рекомендации по применению плакатов по охране труда на предприятиях. - М.: ВЦНИИОТ ВЦСПС, 1980.
15. Никитина Т.А. Исторический опыт и актуальные аспекты в обучении цвету студентов дизайнеров // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 103 – 107
16. Никитина Т.А. Цветоведение и колористика. Цвет в промышленном дизайне : учеб. пособие / Т.А. Никитина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 144 с.
17. Чекмарев А.А. Инженерная графика (машиностроительное черчение): учебник для студентов вузов обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов высш. образования в машиностроении. – Москва. ИНФРА-М, 2012. – 396 с.
18. Яцюк О.Г., Романычева Э.Т. Компьютерные технологии в дизайне. Эффективная реклама. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 432 с.

19. Bertoline G., Wiebe E., Hartman N., Ross W. Technical Graphics Communication. - 4th Edition. - McGraw-Hill, 2009. - 1184 p. Hill, 2009. - 1184 p.

T. V. Markova[1], T. A. Nikitina[1], N. A. Dolgaia[1]

AN EXPERIENCE OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF ENGINEERING GRAPHICS EDUCATIONAL PLACARDS

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the exploring of engineering graphics educational placards features like a tool for activation and optimization of the learning curve. Two approaches to the placards creation and usage are being explained in the article. There is a description of composition principles and graphical design.

Key words: graphical communication, educational placard, engineering graphics

REFERENCES

[1] S.K. Bogolyubov. Engineering Graphics: Textbook for Vocational Schools. - 3rd ed. edited and ext. - M .: Mechanical Engineering, 2009. – P. 392

[2] S.K. Bogolyubov Posters for Drawing - M .: Mechanical Engineering, 1984. -23 posters.

[3] Unified system for Design Documentation. Educational and Technical Posters. General Technical Requirements. - M .: Standartinform, 2008. P. 6.

[4] L.B. Ivanova, T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya. Engineering Graphics. Development of Design Documentation for Assembly Unit: Guidance. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2007. – P. 63.

[5] Engineering Graphics. Fundamentals of Engineering Documentation Design -: Textbook / L.B. Ivanova [et al.]. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2008. – P. 140.

[6] Engineering Graphics. Plug connections: Textbook / Y.Y. Andreychenko [et al.]. - SPb .: SPbSPU Publishing House, 2001. – P. 90

[7] Engineering graphics. Test Tasks to Plug-in Connections Section [Electronic resource]: Handbook / V.V. Samsonov, T.A. Nikitina; St. Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. (1 file: 2.44Mb) - St. Petersburg, 2014.

[8] Engineering and Computer Graphics. Illustrative Material [Electronic resource]. Part 2. Images - types, crosscut, sections: Textbook / T.V. Markova, N.A. Dolgaya, N.V. Vvedenskaya; Saint Petersburg State

Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details (1 file: 2.14 Mb) -St. Petersburg, 2015.
[9] Engineering and Computer Graphics. Illustrative materials [Electronic resource]. Part 3. Carving: Textbook / T.A. Nikitina; Saint Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. - Electron. text details. (1 file: 1.14 Mb) - St. Petersburg, 2015.
[10] E.V. Kozhevina, L.I. Diment, E.V. Knyazeva. Engineering graphics. Dimensioning on Drawings of Machine Parts: Textbook / St. Petersburg State Polytechnic University. - St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2007-P. 34
[11] P.A. Kudin, B.F. Lomov, A.A. Mitkin. Psychology of Perception and Poster Art. - Moscow, "Poster", 1987. – P. 208
[12] V.S. Levitsky Engineering Drawing and Automated Drawing. Textbook for undergraduate. Grif MO "-M .: Urait, 2016. – P. 436.
[13] T.V. Markova, I.M. Kryzhanovskaya. Engineering Graphics: Designation of Surface Roughness on Technical Drawings: Textbook. - SPb .: Polytechnic. University Publishing House, 2007. – P. 45
[14] Guidelines on Use of Posters on Occupational Safety. - M .: Union Central Research Institute for Occupational Safety, 1980.
[15] T.A. Nikitina. Historical Experience and Actual Aspects in Training to Colour of Students of Designers// Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference / Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2012. - P. 103-107.
[16] T.A. Nikitina Chromatics and Colouristics. Colour in Industrial Design: Textbook./ T.A. Nikitina. - SPb .: Polytechnic University Publishing House, 2008. – P. 144
[17] A.A. Chekmarev. Engineering Graphics (Mechanical Drawing): Textbook for University Students Studying in the Field of Mechanical Engineering, Moscow: INFRA - M, 2012.- P. 396
[18] O.G. Yatsyuk, E.T. Romanycheva. Computer Technology in Design. Effective Advertising. - SPb .: BHV-Petersburg, 2001. – P. 432
[19] Bertoline G., Wiebe E., Hartman N., Ross W. Technical Graphics Communication. - 4th Edition. - McGraw-Hill, 2009. - 1184 p. Hill, 2009. - 1184 p.

УДК 37.02; DOI 10.1872/MMF-2016-12

Н. И. Наумкин[1], В. Ф. Купряшкин[2], Г. А. Кондратьева[3], Д. В. Пивкин[4]

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ДИСЦИПЛИНЫ УЧЕБНОГО МОДУЛЯ

[1]Николай Иванович Наумкин, д.п.н., к.т.н., доцент
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: naumn@yandex.ru

[2]Купряшкин Владимир Фёдорович, к.т.н., доцент
Мордовский государственнй университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: nuyanzin@yandex.ru

[3]Кондратьева Галина Александровна, аспирант
Мордовский государственнй университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: mapp-electric@mail.ru

[4]Пивкин Дмитрий Владимирович, аспирант
Мордовский государственнй университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: akvilon-nizi@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается структура встраиваемого гибкого учебного модуля для подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности, который интегрируется в существующую модульную структуру общепрофессиональных и профессиональных дисциплин.

Ключевые слова: профессиональное образование, компетентность, общетехнические дисциплины, учебный модуль, аддитивные технологии, быстрое прототипирование, тиражирование.

Инновационный путь развития экономики станы предъявляет новые требования к системе высшего профессионального образования. Именно с этим связаны ориентация на деятельностно-компетентностный подход и

переход на стандарты нового поколения (3+ и 4) в которых акцент делается на формировании ключевых компетенций инженеров, обеспечивающих мобильность личности в быстро меняющемся мире и профессиональный успех в инновационной экономике. В реальном секторе экономики именно инженерные направления подготовки непосредственно связаны с инновационной инженерной деятельностью (ИИД), и поэтому отработку механизмов взаимодействия науки и бизнес – сектора, а также подходов к коммерциализации результатов исследований и разработок логично начинать в сфере подготовки инженерных кадров [8]. На сегодняшний день только в отдельных вузах страны осуществляется целенаправленная подготовка студентов к ИИД. Существующие методики инновационной подготовки не обеспечивают формирование мотивации у студентов к ИД и не в состоянии сформировать у них компетентности по получению материального инновационного продукта. В связи с этим, проблема подготовки специалистов в области техники и технологий к инновационной деятельности является актуальной. В предлагаемой статье рассматриваются новые подходы к проектированию педагогической технологии обучения студентов такой деятельности на основе включения в дисциплины встраиваемого гибкого учебного модуля инновационной подготовки (ВГУМИП).

Существенный вклад в исследование подготовки студентов к ИИД в разное время внесли: Е. П. Грошева, Г. В. Глотова, И. Г. Дежина, В. М. Жураковский, Н. И. Наумкин, Ю. П. Похолков Н. Н. Шекшаева [3], и др. В частности, в ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарёва» существует центр по разработке новых методов и подходов к обучению студентов технических вузов ИИД, в рамках которого были разработаны и реализованы: 1) методическая система подготовки студентов к ИИД на основе интеграции всех компонентов инженерной подготовки студентов; 2) методическая система подготовки студентов к ИИД при обучении дисциплине «Основы инженерного творчества и патенто – ведения»; 3) методическая система подготовки студентов к ИИД на основе интеграции теоретического обучения дисциплине «Основы инновационной и инженерной деятельности» и практического обучения этой деятельности; 4) методика практического обучения инновационной инженерной деятельности в рамках летних научных студенческих школ; 5) педагогическая технология, представленная в виде образовательной услуги «Подготовка к инновационной инженерной деятельности на основе проектирования специальных курсов», стала лауреатом Всероссийского конкурса «Лучшие товары России» (2011, 2013) и др.[9]

В работах Е. П. Грошевой и Н. Н. Шекшаевой [7] было показано, что компетентность в инновационной инженерной деятельности (КИИД) достаточно успешно формируется при обучении базовой дисциплине «Основы инновационной инженерной деятельности» (ОИИД), которая

является интегрированной дисциплиной и ее наиболее оптимальным структурированием является рейтинго–модульное гибкое и управляемое проектирование. Весь учебный материал в ней разбивается на модули 1-го и 2-го видов. Под которыми понимается «... часть программного материала дисциплины, реализующая интегрирующую дидактическую цель» [2]. С учетом будущей профессиональной деятельности модулем будет определенный объем учебной информации, необходимой для выполнения конкретной профессиональной деятельности на заданном уровне обучения. Содержание и структура модуля определяются дисциплиной, ступенью образования, степенью подготовки студентов, личным профессиональным опытом преподавателя [4].

В основу формирования модулей 1-го вида были положены такие принципы отбора и выбора учебного материала, как [1]: генерализация учебного материала; научно обоснованная систематизация физических и технических явлений; структурирование учебного материала на основе системного подхода; гибкость непрерывность, оперативность и динамичность системы контроля знаний; принцип осознанности необходимости формирования КИИД. В свою очередь модули 1-го вида делятся на модули 2-го вида (12 модулей), взаимодополняющих друг друга и призванных сформировать у студентов КИИД. Такая блочно – модульная система обучения студентов представляет собой совокупность педагогических условий, определяющих подбор и компоновку на модульно – блочной основе содержания, форм, методов и средств обучения, обеспечивающих комфортные субъект – субъективные отношения педагога и студентов в процессе достижения эффективного результата в усвоении научных знаний и формировании КИИД [5].

Однако часто при проектировании основных профессиональных образовательных программ (ОПОП) на основе актуализированных образовательных стандартов высшего профессионального образования в технических университетах не представляется возможным для целенаправленной подготовки студентов к ИИД включать такие дисциплины, как ОИИД. Не смотря на то, что управлять выпускники вузов ИИД в условиях инновационных высокотехнологичных производств обязаны. Оптимальным вариантом в таком случае является интегрирование в существующую модульную структуру общепрофессиональных и профессиональных дисциплин ВГУМИП, общая структура которого показана рис. 1.

ВГУМИП состоит из инвариантной части (ядра) и вариативной. Инвариантная часть практической деятельности ИИД включает содержание таких разделов, как: 3-D моделирование, быстрое прототипирование, тиражирование, а вариативная – дисциплинарно-ориентированное содержание основной дисциплины, в которую интегрируется модуль.

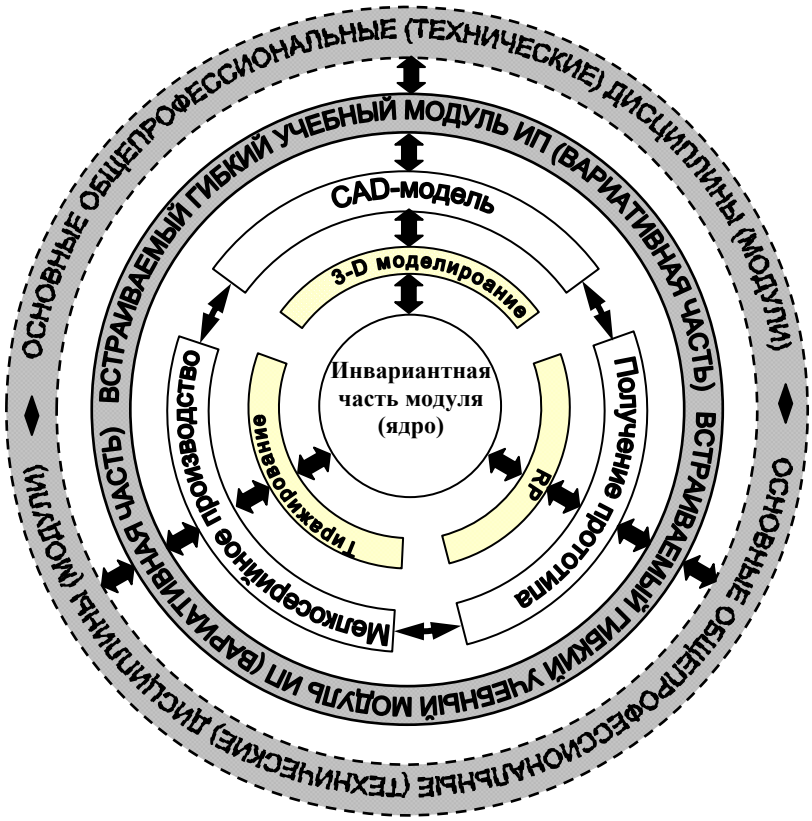


Рисунок 1 – Структура встраиваемого гибкого модуля инновационной подготовки

Рассмотрим содержание такого модуля. Обучение на основе интеграции ВГУМИП с основными дисциплинами основано на погружении студентов в инновационную среду. При его изучении рассматривается производственный этап инновационного цикла на примере цифрового производства от момента генерирования идеи до ее реализации.

Раздел **«3-D моделирование»** позволяет студентам ознакомиться с программным обеспечением для создания цифровой модели (CAD-модель); ознакомиться с основными видами 3D-сканеров и принципами сканирования, программным обеспечением для обработки моделей, полученных при сканировании; ознакомиться с основными принципами реверс-инжиниринга.

Раздел **«Быстрое прототипирование»** (Rapid Prototyping - RP) позволяет ознакомиться с существующими технологиями быстрого прототипирования, изучить основные принципы работы для получения прототипа при помощи 3D-печати на основе цифровых моделей. На этапе выполнения научно-исследовательской работы необходимо быстро получить прообраз изделия, важны отработка геометрии детали, оценка эргономических качеств, проверка собираемости и компоновочных решений. Прототип позволяет студентам выполнить доработку и провести

некоторые функциональные тесты; также он может служить мастер-моделью для изготовления инструментальной оснастки. [6]

Увидеть будущую модель, а в некоторых случаях и реальную не только на экране монитора, но и в твердой копии – это бесценное подспорье для преподавателя как в области развития наглядности учебного процесса, так и в области мотивации и в процессе овеществления продуктов труда.

Раздел **«Тиражирование»** предназначен для демонстрации студентам процесса мелкосерийного производства. В качестве исходной модели может служить готовая деталь, изделие, а так же прототип с нужными свойствами. Данный раздел позволяет ознакомиться с основными видами смесительно-заливочных установок и основными принципами получения изделий из полиуретана для дальнейшего создания силиконовых форм; ознакомиться с технологиями вакуумного литья в силиконовые формы.

Таким образом, можно выделить главные достоинства ВГУМИП: 1) усиление творческого характера деятельности (умение творчески и нешаблонно решать профессиональные задачи, быстро ориентироваться в больших объемах информации); 2) приобретение знаний и умений в области практической деятельности ИИД; 3) формирование мотивации к ИИД; 4) эффективная меж профессиональная коммуникация (готовность к эффективной работе в команде с представителями других профессий для решения профессиональных задач); 5) гибкость – возможность интегрироваться в содержание базовых общепрофессиональных дисциплин; 6) компактность и насыщенность инновационного содержания и др.[10]

В дополнение к вышесказанному уместным будет сообщить о том, что для реализации в рамках учебного процесса производственного этапа инновационного цикла, а также в целях дальнейшего развития научной и образовательной деятельности в научно – технической сфере на базе ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарёва» был открыт Центр проектирования и быстрого прототипирования «Рапид-Про». Его основными функциями является осуществление следующих видов деятельности: 1) организация и планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на основе использование цифровых технологий; 2) разработка научно-технической и проектной документации на изготовление экспериментальных образцов; 3) разработка 3D компьютерных моделей деталей и узлов; 4) изготовление прототипов с использованием аддитивных технологий; 5) организация опытного мелкосерийного производства не стандартных деталей и узлов; 6) разработка методик и программ новых дисциплин обучения студентов технических специальностей; 7) проектирование новых педагогических технологий подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности с использованием аддитивных технологий производства; 8) взаимодействие и развитие сотрудничества с

центрами той же научной сферы, в том числе междугородними и международными.[11]

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно отметить, что проблеме подготовки студентов технических вузов к ИИД было посвящено значительное количество исследований и получены положительные результаты разработок. Внедрение же в общеобразовательную профессиональную программу гибкого учебного модуля инновационной подготовки позволит, прежде всего, повысить качество подготовки студентов к ИИД, повысить общий уровень подготовки выпускников инженерных направлений с учетом использования в обучении возможностей Центра «Рапид-Про», тенденций и перспектив развития рынка труда, обеспечит рост эффективности исследований и разработок, качества образовательных программ высшего профессионального образования, а также будет способствовать притоку и закреплению в науке и образовании молодых специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грошева Е. П. Практикум по основам инновационной инженерной деятельности / Е. П. Грошева, Н. Н. Шекшаева; под ред. Н. И. Наумкина – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. – 2013. – 76 с.
2. Лаврентьева, Н. Б. Педагогические основы разработки и внедрения модульной технологии в высшей школе : дис. д-ра пед. наук / Н. Б. Лаврентьева. – Барнаул, 1999. – 393 с.
3. Юцявичене П. А. Теория и практика модульного обучения. / П. А. Юцявичене. Каунас, 1989. - 271 с.
4. Зиновкина М. М. Инженерное мышление (теория и инновационные педагогические технологии). / М. М. Зиновкина. М.: МГИУ, 1998. — 283с.
5. Наумкин Н. И. Методология научного творчества для технических вузов: учебное пособие / Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин, Е. П. Грошева, Г.А. Кондратьева // – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015.
6. Наумкин Н. И. Модульная структура общетехнических дисциплин направленная на подготовку студентов к инновационной деятельности / Н. И. Наумкин, Г. А. Кондратьева // Сборник публикаций научного журнала «Globus» по материалам III международной научно-практической конференции: «Психология и педагогика: актуальные вопросы» г. Санкт-Петербург: сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – С-Пб.: Научный журнал «Globus», 2015. – С.23-28.
7. Фоменко Л. Б. Обучение студентов технического вуза стратегиям самостоятельной работы с использованием новых информационных технологий Текст.: дис. .канд. пед. наук / Л. Б. Фоменко. Ижевск, 2006. - 229 с.

8. Наумкин Н. И. Особенности подготовки специалистов технического вуза требованиям работодателей / Н. И. Наумкин, Г. А. Кондратьева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - №12 (часть 8). – 2015.
9. Агранович Б. Л. Инновационное инженерное образование Текст. / Б. Л. Аграновайч, А. И. Чучалин, М. А. Соловьев // Инженерное образование. 2003. №1. - С. 11 - 14.
10. А.И. Чучалин, Ю.Ю. Крючков, М.А. Соловьев и др.//Инженерное образование. 2004. № 2. - С.89 - 93.
11. Наумкин Н.И. Введение в практикум по аддитивным технологиям / Н.И. Наумкин, Д.В. Пивкин, В.Ф. Купряшкин, А.В. Безруков, И.В. Еремкин, Е.А. Кильмяшкин, А.С. Князьков // Издательство Мордовского университета. – 2015. – С. 80.

N. I. Naumkin[1], V. F. Kupryashkin[2], G. A. Kondrateva[3], D. V.Pivkin[4]

DESIGN FEATURES OF TEACHING TECHNOLOGY TRAINING STUDENTS PRACTICAL INNOVATION ON THE BASIS OF DISCIPLINE THE EDUCATIONAL MODULES

all: Ogarev Mordovia State University, Russia.

Abstract

The paper deals with the structure of the embedded flexible training module to prepare students for innovative engineering, which is integrated into the existing modular structure of general and professional disciplines.

Key words: professional education, competence, technical disciplines, training module, additive technology, rapid prototyping, replication.

REFERENCES

[1] Grosheva E. P. Praktikum po osnovam innovatsionnoy inzhenernoy deyatelnosti / E. P. Grosheva, N. N. Shekshaeva; pod red. N. I. Naumkina – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta. 2013. 76 p. (rus.)
[2] Lavrenteva, N. B. Pedagogicheskie osnovyi razrabotki i vnedreniya modulnoy tehnologii v vyisshey shkole : dis. d-ra ped. nauk / N. B. Lavrenteva. – Barnaul, 1999. 393 p. (rus.)
[3] Yutsyavichene P. A. Teoriya i praktika modulnogo obucheniya. / P. A. Yutsyavichene. Kaunas, 1989. 271 p. (rus.)
[4] Zinovkina M. M. Inzhenernoe myishlenie (teoriya i innovatsionnyie pedagogicheskie tehnologii). / M. M. Zinovkina. M.: MGIU, 1998. 283 p. (rus.)

[5] Naumkin N. I. Metodologiya nauchnogo tvorchestva dlya tehnicheskih vuzov: uchebnoe posobie / N. I. Naumkin, V. F. Kupryashkin, E. P. Grosheva, G.A. Kondrateva // Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2015. (rus.)
[6] Naumkin N. I. Modulnaya struktura obschetehnicheskih distsiplin napravlennaya na podgotovku studentov k innovatsionnoy deyatelnosti / N. I. Naumkin, G. A. Kondrateva // Sbornik publikatsiy nauchnogo zhurnala «Globus» po materialam III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: «Psihologiya i pedagogika: aktualnyie voprosyi» g. Sankt-Peterburg: sbornik so statyami (uroven standarta, akademicheskiy uroven). – S-Pb.: Nauchnyiy zhurnal «Globus», 2015. Pp. 23-28. (rus.)
[7] Fomenko L. B. Obuchenie studentov tehnicheskogo vuza strategiyam samostoyatelnoy rabotyi s ispolzovaniem novyih informatsionnyih tehnologiy Tekst.: dis. .kand. ped. nauk / L. B. Fomenko. Izhevsk, 2006. - 229 p. (rus.)
[8] Naumkin N. I. Osobennosti podgotovki spetsialistov tehnicheskogo vuza trebovaniyam rabotodateley / N. I. Naumkin, G. A. Kondrateva // Mezhdunarodnyiy zhurnal prikladnyih i fundamentalnyih issledovaniy. №12 (chast 8). 2015. (rus.)
[9] Agranovich B. L. Innovatsionnoe inzhenernoe obrazovanie Tekst. / B. L. Agranovaich, A. I. Chuchalin, M. A. Solovev // Inzhenernoeobrazovanie. 2003. №1. Pp. 11 - 14. (rus.)
[10] A.I. Chuchalin, Yu.Yu. Kryuchkov, M.A. Solovev i dr.//Inzhenernoe obrazovanie. 2004. № 2. Pp.89 - 93. (rus.)
[11] Naumkin N.I. Vvedenie v praktikum po additivnyim tehnologiyam / N.I. Naumkin, D.V. Pivkin, V.F. Kupryashkin, A.V. Bezrukov, I.V. Eremkin, E.A. Kilmyashkin, A.S. Knyaz-kov // Izdatelstvo Mordovskogo universiteta. 2015. 80 p. (rus.)

УДК 378.415; DOI 10.1872/MMF-2016-13

Н. И. Наумкин[1], Е. А. Нуянзин[2]

МЕТОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ НЕОБХОДИМЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ АКТУАЛИЗИРОВАННЫХ ФГОС ВО

[1]Николай Иванович Наумкин, д.п.н., профессор
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: naumn@yandex.ru

[2]Евгений Анатольевич Нуянзин, к.т.н., доцент
Мордовский государственнй университет им. Н.П. Огарёва
Россия, Саранск, Республика Мордовия
Тел.: (8342) 25-4456, E-mail: nuyanzin@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обучения студентов инженерных направлений подготовки в условиях перехода на актуализированные образовательные стандарты ФГОС ВО. Результаты исследования показали, что качественное формирование компетенций у студентов возможно благодаря разработке методической системы, включающей в себя требования стандарта и их реализацию в рамках компонентов педагогической модели, разработанной в условиях национально-исследовательского университета.

Ключевые слова: мотивация, инновационная деятельность, инновационные продукты, компетенции, профессиональный стандарт, работодатель, интерактивная форма, оценка качества обучения.

Высшее образование в Российской Федерации за последнее время претерпевает значительное количество перемен. Только за последние 4-5 лет кардинально изменились требования к подготовке инженерных кадров, трансформируясь из классического инженерного образования (5 лет на очной и 6 лет на заочной), в так называемое уровневое образование бакалавриат-магистратура-аспирантура. В 2009-2010 годах были утверждены стандарты третьего поколения практически по всем инженерным направлениям подготовки. Были разработаны основные образовательные программы, программы итоговой аттестации, по которым обучались студенты последние 4 года. Однако, начиная с 2014 года

Минобрнауки РФ постепенно стало утверждать новые (актуализированные) стандарты ФГОС ВО, содержание и требования к реализации программ в которых отличаются от существующих в стандартах ФГОС ВПО третьего поколения [1].

Среди основных особенностей ФГОС ВО можно выделить: 1) ориентация на результат образования, выраженный через компетенции выпускников; 2) структура образовательных программ нацелена формирование и достижение заявленного результата обучения; 3) акцент переносится на контрольно-оценочную составляющую.

Поэтому основной задачей вузов на сегодняшний момент является выработка таких методов обучения, образовательных технологий и оценочных средств, которые могли бы сформировать у обучающихся требуемые общекультурные (ОК), общепрофессиональные (ОПК) и профессиональные (ПК) компетенции, а также проводить объективную комплексную оценку уровня сформированности этих компетенций. Немаловажным аспектом данной задачи является продуманная разработка матрицы компетенций, которая сейчас является обязательным элементом в структуре любой образовательной программы. Желательно привлекать для этого потенциальных работодателей. В итоге, выпускник должен владеть всеми компетенциями и быть готовым к инновационной инженерной деятельности (ИИД) в условиях реального сектора экономики.

В связи со всем вышеперечисленным уже известная схема подготовки студентов к ИИД, описанная в работе [2], изменится и будет выглядеть так, как представлено на рисунке 1. Значительно меняются исходные требования для учебного заведения, представленные в левой части схемы, а также суть самой модели формирования. Образовательной организации требуется перестройка существующих методик с целью соответствия их новым требованиям ФГОС.

Рассмотрим составляющие вышеуказанной интегрированной схемы более подробно. Разрабатывая основную профессиональную образовательную программу необходимо обязательно учитывать потребность регионального рынка труда, требования федеральных органов исполнительной власти. Образовательная программа должна четко регламентировать цели, ожидаемые результаты, содержание, условие и технологии реализации образовательного процесса. Кроме того, раскрывается социальная миссия образовательной программы, методика развития у студентов личностных качеств, а также идеи и задачи в области воспитания будущих кадров инженерных направлений.

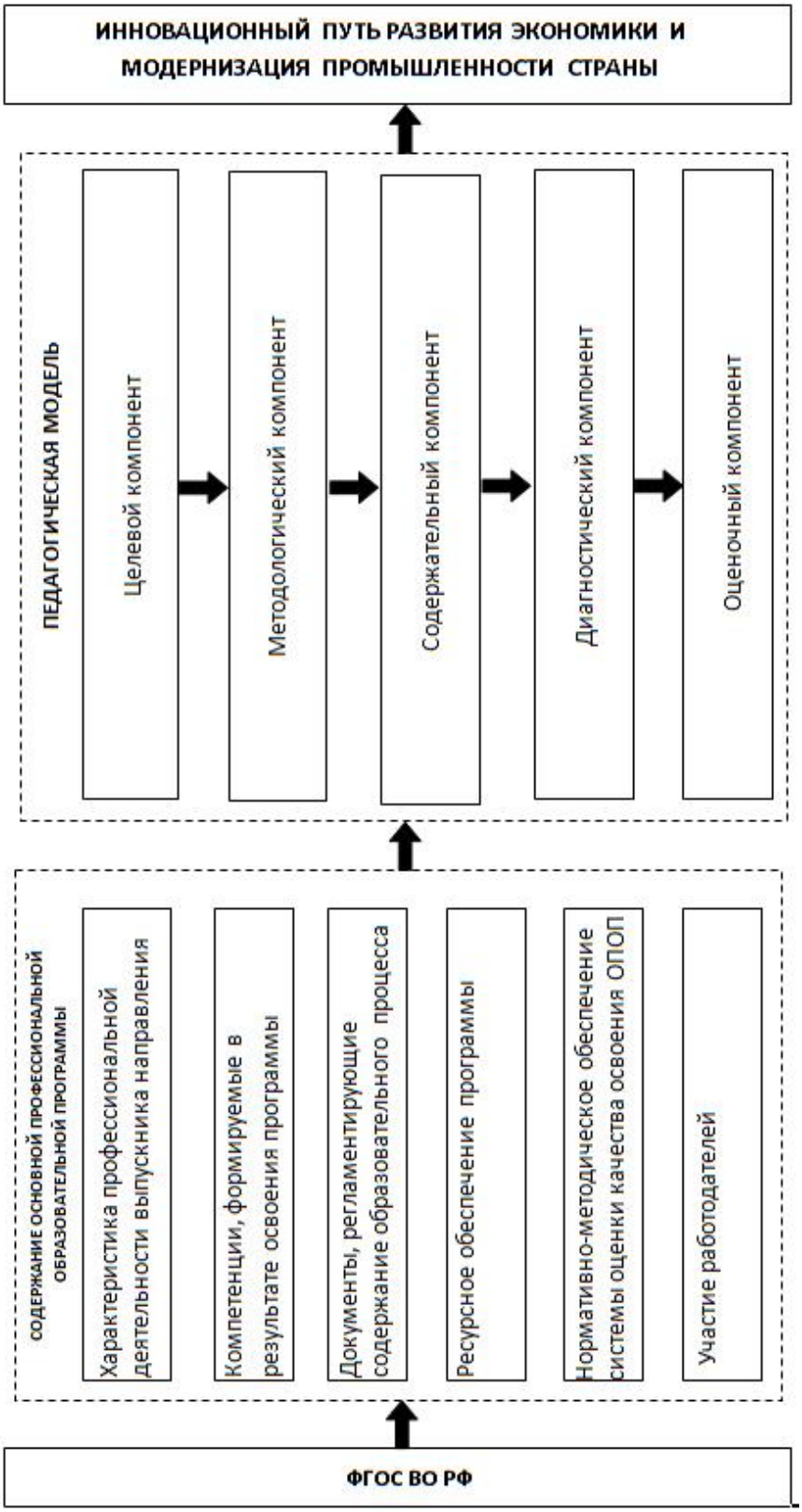


Рисунок 1 - Интегрированная схема подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности на основе актуализированных ФГОС ВО

В характеристике профессиональной деятельности помимо общеизвестных требований ФГОС ВПО новые актуализированные стандарты ФГОС ВО обязывают учитывать требования профессиональных стандартов, утвержденных и размещенных на сайте Минтруда России.

Одной из основных задач, возникающих у разработчиков основных профессиональных образовательных программ является соответствие компетенций образовательного стандарта требованиям соответствующего профессионального стандарта. При этом необходимо учитывать незначительную разницу в терминологии этих двух документов.

На рисунке 2 представлена схема соответствия определений образовательного и профессионального стандартов.

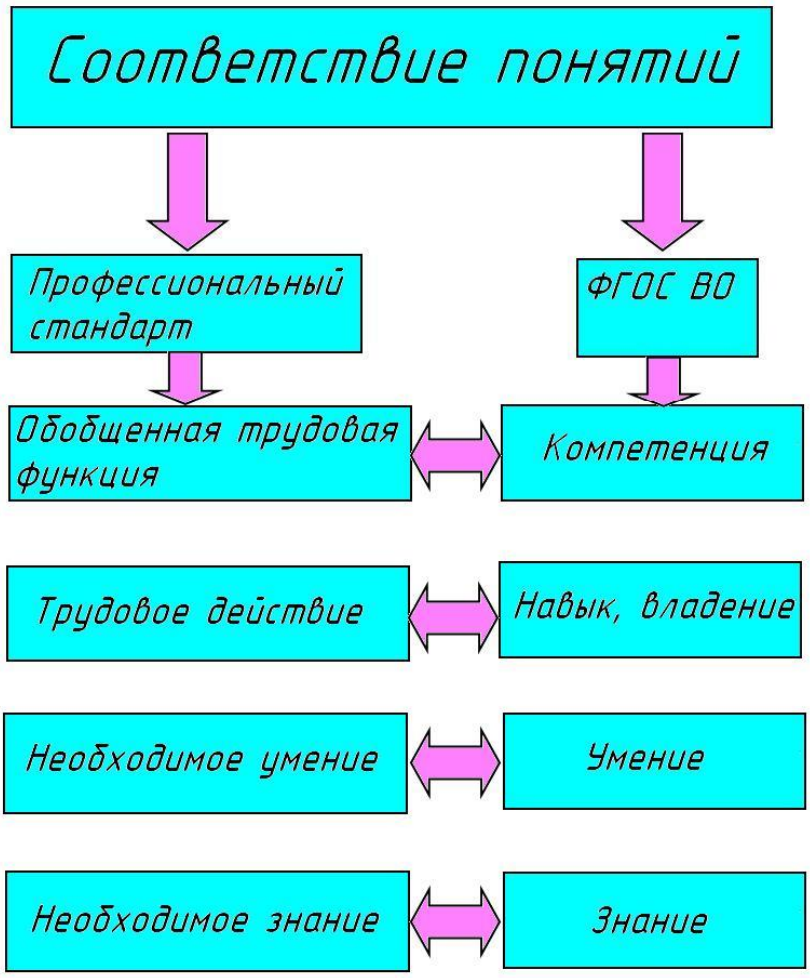


Рисунок 2 – Соответствие терминологии профессионального и образовательного стандартов

С учетом соответствий, показанных на рисунке 2, необходимо четко формулировать знания, умения и навыки по каждой дисциплине в рабочих программах с целью достижения соответствия этих двух стандартов. При этом не следует забывать, что программа бакалавриата соответствует

шестому уровню квалификации профессионального стандарта, а магистратура – седьмому.

Немаловажной задачей при разработке образовательной программы является составление матрицы и паспортов компетенций, формируемых в результате освоения дисциплин. Данный документ в настоящее время является актуальным наряду со всеми остальными документами, регламентирующими содержательную часть образовательного процесса: календарным графиком учебного процесса, учебным планом, рабочими программами дисциплин и программами практик.

Паспорт компетенций представляет собой документ, в полной мере раскрывающий суть и методику формирования компетенции при реализации образовательной программы. Он включает в себя общую характеристику компетенции, её взаимосвязь с другими компетенциями, последовательность её освоения. Необходимо также учитывать входной уровень умений, знаний навыков, которые позволяют оценить возможность освоения то или иной компетенции. В паспорте также необходимо указать поэтапное формирование компетенции, на каком курсе формируется, что предшествует формированию и какой последующий контроль осуществляется на конечном этапе формирования.

Обязательным элементом основной профессиональной образовательной программы является участие работодателей в её разработке. Одним из последних документов, подтверждающих усиление роли специалистов-производственников, является приказ Минобрнауки о внесение изменений в порядок проведения государственной итоговой аттестации по образовательным программам высшего образования от 9 февраля 2016 года №86, где меняются требования пункта 26 существующего порядка о ГИА требующие увеличение процента представителей работодателей в составе государственных экзаменационных комиссий до 50%. Таким образом, усиливается независимая оценка качества подготовки и формирования компетенций у выпускников вузов.

Для реализации всех поставленных целей и задач на рис.1 представлена измененная педагогическая модель, которая позволит повысить качество подготовки выпускников инженерного профиля и максимально подготовить их к ИИД с учетом вышеназванных требований.

Требования ФГОС ВО обязательно должны быть реализованы в рамках компонентов педагогической модели, представленной на рис.1.

Целевой компонент представленной модели включает: во-первых, - развитие творческого потенциала студентов, формирование фундаментальных и теоретических научно-технических знаний студентов по дисциплинам, профессиональных знаний и умений и их применения в будущей профессиональной инновационной инженерной деятельности,

направленной на конкретную инженерную специальность; во-вторых, - вырабатывает у студентов мотивацию к осознанному стремлению развивать свой творческий потенциал – залог будущей успешной инновационной инженерной деятельности. Цели рассматриваемой системы определяют и содержание учебного материала, которое включает фундаментальные законы, понятия естественнонаучных дисциплин, научно-технические теории, профессиональные и проектные знания.

Методологический компонент системы предполагает интеграцию основных положений существующих передовых методических подходов, обеспечивающих формирование у студентов компетентности в инновационной инженерной деятельности на основе единства принципов фундаментальности и профессиональной направленности, с учетом индивидуальных особенностей студентов, на основе эффективности единства, взаимосвязи и взаимодополнения основных курсов дисциплин базовой и вариативной частей учебного плана, сопутствующих развитию творческого потенциала курсов и самостоятельной работы в условиях научно-исследовательской среды.

Содержательный компонент состоит из фундаментальных законов, понятий, научно-технических теорий изучаемых при обучении общетехническим дисциплинам, профессионально направленным на решение проблем инженерных специальностей, а также учитывает непрерывность, преемственность, единство и взаимодополнение процесса обучения курсов дисциплин и внеаудиторной работы студентов (в условиях олимпиадной среды, научных школ, НИРС, СКБ, и др.), Он также базируется на общедидактических и частнодидактических принципах, и соответствующих им критериях отбора учебного материала. Содержание обучения помогает достичь поставленной цели, а ее постановка определяет содержание обучения.

Цели обучения и содержание курсов вариативных дисциплин для технических вузов реализуются в учебном процессе в рамках процессуально-технологического компонента модели методической системы, который включает: методы формы и средства обучения. Принцип интеграции фундаментальных, профессионально-направленных и проектных знаний и умений реализуется в методах обучения. Так, наряду с такими методами, как информационно-иллюстративный и репродуктивный, применяются частично-поисковый, проблемный и исследовательский. Эти, реализованные в учебном процессе, методы способствуют развитию творческого потенциала студентов – залога их успеха в будущей инновационной инженерной деятельности. В ходе проблемного изложения преподаватель формулирует проблему в виде учебной или квазипрофессиональной задачи, решение которой требует творческих способностей студентов, эти задачи преподаватель либо

решает сам при активном участии студентов, либо создает условия для ее самостоятельного решения студентами. При частично-поисковом методе студенты самостоятельно исследуют часть учебного познавательного материала, по выбранным ими алгоритмам или траекториям изучения физических, явлений, процессов, механических систем (лабораторно-практические занятия, курсовое и дипломное проектирование, обучение в олимпиадной среде). Главное отличие исследовательского метода от других заключается в самостоятельности решения поставленных перед студентами задач (научные школы, НИРС, СКБ, хоздоговорные и госбюджетные темы, и др.). При этом, наряду с традиционными формами обучения (лекции, курсовое проектирование, лабораторные практикумы, практические занятия и др.), используются инновационные формы обучения (обучение в команде, обучение в олимпиадной среде, обучение посредством научно-технического исследования и др.), формирующие у студентов компетентность в инновационной инженерной деятельности.

В процессе обучения преподаватель выбирает соответствующие данному методу формы и средства обучения.

Средства обучения дисциплин построены на основе развития творческого потенциала – ядра инновационной инженерной деятельности, представляют собой систему заданий, включающую как задания к лекционным, практическим и лабораторным занятиям, так и задания к курсовым, проектно-конструкторским работам, в единстве и взаимодополнении процесса обучения к основным курсам дисциплин, формирующим профессиональные компетенции и внеаудиторной работы студентов (в условиях олимпиадной среды, научных школ, НИРС, СКБ, и др.).

Диагностический компонент модели методической системы, предполагает регулярный мониторинг и диагностику развития элементов, входящих в структурные компоненты творческого потенциала студентов технических вузов, а также их готовность осознанному выбору будущей профессиональной инновационной инженерной деятельности.

Анализируя интегрированную схему, изображенную на рис.1, которая и представляет собой законченную методическую систему, можно заметить, что именно, благодаря предложенной педагогической модели возможна качественная реализация требований ФГОС ВО при подготовке инженерных кадров к ИИД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению 35.03.06 «Агроинженерия» уровень высшего образования бакалавриат. Утвержден министерством

образования и науки Российской Федерации 20 октября 2015 г, приказ №1172.
2. Наумкин Н.И., Нуянзин Е.А. Интегрированная схема подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности на основе ФГОС // Современное машиностроение. Наука и образование, 2013. №3. С. 135–142.
3. Наумкин Н.И. Оценка эффективности формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности в процессе обучения общетехническим дисциплинам [Текст]// Сибирский педагогический журнал. – 2008. - № 8. – С. 30-38.
4. Хуторской А.В. Доктрина образования человека в Российской Федерации. Проект // Народное образование, 2015. №3. С.35-46.
5. Сластенин В.А. [и др]. Педагогика: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / В.А. Сластенин, И.Ф. Исаев, Е.Н. Шиянов; Под ред. В.А. Сластенина. - М.: Издательский центр "Академия", 2002. - 176 с.
6. Дежина И.Г. Инженерное образование и инновационная деятельность в России // Высшее образование в России. 2005. №10. С. 110-118.
7. Наумкин Н.И. [и др.]. Особенности подготовки студентов к инновационной деятельности // Тракторы и сельхозмашины, 2012, №10. С.53 – 55.
8. Наумкин Н.И., Грошева Е.П. Педагогическая модель подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности при обучении техническому творчеству // Интеграция образования. – 2010. – №2 (59). – С. 26 – 30.
9. Комаров В.А., Наумкин Н.И., Нуянзин Е.А. Междисциплинарные проекты в агроинженерном образовании // Техника и оборудование для села, 2015.№10, С.41–43.
10. Наумкин Н.И. Подготовка студентов к инновационной инженерной деятельности на основе использования междисциплинарных проектов / Н.И. Наумкин, Е.А. Нуянзин // Инновационные образовательные технологии в техническом вузе: Сборник научных статей межрегиональной научно-методической конференции / под общ. ред. к-та пед. наук, до-цента А.И. Попова. – Тамбов : Изд-во Студия Павла Золотова, 2015. – С. 62-70 с.
11. Афанасьева И.Б., Князева Е.В. Личностно-ориентированное обучение в системе непрерывного образования «Школа-ВУЗ» // Современное машиностроение. Наука и образование, 2013. №3. С. 42–50.
12. Афанасьева И.Б., Князева Е.В. Организация самостоятельной работы студентов // Современное машиностроение. Наука и образование, 2014. №4. С. 20–29.

N.I. Naumkin[1], E.A. Nuyanzin[2]

METHODICAL SYSTEM OF FORMATION OF STUDENTS UNIVERSITY TECHNICAL NECESSARYCOMPETENCE IN VIEW OF THE REQUIREMENTS IN ACTUALIZED STANDARDS

[1]Dr. Nikolay I. Naumkin, Prof., Russia, Saransk, Mordovian State University
Phone: 8342-25-4456, E-mail: nuyanzin@yandex.ru

[2]Dr. Evgeny A. Nuyanzin, Ass. Prof., Russia, Saransk, Mordovian State University, Phone: 8342-25-4456, E-mail: nuyanzin@yandex.ru

Abstract

The paper discusses the issues of training of students of engineering training areas on in the transition to the updated educational standards. The results showed that the quality formation of the competences of the students is possible thanks to the development of methodical system, including the requirements of the standard and its implementation in the educational elements of the model developed in a national research university.

Key words: motivation, innovation, innovative products, competence, professional standard, the employer, an interactive form, evaluation of the quality of education.

REFERENCES

[1] Federalny gosudarstvenny obrazovatelny standart vyshego obrazovania po napravleniyu 35.03.06 “Agroingeneria” uroven vyshego obrazovania bakalavriat. Utverzhden ministerstvom obrazovaniya i nauki Rossiiskoy Federatii 20 octyabrya 2015g, prikaz №1172. (rus.)

[2] Naumkin N.I., Nuyanzin E.A. Integrirovannaya shema podgotovki studentov k innovationnoi ingenernoi deyatelnosti na osnove FGOS // Sovremennoye machinostroenie. Nauka i obrazovaniye, 2013.№3. Pp.135-142. (rus.)

[3] Naumkin N.I. Otsenka effectivnosti formirovaniya u studentov technicheskih vuzov sposobnosti k innovationnoy ingenernoy deyatelnosti v protsesse obuchenia obshetechnicheskim disciplinam [Tekst] // Sibirskiy pedagogicheskiy zhurnal. – 2008. - №8. Pp.30-38. (rus.)

[4] Hutorskoy A.V. Doctrina obrazovania cheloveka v Rossiiskoy Federatii. Proekt. // Narodnoye obrazovaniye, 2015. №3, Pp.35-46. (rus.)

[5] Slastenin V.A. Pedagogika: Uchebnoe posobie / V.A. Slastenin, I.F. Isaev, E.N. Shiyanov. – M.: Izdatelskiy centr “Akademia”, 2002. 176 p. (rus.)

[6] Dezhina I.G. Inzhenernoye obrazovaniye i innovatoinnaya deyatelnost v Rossii // Vyshee obrazovaniye v Rossii, 2005. №10. Pp.110-118. (rus.)
[7] Naumkin N.I. [i dr.]. Osobennosti podgotovki studentov k innovationnoy deyatelnosti // Traktory i selhozmashiny, 2012. №10. Pp.53-55. (rus.)
[8] Naumkin N.I., Groseva E.P. Pedagogicheskaya model podgotovki studentov k innovationnoy inzhenernoy deyatelnosti pri obuchenii technicheskomu tvorchestvu // Integratia obrazovania. – 2010. – №2(59) – Pp.26-30. (rus.)
[9] Komarov V.A., Naumkin N.I., Nuyanzin E.A. Mezhdistiplinarniye proekty v agroinzhenernom obrazovanii // Tehnika I oborudovaniye dlya sela, 2015. №10, Pp.41-43. (rus.)
[10] Naumkin N.I. Podgotovka studentov k innovationnoy inzhenernoy deyatelnosti na osnove ispolzovaniya mezhdistiplinarnih proektov / N.I. Naumkin, E.A. Nuyanzin // Innovationnie obrazovatelniye technologii v technicheskom vuze: Sbornik nauchnih statey mezhregionalnoy nauchno-metodicheskoy konferentii / pod redaktiey A.I.Popova – Tambov, 2015. Pp.62-70. (rus.)
[11] Afanaseva I.B., Knyazeva E.V. Lichnostno-orientirovannoye obuchenie v sisteme neprerivnogo obrazovania “Shkola-VUZ” // Sovremennoye machinostroenie. Nauka i obrazovaniye, 2013.№3. Pp.42-50. (rus.)
[12] Afanaseva I.B., Knyazeva E.V. Organizatia samostoyatelnoi raboty studentov // Sovremennoye machinostroenie. Nauka i obrazovaniye, 2014.№4. Pp.20-29. (rus.)

УДК 378.147:744.4; DOI 10.1872/MMF-2016-14

Т.А. Никитина[1], И.С. Смирнова[2]

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ

[1]Никитина Татьяна Александровна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: nik_tatiana@mail.ru

[2]Смирнова Ирина Сергеевна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: kpgd@mail.ru

Аннотация

Рассматривается тестовая методика, как одна из форм педагогического контроля знаний. Показаны особенности разработки контрольно-измерительных материалов, приведены примеры заданий разного уровня усвоения и сложности. Предложено несколько вариантов использования тестовых заданий в учебном процессе.

Ключевые слова: тестовый контроль, контрольно-измерительные материалы, инженерная графика

Подготовка студентов бакалавров любого инженерного направления, связанного с проектированием, изготовлением и эксплуатацией машин и технологического оборудования, предусматривает изучение дисциплины типа "Инженерная графика". Важной составляющей профессиональной компетентности таких выпускников является владение знаниями и навыками построения чертежа, умение читать и разрабатывать графическую и текстовую конструкторскую документацию в соответствии с требованиями стандартов, а также применение полученных знаний и навыков в практической деятельности.

Студенты первого курса обучения, как правило, обладают слабыми графическими навыками и имеют трудности с пространственным восприятием предметов, объектов и структурных форм. Это связано не только с частым отсутствием предмета «Черчение» в школах (даже

факультативно), но и невысоким общим уровнем навыков в этой области. Количество студентов, не имеющих графической подготовки, ежегодно только увеличивается [2].

Необходимость повышения качества образования будущих специалистов и имеющаяся тенденция сокращения аудиторного времени на изучение графических дисциплин, а также значительная насыщенность учебного материала требуют от преподавателей постоянного поиска новых методов совершенствования учебного процесса. Педагогический контроль знаний — важнейший структурный элемент учебно-воспитательного процесса, действенное средство получения студентами глубоко осознанных знаний, определяющий результативность и эффективность обучения.

Применяемые в учебном процессе на кафедре «Инженерная графика и дизайн» (ИГД) Санкт-Петербургского политехнического университета формы контроля по дисциплине «Инженерная графика» можно классифицировать по следующим признакам:

1) способ организации: индивидуальный или фронтальный;

2) способ подачи информации: устный опрос по теме занятия и защита индивидуальных работ, тестовый контроль, проверка и прием индивидуальных заданий (чертежей);

3) периодичность проведения: текущий, рубежный, итоговый.

Среди перечисленных форм педагогического контроля важное внимание уделяется тестовой методике, как средству совершенствования процесса обучения и дополняющей системе проверки знаний на определенных его этапах. Она позволяет повысить работоспособность и внимание студентов, стимулирует их учебно-познавательную активность. Тестовый контроль, в отличие от других форм, предоставляет возможность в короткие сроки проверить знания большого числа студентов, а четкая формулировка вопроса инициирует краткий и точный вариант ответа.

В настоящее время на кафедре ИГД продолжается разработка и внедрение в образовательный процесс контрольно-измерительных материалов (КИМ) по дисциплине «Инженерная графика», направленных на проверку и закрепление общих положений Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и вопросов практического применения стандартов при ее создании [5, 10].

Тестовые задания [6, 7, 9] составлены в соответствии с тематической направленностью программы дисциплины и включают в себя следующие разделы:

1. Общие правила оформления чертежей: форматы, шрифты, масштабы, линии (ГОСТ 2.301–68, 2.302–68, 2.303–68, 2.304–81, 2.306–68).

2. Изображения: виды, разрезы, сечения (ГОСТ 2.305–2008).

3. Нанесение размеров на чертежах (ГОСТ 2.307–2011).

Всего представлено 124 вопроса, из них 97 вопросов первого уровня усвоения и 27 — второго.

Для первого уровня усвоения используется закрытая форма с множественным выбором — из четырех-пяти вариантов ответа необходимо выбрать единственный верный. Ответы на поставленные вопросы предлагаются в виде теоретических определений или фрагментов чертежей. Задания первого уровня можно разделить на следующие группы [1, 3, 4, 8]:

1. Узнавание, различение. Группа обладает наименьшей сложностью. Суть задания сводится к умению визуально выделить нужный объект. Например, среди приведенных объектов необходимо выбрать один, обладающий каким-либо указанным свойством (рис. 1).

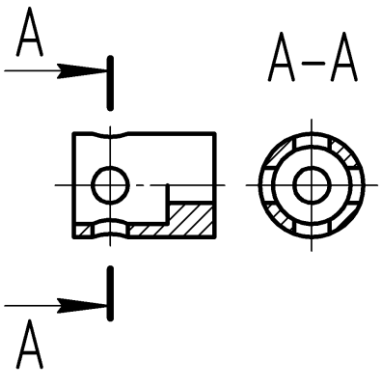
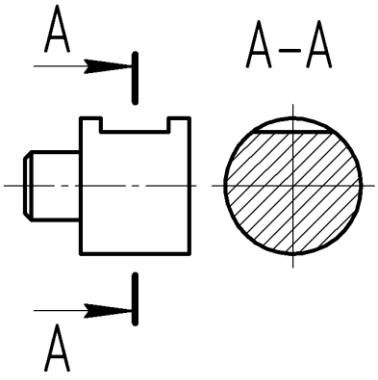
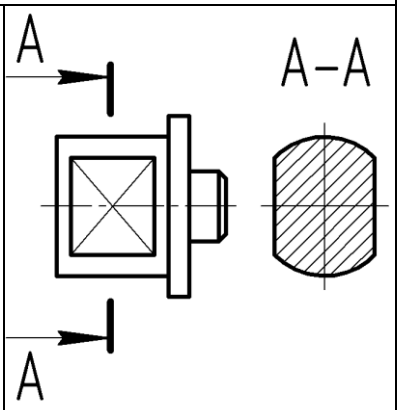
Укажите изображение, которое является сечением.		
		
а	б	в

Рис. 1

2. Запоминание. Вопросы этой группы имеют легкий и средний индекс сложности. Они направлены на проверку теоретических знаний (определения, общепринятые положения) (рис. 2). При этом возможен вопрос с инверсным выбором, т.е. необходимо указать неверный ответ среди верных (рис. 3). В некоторых вопросах необходимо указать наличие соответствия между названием объекта и его изображением (рис. 4).

Разрез, служащий для выяснения устройства изделия в отдельном ограниченном месте, называется
а) простым; б) местным; в) дополнительным; г) ступенчатым.

Рис. 2

Укажите неверное обозначение конусности.

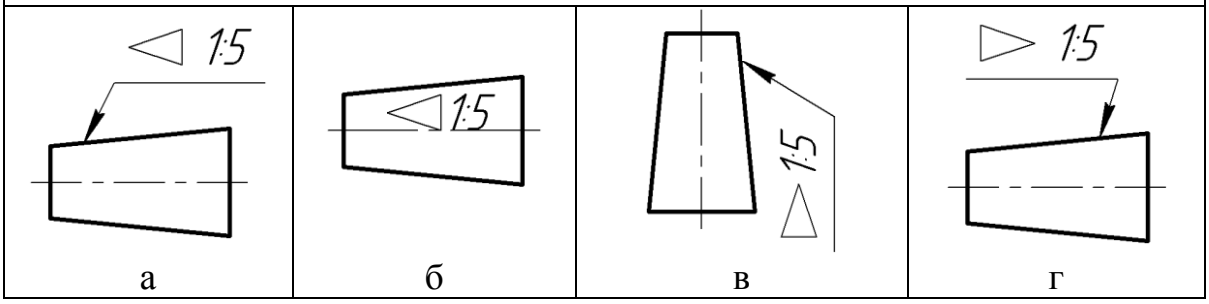


Рис. 3

Впишите под каждым из приведенных типов линий вариант применения ее на чертеже.

Сплошная толстая	Сплошная тонкая	Сплошная волнистая	Штриховая	Штрих-пунктирная тонкая

а) выносная и размерная линии; б) линии видимого контура;

в) линии невидимого контура; г) линии обрыва; д) осевые линии.

Рис. 4

3. Понимание. Эта группа имеет высокий индекс сложности. Например, в одном из заданий требуется выбрать предпочтительный вариант изображения (рис. 5).

Укажите рационально выполненное изображение детали вращения.

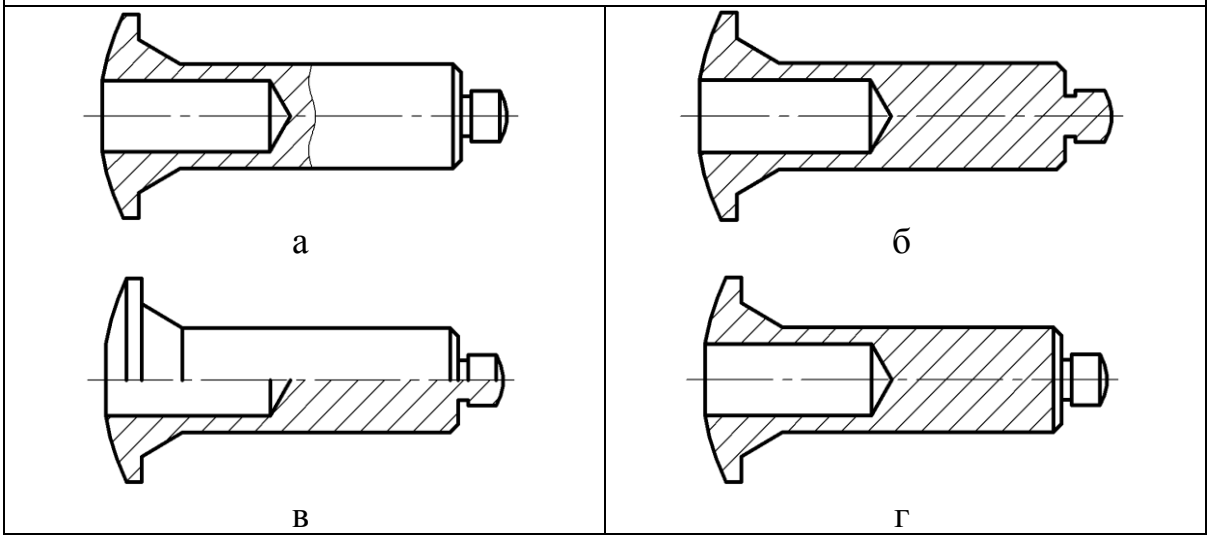


Рис. 5

4. Применение. Вопросы этой группы имеют средний и высокий индекс сложности. Например, от испытуемого требуется, выполнив необходимые построения, выбрать вариант, соответствующий заданному условию (рис. 6).

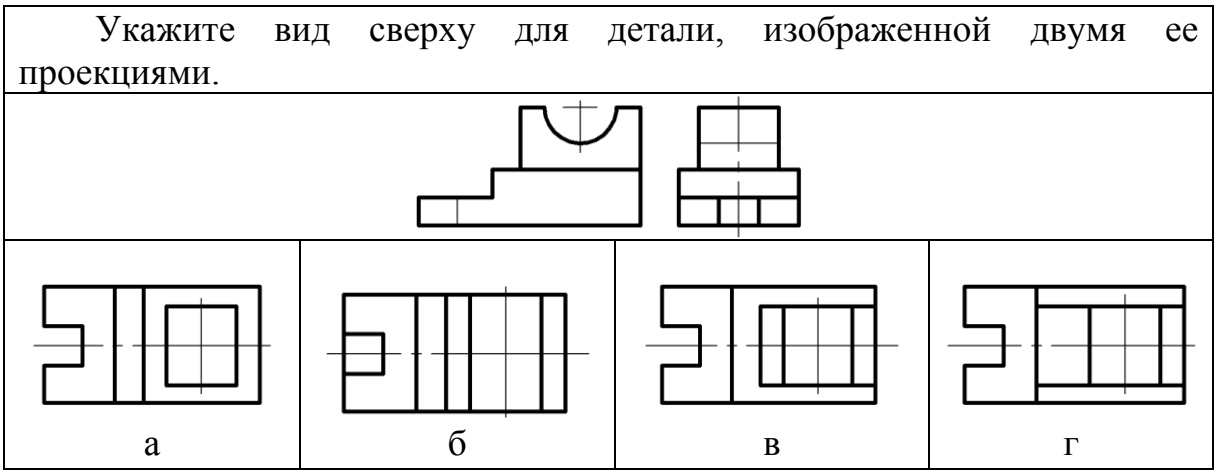


Рис. 6

Второй уровень усвоения вопросов обычно имеет высокий индекс сложности. Для них используется открытый тип задания свободного изложения, т.е. требуется дать развернутый ответ на поставленный вопрос путем выполнения графических построений (рис. 7).

В соответствии с уровнями усвоения вопросов и их индексами сложности в учебном процессе применяются несколько вариантов использования КИМ.

1. Входной контроль знаний в виде 10 заданий первого уровня пониженной сложности по всем представленным разделам с целью:

– получение информации об уровне подготовки студентов для перехода к изучению инженерной графики с учетом их индивидуальных особенностей;

– правильная расстановка акцентов при изложении материала и выбор методических приёмов, способов и форм обучения в зависимости от уровня подготовки студентов.

Такие задания ориентированы на знание основ черчения из школьного курса. При использовании бумажной формы тестирования испытуемые в течение 10 минут заполняют карточку ответов (рис. 8). Выбранный ответ обозначается крестиком или галочкой в соответствующей графе. В десятом задании необходимо установить соответствие, что предполагает текстовое заполнение конкретных полей формы. Правильно выполненное задание оценивается в один балл. Результаты десяти ответов оцениваются по четырехбалльной шкале ("неудовлетворительно", "удовлетворительно", "хорошо" и "отлично"). В

связи с легкостью алгоритма обработки результатов возможно использование безбумажной формы тестирования с помощью специальной программы для ЭВМ.

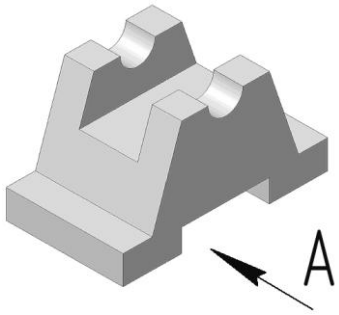
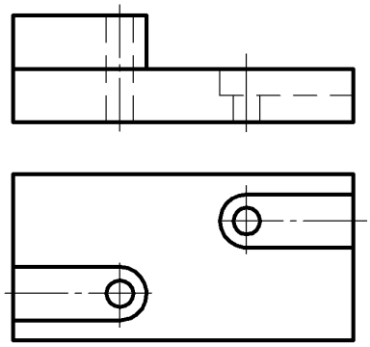
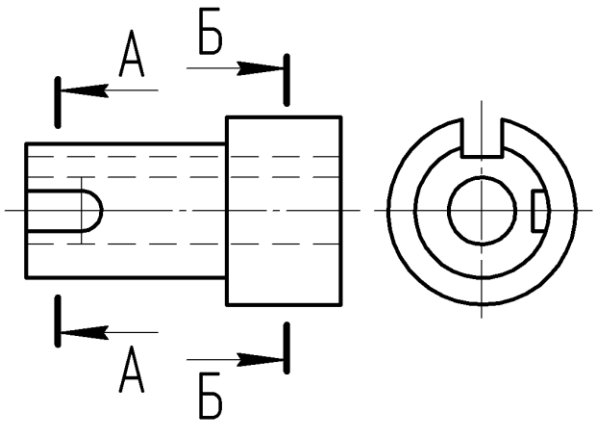
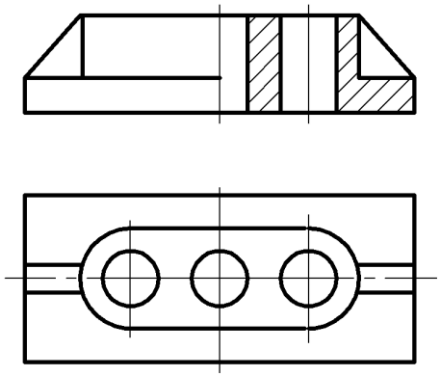
Принимая вид по стрелке А главным, вычертите главный вид, вид сверху и вид слева.	Выполните сложный фронтальный разрез. Укажите, если необходимо, положение секущих плоскостей.
	
Постройте сечение А–А и Б–Б	Поставьте необходимые размеры детали.
	

Рис. 7

2. Рубежный контроль при защите графических работ или после изучения соответствующей темы на практическом занятии. Включает в себя 10–15 заданий только первого уровня, либо первого и второго уровней.

3. Итоговый контроль на зачете или при защите курсовых работ и курсового проекта. Состоит из 15–20 заданий обоих уровней усвоения по всем представленным разделам.

4. Самостоятельный контроль знаний. Для самостоятельного контроля знаний обучающимся может быть рекомендовано учебное

пособие [6] включающее:

– текстовые и графические задания вышеупомянутых КИМ;
– вопросы для самоподготовки;
– ответы на вопросы тестов;
– справочные материалы для подготовки к тестированию;
– список используемой литературы.

КАРТОЧКА ОТВЕТОВ
ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА

№ группы	Фамилия Имя Отчество	№ варианта
Баллы/ оценка	/	__.__.201_

Вариант ответа	№ задания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
а)										
б)										
в)										
г)										
д)										
Результат в баллах										

Рис. 8

Применение тестовой методики позволяет сократить время проведения всех видов периодического контроля знаний студентов. При этом не исключаются и другие формы контроля, принятые на кафедре. Положительным результатом внедрения в учебный процесс КИМ является исключение субъективности при оценке знаний со стороны преподавателя. Регулярное проведение тестирования позволяет контролировать качество усвоения материала, а новизна формы обучения стимулирует рост мотивации у студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов В.С. «Композиция тестовых заданий». Учебная книга. 3-е изд., доп. – М.: Центр тестирования, 2002. – 240 с.
2. Афанасьева И.Б., Князева Е.В. Личностно-ориентированное обучение в системе непрерывного образования «школа-вуз» // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы 3-й

Международной научно-практической конференции / под.ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – с. 42-50.
3. Ефремова Н.Ф. Современные тестовые технологии в образовании. Учеб. пособие. – М.: Логос, 2003.
4. Иванов Б.С. Принципы и технология тестирования студентов: Учебно-методическое пособие/ Под ред. В.Н. Козлова. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. – 80 с.
5. Машиностроительное черчение: справочник / Г.Н. Попова, С.Ю. Алексеев, А.Б. Яковлев. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Политехника, 2013. – 482 с.
6. Никитина Т.А. Инженерная графика. Контрольно-измерительные материалы: учеб. пособие / Т.А. Никитина, И.С. Смирнова. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 94 с.
7. Никитина Т.А., Смирнова И.С. Особенности разработки контрольно-измерительных материалов по дисциплине «Инженерная графика» // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – с. 92-100.
8. Организация самостоятельной работы студентов по инженерной графике тестовыми методами: автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.п.н.: спец. 13.00.02 / Думицкая Наталья Геннадьевна; [Моск. пед. гос. ун-т]. – Москва: 2003. – 16 с
9. Самсонов Владимир Викторович. Инженерная графика. Тестовые задания к разделу разъемные соединения [Электронный ресурс]: методическое пособие / В.В. Самсонов, Т.А. Никитина; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра инженерной графики и дизайна. – Электрон. текстовые дан. – Санкт-Петербург, 2014.
10. Чекмарев А.А. Инженерная графика (машиностроительное черчение): учебник для студентов вузов обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов высш. образования в машиностроении. – Москва. ИНФРА-М, 2012. – 396 с.

T.A. Nikitina[1], I.S. Smirnova[1]

TO THE QUESTION OF DEVELOPMENT OF CONTROL AND MEASURING MATERIALS ON ENGINEERING GRAPHICS

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The test technique is considered as one of the forms of pedagogical control of knowledge. Features of development of control and measuring materials are

shown, examples of tasks of different level of assimilation and complexity are given. Several options of test tasks using in educational process are offered.

Keywords: test control, control and measuring materials, engineering graphics

REFERENCES

[1] V.S. Avanesov. Composition of Test Tasks. Textbook. 3rd ed., Ext. Moscow. Testing Center, 2002. P. 240

[2] I.B. Afanasyeva, E.V. Knyazev. Learner-Oriented Teaching in the System of Continuing Education "School-University" // Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference / edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. SPb . Polytechnic University Publishing House, 2013. P. 42-50.

[3] N.F. Efremova. Modern Test Technology in Education. Textbook. Moscow. Logos, 2003.

[4] B.S. Ivanov. Students Testing Principles and Technology: Textbook / Ed. V.N. Kozlov. SPb . Polytechnic University Publishing House, 2005. – P. 80

[5] Mechanical Engineering Drawing: Handbook/ G.N. Popova, S.Y. Alekseev, A.B. Yakovlev. 6th Ed., Revised and ext. St. Petersburg: Politécnica, 2013. – P. 482

[6] T.A. Nikitina. Engineering Graphics. Control and Measuring Materials: Textbook/ T.A. Nikitina, I.S. Smirnova. St. Petersburg. Polytechnic. University Publishing House, 2016. P. 94

[7] T.A. Nikitina, I.S. Smirnova. Specific Features of Control and Measuring Materials Development for the discipline "Engineering Graphics" // Modern Mechanical Engineering. Science and Education: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference / Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. St. Petersburg. Polytechnic University Publishing House, 2014. P. 92-100.

[8] Organization of Individual Work of Students on Engineering Graphics by Test Methods: Author's Abstract of Ph.D.Thesis.: specialty. 13.00.02 / Natalia G. Dumitskaya, [Moscow State Pedagogical University]. Moscow. 2003. P. 16

[9] V.V. Samsonov. Engineering graphics. Test Tasks to Plug-in Connections Section [Electronic resource]: Handbook / V.V. Samsonov, T.A. Nikitina; St. Petersburg State Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Department of Engineering Graphics and Design. Electron. text details. St. Petersburg, 2014.

[10] A.A. Chekmarev. Engineering Graphics (Mechanical Drawing): Textbook for University Students Studying in the Field of Mechanical Engineering, Moscow: INFRA Moscow, 2012.- P. 396

УДК 378; DOI 10.1872/MMF-2016-15

Е. В. Новикова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Екатерина Витальевна Новикова
Донецкий национальный технический университет,
Институт гражданской защиты Донбасса
Украина, Донецк
E-mail: bgdicz_novikova@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены мультимедийные технологии в преподавании дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» в высшей школе. Предложено применение мультимедийных презентаций, которые позволят повысить мотивацию студентов к изучению дисциплины, улучшить качество усвоения материала, стимулировать самостоятельность обучаемого в изучении, поиске, подборе и обработке информации, что, в свою очередь, ускорят процесс обучения.

Ключевые слова: мультимедиа, технология, электронный учебник, презентация, проекционный экран, видео-метод, безопасность жизнедеятельности, электронная доска, повышение качества обучения.

В настоящее время становление системы образования, ориентированной на вхождение в мировое образовательное пространство, сопровождается существенными изменениями в педагогической теории и практике. Содержание обучения обогащается новыми современными знаниями и умениями, развитием способностей оперирования информацией, творческим решением проблем производства. В арсенале средств обучения значительное место занимают компьютерная техника, телекоммуникационные системы. Вместе с тем особая роль отводится духовному воспитанию личности, гуманизации учебного процесса, важной составляющей которого становится личностно развивающее взаимодействие преподавателя со студентами. В современном образовании происходит изменение образовательной парадигмы: предлагаются новое содержание, новые подходы, другой педагогический менталитет.

Бурное развитие новых информационных и коммуникационных технологий меняет характер развития, приобретения и распространения знаний. Новые технологии расширяют возможности для обновления содержания и методов обучения, а также для расширения доступа к

высшему образованию. Они также видоизменяют роль преподавателя в учебном процессе, в результате чего основополагающее значение приобретает постоянный диалог, активнее происходит преобразование информации в знание и понимание [12].

В нашем исследовании речь идет об использовании мультимедийных технологий в преподавании дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» в высшей школе, их преимуществах перед традиционными, что обуславливает актуальность данного исследования.

Целью исследования является краткий обзор мультимедийных технологий преподавания в высшей школе и обоснование целесообразности использования мультимедийных презентаций на занятиях по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности».

Термин мультимедиа – латинского происхождения. Он распространился за счет англоязычных источников («multy» – множественный, сложный и «media» – среда, средство, способ). В переводе с латинского «мультимедиа» означает «множественное средство» или «много сред». Поскольку технологии мультимедиа являются комплексными, отдельные их элементы последнее время называются самостоятельными терминами, где слово «мультимедиа» трансформируется в имя прилагательное «мультимедийный/ая»: мультимедийная система, мультимедийные программы [11, с. 55].

В научной и технической литературе встречаются различные толкования понятия «мультимедиа» в зависимости от того, где оно используется. Во всемирном докладе ЮНЕСКО (1998 г.) «мультимедиа» рассматривают как способность подавать текстуальные изображения и звук пользователю [2, с. 12]. Ю.И. Машбиц трактует ММ как многоканальное среду, представляющую информацию в различных модальностях [10, с. 56]. По А.В. Шлыкова, мультимедиа – это «полисреда», единое пространство, которое в синкретическом виде представляет различные виды и способы предоставления информации (текст, графику, звук и т.д.) [13, с. 23]. Некоторые авторы объясняют ММ как современную информационную технологию, которая объединяет с помощью компьютерных средств графическое и видео изображение, звук и другие специальные эффекты [7, с. 34].

Ученый В.И. Евдокимов определил, что мультимедийные технологии – это технологии интегрированного представления всех видов информации (зрительной, текстовой, графической, видео, звуковой) на электронных носителях в цифровом формате в виде электронного документа и воспроизведения его на компьютере или на экране с помощью мультимедийного проектора и соответствующих приборов. Таким образом, мультимедийные технологии – это технологии преобразования всех видов информации в цифровой формат, интеграции информации в один документ и воспроизведения его на компьютере [4].

На сегодняшний день мультимедийные технологии – это одно из направлений информационных технологий, которое развивается наиболее динамично. Это объясняется тем, что мультимедиа – это взаимодействие видео и аудио эффектов под управлением интерактивного программного обеспечения с использованием современных технических и программных средств, которые объединяют текст, звук, графику, фото и видео в одном цифровом формате [8]. Поскольку мультимедийные средства могут быть представлены различными форматами, то их использование дает возможность упрощения восприятия информации студентом. Использование мультимедиа дает возможность представления информации не только в текстовом виде, но и с аудио или видео сопровождением. Онлайн мультимедиа стала объектно-ориентированной, позволяя потребителю работать с информацией, не обладая специальными знаниями.

Мультимедийные технологии преподавания безопасности жизнедеятельности в высшей школе не могут заменить преподавателя, но они могут усовершенствовать и разнообразить его деятельность, тем самым повысить качество обучения студентов. Учеными-психологами, занимающимися процессами усвоения знаний, доказано, что человек при изучении какого-либо материала запоминает 20 % видеоинформации, 30 % аудиоинформации и 30 % – через деятельность. Если же соединить то, что студенты видят, слышат и делают, то продуктивность усвоения составит 80 %.

Мультимедийные технологии в процессе преподавания могут охватывать электронные учебники, презентацию информации с помощью программы MS PowerPoint, видео метод, электронную почту, ролевые игры, электронные интерактивные доски и др.

Электронные учебники дают возможность преподавателю находить индивидуальный подход к обучаемым, повысить мотивацию студентов к обучению. Преимуществами электронных учебников являются наглядность подачи материала, возможность корректировки учебника и адаптация его к уровню и требованиям дисциплины, самоконтроль прохождения материала, обратная связь, легкость в применении и использовании.

Презентация информации (по самостоятельно подобранным материалам) с помощью программы Power Point дает возможность охватить все виды деятельности при проведении занятий. Самостоятельно подобранный преподавателем материал является наиболее направленным и целесообразным для презентации, поскольку преподаватель готовит и подбирает информацию в соответствии с требованиями университетской и профессионально направленной специализации.

Видео метод – это высокоэффективная возможность подачи информации, поскольку основным преимуществом этого метода является

наглядность информации, которая более доступна для восприятия, а, следовательно, является более легкой и быстрой в усвоении.

Электронная почта выступает одним из вспомогательных методов функции контроля, а также дополнительным методом общения. Студенты имеют возможность уточнять информацию или решать вопросы, возникшие во внеаудиторное время, тем самым более качественно готовить домашние задания, выполняя все требования преподавателя.

Использование ролевых игр дает возможность участникам общаться друг с другом, играя определенную роль. Студенты должны найти информацию, необходимую для выполнения своей роли, которая стимулирует самостоятельность студента в поиске и подборе необходимой и интересной информации.

Электронные интерактивные доски являются наиболее универсальной и эффективной мультимедийной технологией в процессе обучения. С помощью электронной интерактивной доски исследуемый материал подается в полном объеме и четко вырисовывается на экране, что включает каждого студента в активную деятельность на занятии.

Исследователь Г. Мальченко отмечает, что использование средств мультимедиа с целью повторения, обобщения и систематизации знаний не только помогает создать конкретное, наглядно-образное представление о предмете, явлении или событии, которые изучаются, но и дополнить известное новыми данными. Происходит не только процесс познания, воспроизведения и уточнения уже известного, но и углубление знаний. Во время работы с учебной программой важно сосредоточить внимание обучаемых на наиболее сложной для усвоения части, активизировать самостоятельную поисковую деятельность учащихся [6].

Безусловно, важной составляющей информатизации образовательного процесса является накопление опыта использования мультимедийных средств в учебном процессе, отраженный в работах Н.И. Белей, Н.П. Дементиевськой, Н.В. Морзе, М.И. Жалдак, А. П. Окопелова и др. [1, 3, 5, 9].

Для преподавателя и студента, компьютер сегодня является помощником, который помогает моделировать и иллюстрировать процессы, явления, объекты. Особенно важно, что современные компьютерные технологии в сочетании с новейшими образовательными технологиями становятся эффективными средствами развития мышления как студентов, так и преподавателей.

Все вышеперечисленные факторы требуют от современного педагога быть всесторонне развитым, а также идти «в ногу» с научным прогрессом. Кроме знания дисциплины, методик изложения информации, педагог должен обладать знаниями компьютерных технологий и уметь внедрять их в учебный процесс. Это обусловливает актуальность использования мультимедийных систем в учебном процессе.

Остановимся более подробно на использовании мультимедийных технологий при проведении занятий по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» в Донецком национальном техническом университете.

Одной из наиболее активно применяемых технологий является мультимедийная презентация (рис. 1). Нельзя не согласиться, что наиболее эффективно запоминаются те сведения, которые одновременно влияют на несколько органов чувств, когда в работу включены различные сигнализаторы. Именно этим объясняется роль мультимедийных презентаций в деятельности современного учебного заведения.

Рис. 1. Применение мультимедийной презентации при изучении дисциплины «Безопасность жизнедеятельности»

Как сказано ранее, понятие мультимедиа объединяет разнообразные информационные объекты, такие как текст, графику, видео, анимацию и звук [14], которые могут использоваться как студентами, так и преподавателями при проектировании собственных разработок. При этом ими применяются инструментальные средства разработки обучающих мультимедиа-материалов для формирования гиперссылок между фрагментами содержательных частей, обеспечения интерактивности и создания многослойных модульных структур, включающих цифровые фотографии, сканированные изображения, фрагменты фильмов и текстов.

Среди огромного многообразия учебных мультимедийных систем мультимедийные презентации – это одно из самых функциональных и эффективных компьютерных средств обучения.

В научной литературе на сегодняшний день не существует единой классификации презентаций.

Исследователь Л.И. Ястребов [14] предлагает классифицировать презентации по степени их «оживления» различными эффектами. Он выделяет следующие группы:

- официальная презентация (разного рода отчеты, доклады и т.п. перед серьезной аудиторией) – это презентация, в которой необходимы строгий дизайн, выдержанность, единый шаблон оформления для всех слайдов, требуется четкое структурирование и размещение на слайдах всех тезисов;
- официально эмоциональная презентация используется для двух целей: передать слушателям некоторые официальные сведения и вдохновить их, убедить в чем-нибудь;
- «плакаты» – в этом случае презентация состоит только из иллюстративного материала. На слайдах – только иллюстрации с минимумом подписей, компьютер используется как обычный слайд-проектор. Вся работа по объяснению содержания возлагается на ответчика;
- «двойное действие» – на слайдах презентации кроме изображений используется текст, который может либо объяснять содержание слайда, либо «расширять» его;
- интерактивный семинар создается для проведения семинара в режиме диалога с аудиторией. Становятся допустимыми различные анимации, движущиеся рисунки, фотографии, вращающиеся объекты навигации, и особенно - разветвления презентации: в зависимости от ответов слушатели, их реакции на вопросы и утверждения;
- электронный раздаточный материал – информация должна преподноситься исчерпывающе подробно, поскольку у слушателя нет возможности переспрашивать докладчика. Дополнительный материал может содержаться в ссылках или в специальных заметках к слайду. Если презентация предназначена для самостоятельного изучения, ее интерфейс, навигация по слайдам, возможности разветвления должны быть хорошо продуманы и обоснованы;
- «информационный ролик» должен демонстрироваться самостоятельно и независимо от докладчика, причем автоматически возвращаться к его началу. Весь показ проходит в автоматическом режиме. Презентация содержит материалы информационно-рекламного характера, наглядные материалы, рассчитанные на быстрое восприятие. Такая презентация может использоваться на выставках. Хорошо, когда она сопровождается дикторским поясняющим текстом.

Использование мультимедийных презентаций на занятиях по безопасности жизнедеятельности позволяет подавать материал студентам как систему ярких опорных образов, наполненных исчерпывающей структурированной информацией в алгоритмическом порядке.

В различных ситуациях мультимедийные презентации имеют разные дидактические функциональные назначения: служат опорой (слуховой, зрительной) для дальнейшего усвоения студентами знаний; иллюстрацией или средством повторения и обобщения учебного материала; заменяют традиционное пособие – книгу. В любом случае мультимедийные презентации являются основным или дополнительным источником знаний и представлений.

Презентация как компьютерный документ представляет собой последовательность сменяющих друг друга слайдов. Демонстрация такого документа может происходить на экране монитора компьютера или на большом экране с помощью специальных устройств – мультимедийного проектора, проекционного экрана и т.п. Студенты видят чередование изображений, на каждом из которых могут быть представлены текст, фотографии, рисунки, диаграммы, графики, видеофрагменты, и все это может сопровождаться звуковым оформлением – музыкой или голосовым комментарием преподавателя.

При демонстрации объекты могут сразу отображаться на слайдах, а могут появляться на них в определенное время, установленное преподавателем для усиления наглядности излагаемого материала и акцентирования внимания на особо важных моментах его содержания.

Опираясь на собственный опыт, можем отметить, что систематическое использование мультимедийных презентаций в учебном процессе на занятиях по безопасности жизнедеятельности дает возможность:

1) повысить информативность различных форм обучения;

2) стимулировать мотивацию обучения; повысить наглядность обучения;

3) реализовать доступность восприятия данных за счет параллельного представления по нескольким каналам;

4) «держать» внимание аудитории за счет целесообразно примененной анимации и звуковых эффектов.

Наряду с существенными преимуществами использования в процессе обучения мультимедийных презентаций, имеются определенные ограничения их применения: разработка может потребовать значительных временных и финансовых затрат; системы мультимедиа представляют насыщенное информационное пространство и для того чтобы эксплуатировать их в полном объеме, нужен отбор значительного количества материала, что также связано с большими затратами времени.

Таким образом, информационные технологические средства преподавания безопасности жизнедеятельности в высшей школе дают возможность усовершенствовать методы подачи информации. Мультимедийные технологии помогают преподавателю данной дисциплины корректировать учебный процесс, учитывая интересы и

возможности отдельных студентов, реализовывать личностно-ориентированный подход в обучении и обеспечивать дифференциацию обучения. Внедрение инновационных технологий обогащает содержание образовательного процесса, повышает мотивацию к изучению дисциплины со стороны студентов и ведет к более тесному сотрудничеству между преподавателем и студентами.

Также важно отметить, что мультимедийные технологии, такие как инновация в преподавании безопасности жизнедеятельности, имеют по сравнению с традиционными формами обучения явные преимущества, поскольку повышают мотивацию студентов к изучению дисциплины, улучшают качество усвоения материала; развивают познавательную активность студентов; улучшают условия управления вниманием обучаемых при работе с аудиовизуальными средствами обучения; стимулируют самостоятельность студентов в изучении, поиске, подборе и обработке информации, что, в свою очередь, ускоряет процесс обучения. Используя современные инновационные технологии, высшая школа имеет возможность готовить высококвалифицированных специалистов с глубокими знаниями в определенной отрасли. Иными словами, применение мультимедийных средств обучения придает занятию актуальную новизну. Содержание и форма изложения материала на таких занятиях дают возможность воспроизведения за короткое время значительного объема информации, а также подачи его в необычном аспекте, что вызывает у обучаемых новые образы, формирует и детализирует нечетко сложившиеся представления и углубляет полученные знания, что позитивно влияет на процесс обучения в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белей Н.І. Педагогічний дизайн мультимедійного уроку/ Н.І. Белей // Зарубіжна література в школах України. – 2009. – № 9. – С. 3-5.
2. Всемирный доклад по образованию, 1998 г.: Учителя, педагогическая деятельность и новые технологии / ЮНЕСКО. – Париж : ЮНЕСКО, 1998. – 175 с.
3. Дементієвська Н.П. Як можна комп’ютерні технології використати для розвитку учнів та вчителів / Н.П. Дементієвська, Н.В. Морзе // Актуальні проблеми психології: Психологічна теорія і технологія навчання / За ред. С.Д. Максименка, М.Л. Смульсон. – К.: Міленіум, 2005. – Т. 8, вип. 1. – С. 23–38.
4. Євдокимов В.І., Пономарьова Г.Ф., Луценко В.В., Агапова Т.П. та ін. Ефективність навчання студентів: Навчальний посібник / За ред. В.І. Євдокимова. – Харків: ХНПУ ім. Г.С.Сковороди, 2004. – 222 с.
5. Жалдак М.І. Педагогічний потенціал комп’ютерно-орієнтованих систем навчання математики / М.І. Жалдак // Проблеми інформатизації навчального процесу в школі та вищому

педагогічному закладі: Наукова школа Жалдак Мирослава Івановича. – К., 2006. – С. 32-49.
6. Інтерактивне навчання на уроках хімії / Упоряд. Г. Мальченко, О. Каретникова. – К.: Ред. загальнопед. газ., 2004. – 128 с.
7. Інформатика: Комп'ютерна техніка. Комп'ютерні технології: підручник для студентів вищих навчальних закладів / за ред. О.І Пушкаря. – К.: «Академія», 2002. – 704 с.
8. Молянинова О.Г. Мультимедиа в образовании (теоретические основы и методика использования): Монография. – Красноярск: Изд. КрасГУ, 2002. – 300 с.
9. Окопелов О.П. Процесс обучения в виртуальном образовательном пространстве / О.П. Окопелов // Информатика и образование. – 2001. – № 3. – С. 12-14.
10. Основи нових інформаційних технологій навчання: посіб. для вчителів / за ред. Ю.І. Машбиця. – К. : ІЗМН, 1997. – 264 с.
11. Пінчук О. Проблема визначення мультимедіа в освіті: технологічний аспект / О. Пінчук // Нові технології навчання. – К., 2007. – Вип. 46. – С. 55-58.
12. Стефаненко П.В. Дистанционная система обучения в высшей школе. Монография. – Киев, 2012. – 396 с.
13. Шлыкова О. Культура мультимедиа: учеб. пособие для студ. вузов / О. Шлыкова. – М. : Фаир-Пресс, 2004. – 415 с.
14. Ястребов Л.И. Создание презентации и техника эффективного выступления / Л.И. Ястребов // Открытый класс. Сетевые образовательные сообщества. – (дата обращения: 27.03.2016). [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.openclass.ru/node/185606.

K.V. Novikova

THE USE OF MULTIMEDIA TECHNOLOGY IN TEACHING DISCIPLINE LIFE SAFETY

Institute of Civil Protection of Donbass
Donetsk National Technical University

Abstract

The paper discusses the multimedia technology in the teaching of discipline "Life Safety" in high school. It is suggested the use of multimedia presentations that will increase the motivation of students to learn discipline, improve the quality of learning material, to stimulate the learner autonomy in learning, searching, selection and processing of information, which in turn will accelerate the learning process.

Key words: multimedia, technology, electronic textbook, presentation, projection screen, video-method, life safety, the electronic board, improving the quality of education.

REFERENCES

[1] Beley N.I. Teaching design of multimedia lesson / N.I. Beley // Foreign Literature in schools in Ukraine. 2009. №9. Pp. 3-5. (ukr.)
[2] World Education Report, 1998.: Teachers, educational activities and new technologies / UNESCO. Paris: UNESCO, 1998. 175 p.
[3] Dementiyevska N.P. How to use computer technology to the development of students and teachers / N.P. Dementiyevska, N.V. Morse // Actual problems of psychology: Psychological Theory and technology education / Ed. S.D. Maksimenko, M.L. Smulson. K .: Millenium, 2005. Vol 8, no. 1. Pp. 23-38. (ukr.)
[4] Evdokimov V.I., Ponomarev G.F., Lutsenko V.V., Agapov T.P. etc. The effectiveness of student learning: Textbook / Ed. V.I. Yevdokimov. Kharkov: HNPU them. G.S. Skovoroda, 2004. 222 p. (ukr.)
[5] Zhaldak M.I. Educational potential of computer-oriented mathematics teaching / M.I. Zhaldak // Problems of informatization of educational process in schools and higher educational establishments, scientific school Zhaldak Miroslav Ivanovich. K., 2006. Pp. 32-49. (ukr.)
[6] Online training in chemistry lessons / Compilation. Malchenko G., A. Karetnikova. K . Ed. zahalnoped. gas., 2004. 128 p. (ukr.)
[7] Informatics: Computer equipment. Computer technologies: a textbook for university students / ed. A.I. Pushkar. K., "Academy", 2002. 704 p. (ukr.)
[8] Smolyanynova A.G. Multimedia in education (Theoretical Fundamentals and Methods of Using): monograph. Krasnoyarsk: Ed. KrasHU, 2002. 300 p. (rus.)
[9] Okolelov O.P. Process of learning in a virtual educational space / Okolelov O.P. // Computer science and education. 2001. №3. Pp. 12-14. (rus.)
[10] Fundamentals of New Information Technologies: Training Manual. teachers / ed. Yu.I. Mashbytsya. K: IZMN, 1997. 264 p. (ukr.)
[11] Pinchuk O. The problem of definition multimedia in education: technological aspect / O. Pinchuk // New technology training. K., 2007. Vol. 46. Pp. 55-58. (ukr.)
[12] Stefanenko P.V. Remote system of education in higher education. Monograph. Kyiv, 2012. 396 p. (rus.)
[13] Shlykova O. Media Culture: a textbook for university students / O. Shlykova . Moscow. Fair-Press, 2004. 415 p. (rus.)
[14] Jastrebov L.I. Creation of presentations and technology effective performance [electronic resource] / L.I. Jastrebov // Open class. Networked learning communities. - 27 March 2016 - Mode of access: http://www.openclass.ru/node/185606. (rus.)

УДК 378.147.041; DOI 10.1872/MMF-2016-16

П. В. Стефаненко

ПУТИ АКТИВИЗАЦИИ УЧЕБНО-ПОЗНАВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ

Павел Викторович Стефаненко, д.пед.н., профессор
Институт гражданской защиты Донбасса
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: spv@igzd.dgtu.ua

Аннотация

В работе рассмотрены актуальные вопросы высшего профессионального образования, акцентирована необходимость поиска новых методологических подходов к профессиональной подготовке будущих специалистов инженерной отрасли, освещены современные тенденции переориентации высшей школы. Результаты исследования показали, что одним из эффективных путей решения поставленной задачи является активизация учебно-познавательной активности и самостоятельности студентов в процессе обучения. Внедрение указанных методик в практику высшего профессионального образования значительно повышает эффективность подготовки специалистов инженерных специальностей, которые должны уметь не только осуществлять эффективное управление работой современных объектов, но и применять приобретенные знания и умения, демонстрируя профессиональный подход к своей деятельности, решая профессиональные задачи в новом, более широком контексте.

Ключевые слова: перестройка высшего профессионального образования, инновационные технологии, информационные технологии, проблемное обучение, познавательная активность обучаемых, активизация учебно-познавательной деятельности, мотивация, самообразование.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.

Социально-экономические преобразования, происходящие на современном этапе развития общества, неизбежно влекут за собой перестройку образовательной системы высшей школы, обуславливают в образовании стремительные инновационные процессы. Переориентация

ценностей, которые воспринимаются системой образования как социальный заказ, актуализировала новые требования к личности, специалисту, гражданину [2, с. 44]. Стремительное развитие и внедрение новой техники вызывает потребность не только в специалистах высокой квалификации, способных обслуживать и осуществлять эффективное управление работой современных инженерных объектов, но и инженерах, которые могут применять приобретенные знания и умения, демонстрируя профессиональный подход к своей деятельности, интегрировать знания и обладать компетенциями, решать задачи в новом, более широком контексте. Кроме того, период обучения в техническом вузе для будущего инженера характеризуется становлением его личности, формированием общекультурных ценностей и ориентиров [13, с. 49]. Поэтому подготовка высококвалифицированных специалистов, способных решать перечисленные выше сложные профессиональные задачи с учетом растущих требований общества – главная задача, стоящая перед профессорско-преподавательским составом образовательных учреждений высшего профессионального образования. Для успешного ее решения одним из важнейших условий является анализ мотивов обучения, факторов, положительно влияющих на процесс усвоения знаний, применение активных форм, методов и приемов проведения учебных занятий для активизации учебно-познавательной деятельности обучаемых. Рассмотрению некоторых из них и посвящена данная статья.

Изложение основного материала исследования.

«Плохой учитель преподносит истину, хороший учит ее находить», – эти высказывания А. Дистервега как ничто другое характеризует сущность проблемного обучения, к которому часто обращаются преподаватели в стремлении найти правильный подход к выбору наиболее эффективных форм и методов проведения занятий.

Как известно, интерес к вопросу проблемного обучения у ученых появился еще в 70-е годы прошлого века. Разработкой понятия и содержания проблемного обучения в свое время активно занимались такие видные ученые, как И.Я. Лернер, М.И. Махмутов, П.И. Пидкасистый [9, 11, 13]. Вопросам теории и методики проблемного обучения в высшей школе уделяли внимание Ю.В. Акимов, А.М. Данченко, В.И. Мальков, Т.А. Ильина и др. [1].

Проблемному обучению посвящены многие труды ученных и исследователей, однако в педагогических коллективах до сих пор идут дискуссии по поводу того, какое же обучение считать проблемным на современном этапе развития педагогической науки и как наиболее эффективно использовать методы и приемы проблемного обучения при подготовке будущих инженеров.

Ошибочным является мнение, что при проблемном обучении достаточно «подвести» студентов к узловым проблемным вопросам темы или курса и лишь обозначить пути их решения, или решить на репродуктивном уровне. Однако это ничего общего с проблемным обучением не имеет. Общеизвестно, что проблемное обучение направлено не только на усвоение обучаемыми научных выводов, но и на овладение техникой их получения, на стимулирование у будущих специалистов познавательной активности, развития творческих способностей, формирования диалектического мышления, желания и навыков самостоятельного решения возникающих задач.

Сущность проблемного обучения состоит в том, что обучаемые, с помощью преподавателя и побуждаемые им, проникая в суть диалектического мышления, повторяют путь научного познания и приходят к раскрытию смысла новых понятий и отношений к новым научным выводам. Следовательно, для придания обучению проблемной направленности преподаватель должен обеспечить условия, при которых обучаемый в силу внутренней необходимости мобилизует свою познавательную активность на интенсивную мыслительную деятельность в поиске новых знаний. Совокупность таких условий называется «проблемной ситуацией», которая является сущностной характеристикой, отличительным признаком проблемного обучения.

Проблемные ситуации создаются в результате постановки обучаемыми проблемных учебных задач и вопросов, учебных проблем, а также образования предпосылок для усмотрения ими этих проблем в содержании учебного материала.

Под задачей, ссылаясь на словарь по педагогической психологии, будем понимать «цель деятельности, заданную в определенных условиях и требующую для своего достижения использования адекватных для этих условий средств» [4]. А учебная задача – это информационная система, которая воспринимается обучаемыми как требующая определенных действий.

Согласно Н.И. Кондакову [8], понятие «вопрос» трактуется как «задача, требующая решения». Как и задача, вопрос может рассматриваться как информационная система, но в структуру задачи обязательно должны входить три компонента – данные, требования и неизвестное, тогда как для структуры вопроса это не обязательно.

Проблема же, по С.М. Вишняковой, – это «сложный теоретический или практический вопрос, требующий изучения, разрешения» [3]. Если имеющихся у студентов знаний и опыта их использования недостаточно для

решения конкретной учебной задачи, она становится для них проблемной, или учебной проблемой.

Проблемная ситуация – это «состояние умственного затруднения, вызванного в определенной учебной ситуации объективной недостаточностью ранее усвоенных учащимися знаний и способов умственной и практической деятельности для решения возникшей познавательной задачи» [4]. Следовательно, проблемность – понятие субъективное. Учебная задача, которую обучаемый в состоянии решить привычными способами на основе имеющихся знаний, не воспринимается им как проблема, проблемной для него не является.

Таким образом, проблема – это нестандартная задача, для решения которой требуется поиск новых, недостающих знаний или новых путей применения прежних знаний. Ее еще называют поисковой задачей.

С другой стороны, не всякая проблема является задачей. Проблему можно «видеть», скажем, столкнувшись с противоречием, но задачей она становится, когда принимается к решению.

Проблемный вопрос отличается от обычного тем, что ориентирован на противоречивую ситуацию, и для ответа на него также необходимы новые знания и действия. Он может входить в структуру проблемной задачи и играть роль одного из ее элементов – требования.

Отсутствие у студентов каких-либо знаний по вопросу обуславливает повышение познавательного затруднения – уровня проблемности, а вот станут ли они решать такую или менее сложную учебную проблему и что их к тому побуждает – это уже вопрос о проблемной ситуации, требующий особого внимания, тем более что в современной дидактике не все акценты в нем расставлены утвердительно.

Содержащиеся в проблемной задаче противоречия между ее элементами, а также между ее требованием и отсутствием решения привычными способами и с помощью имеющихся знаний воспринимаются обучаемыми как противоречие между знанием и незнанием. Наиболее характерными проявлениями этого дидактического противоречия являются следующие:

- между старыми, ложными, обыденными и новыми, истинными, научными знаниями, которыми предстоит овладеть как в процессе, так и в результате решения проблемы;
- между имеющимися знаниями и реальными фактами;
- между привычными и требуемыми для решения проблемы условиями применения имеющихся знаний и привычных способов действий.

Встречаясь с содержащимися в проблеме противоречиями, обучаемые испытывают познавательные затруднения, ощущение проблемности.

Выдающийся психолог С.Л. Рубинштейн, говоря о том, что побуждает обучаемых преодолеть эти затруднения, отмечает: «Начальным моментом мыслительного процесса является проблемная ситуация. Мыслить человек начинает, когда у него возникает потребность что-то понять. Мышление обычно начинается с проблемы или вопроса, с удивления или недоумения, с противоречия. Этой проблемной ситуацией и определяется вовлечение личности в мыслительный процесс» [12, с. 347].

Из этого следует, что, во-первых, побудителями творческого поиска является «потребность что-то понять»; во-вторых, момент возникновения этой потребности означает образование проблемной ситуации и становится началом процесса мышления и, в-третьих, собственно мышление начинается с эмоционально окрашенного осознания противоречия, лежащего в основе проблемы. Отметим, что главная роль в организации творческого процесса принадлежит «потребности что-то понять», вне связи с которой не могут быть правильно установлены ни структура, ни роль, ни характер изменения проблемной ситуации.

А начинается все с постановки проблемы педагогам, или столкновения обучаемого с противоречивыми обстоятельствами в ходе изложения преподавателем учебного материала, или такого же столкновения, но в ходе самостоятельной, либо исследовательской работы. Наталкиваясь на какую-то преграду обучаемый испытывает познавательное затруднение, сопровождаемое эмоциональными переживаниями неопределенности (удивлением, недоумением, сомнением). С этого момента – возникновение познавательного затруднения – начинается формирование проблемной ситуации.

Ощутив какое-то затруднение, обучаемый, прежде чем приступить к его преодолению, осознает важность, значимость проблемы для себя, необходимость ее решения, т.е. соотноситься с личными целями деятельности, находит место проблемы в системе личностных целей, иначе говоря, вырабатывает свое мотивационно-ценностное отношение к ней. При этом процесс принятия проблемы к решению и самого решения может развиваться по одному из шести возможных вариантов, встречающихся в учебной практике.

Первый вариант: необходимость решения проблемы осознана и обучаемый испытывает к ней интерес. Под интересом следует понимать мотив, действующий в силу осознанной значимости проблемы и ее эмоциональной привлекательности. Таким образом, данный вариант характерен наличием двух мотивов принятия проблемы к решению – осознанием ее важности и интересом к ней. При осознании обучаемым соответствующего уровня своих интеллектуальных возможностей над

действием обоих мотивов проблема переходит во внутренний план личности обучаемого и становится таким образом его собственной проблемой. В результате чего, в зависимости от уровня исходных мотивов, появляется желание понять и решить проблему. Иными словами, происходит осознание обучаемым сути содержащегося в проблеме противоречия, формируется собственно проблема и запускается процесс ее решения.

Второй вариант: важность проблемы не осознана, но обучаемый испытывает к ней интерес. В данном случае, если проблема привлекательна для обучаемого в интеллектуальном плане, то при осознании ее посильности и в зависимости от степени этой привлекательности интерес к ней приводит к возникновению желания или потребности ее решения и образованию проблемной ситуации, которые здесь оказываются вторичными по отношению к интересу. Если источником проблемной ситуации было желание-интерес, усиливаясь, может вырасти до такого уровня, что в определенный момент желание перерастет в потребность. Но может быть и так, что под влиянием трудностей, с которыми обучаемый сталкивается в процессе решения, интерес к нему превращается в свою противоположность, компенсируя желание.

Третий вариант: важность, необходимость решения проблемы осознаны, но обучаемый интереса к ней не испытывает. Тогда при осознании ее посильности и проблема принимается к решению под влиянием осознания важности.

Четвертый вариант: важность, необходимость решения проблемы осознаны, но обучаемый испытывает к ней антипатию. Тогда при осознании ее посильности и проблема принимается к решению под влиянием осознания важности.

Пятый вариант: важность проблемы не осознана и у обучаемого интереса к ней нет. Или, более того, он испытывает к ней антипатию. В таком случае, что естественно, проблема остается вне зоны его внимания.

Шестой вариант: осознается незначительность проблемы. В этом случае об интересе речи нет, так как в этих условиях он просто невозможен.

Таким образом, на основании проведенного анализа мотивационной стороны процесса принятия проблемы к решению и самого решения можно сделать следующие выводы:

1) формирование проблемной ситуации начинается в момент возникновения затруднения и завершается в момент принятия проблемы к решению – одновременно с появлением желания или потребности в решении проблемы и под их влиянием;

2) включая в свою структуру желания или потребность к поиску, проблемная ситуация с необходимостью вызывает принятие проблемы к решению, т.е. в творческий поиск вовлекается всякая проблемная ситуация;

3) источниками желания или потребности в решении проблемы, при чем одинаково важными, становится ее значимость для обучаемого;

4) проблемная ситуация исчезает в момент удовлетворения познавательного желания или потребности – момент преодоления затруднения, т.е. завершение решения проблемы;

5) проблемная ситуация характеризуется проявлением интереса к ней, при этом такой интерес выполняет роль мощного стимула творческого поиска.

Если же на каком-либо этапе решения обучаемый «сходит с дистанции», то это случается либо вследствие слабого желания, низкого интереса или неверно оцененной посильности, либо говорит о том, что потребность в решении проблемы оказалась недостаточной, и победа другой, более сильной, потребности «сталкивается» в борьбе с потребностью к поиску, заставляя изменять планы. При этом проблемная ситуация прекращает свое существование одновременно с исчезновением желания или потребности в решении проблемы.

Подведя итог сказанному, можно проблемную ситуацию определить как сложное динамическое состояние психики обучаемого, которое с необходимостью вовлекает его в решение проблемы и характеризуется предельной устремленностью к истине и максимальной активностью творческого поиска.

В психолого-педагогической литературе нередко встречается понимание проблемной ситуации лишь как этапа решения проблемы. Такая точка зрения – результат достаточно однобокого толкования проблемной ситуации – только как ситуации познавательного затруднения. Вместе с тем, с точки зрения педагогической целесообразности, традиционное представление о проблемной ситуации значительно менее предпочтительно, чем определение ее как психического состояния, вовлекающего обучаемого в решение проблемы. Так как создание затруднения само по себе не имеет никакого смысла, если не обеспечены все условия, побуждающие к его преодолению.

Анализируя сказанное, отметим, что условиями создания проблемной ситуации является, во-первых, трудность учебной задачи, преодоление которой требует от обучаемого поиска новых недостающих знаний или новых способов действия, т.е. наличие проблемы; во-вторых, важность; в-третьих, эмоциональная привлекательность и, в-четвертых, посильность проблемы для обучаемого.

Эти условия подчеркивают субъективный характер проблемной ситуации.

«Попадание» обучаемого в проблемную ситуацию зачастую зависит от постановки проблемы и умения преподавателя формулировать ее в проблемном ключе.

Педагогически верная постановка вопроса, помогающая обучаемым «увидеть» проблему, охватывает не только содержательную ее сторону, но и, что не менее важно, формальную: эмоции и артистизм педагога не оставят без внимания никого из них.

Поскольку осознание противоречия, как было сказано ранее, уже само по себе может составлять для обучаемого проблему, постановка вопроса, затрудняющая или облегчающая ему это осознание, фактически повышает или снижает уровень проблемности учебной задачи. В связи с этим опытный преподаватель, выбирая тот или иной вариант формулировки проблемы, в различной степени затеняющий содержащееся в ней противоречие, в каждом конкретном случае учитывает интеллектуальные возможности обучаемых.

Помимо соответствующей формулировки проблемы уровень проблемности задачи может быть снижен и в результате применения педагогом подсказок, например, в виде наводящих вопросов.

По степени самостоятельности творческого поиска обучаемых при проблемном обучении различают три его формы (уровня): проблемное изложение материала, частично-поисковая деятельность и самостоятельная исследовательская деятельность.

При проблемном изложении сообщение нового материала осуществляет сам преподаватель, хотя и вовлекает в мыслительную работу обучаемых. В высшей школе проблемное изложение применяется прежде всего при чтении проблемной лекции. Педагог сам формулирует и решает учебные проблемы. При этом, излагая материал, он размышляет, сомневается, намекает, отвергает, обосновывает и принимает возможные пути решения той или иной учебной проблемы, используя весь «арсенал» мыслительных операций: анализ, синтез, сравнение, систематизацию, обобщение и др. «Проговаривая» логику поиска правильного решения, размышлениями «вслух» преподаватель как бы приглашает обучаемых приобщиться к этому процессу.

Вовлечению обучаемых в решение учебных проблем в ходе проблемной лекции способствуют следующие основные методические приемы:

- освещение истории научной проблемы и той борьбы, которой сопровождался поиск путей ее разрешения;
- ознакомление с методами самой науки, с лабораторией научного поиска, анализа и оценки фактов и данных, предшествовавших получению научных результатов;

- предоставление обучаемым возможности выработать свою точку зрения при наличии спорных научных позиций;

- обращение к обучаемым с вопросом об их отношении к обсуждаемым проблемам;

- постановка проблемных вопросов в начале лекции, проблемно-риторических – по ходу лекции, а также проблемных вопросов, приводящих к ситуациям парадокса, неожиданности, конфликта, несоответствия, неопределенности, необходимости выбора;

- неполное освещение в лекции, особенно интересного для обучаемых материала и предоставление им возможности более глубокого самостоятельного его изучения с помощью дополнительной литературы [6, с. 16-18].

«Рассуждающее обучение» наиболее эффективно при прохождении нового или сложного для самостоятельного усвоения обучаемыми учебного материала. Характер учебной деятельности при этом репродуктивный, но несомненно достоинство такой формы проблемного обучения состоит в том, что обучаемые вслед за педагогом повторяют путь научного познания, формируя диалектическое мышление.

Частично-поисковая (эвристическая) деятельность обучаемых побуждается преподавателем с помощью проблемных, желательно, заранее продуманных вопросов, ответы на которые обучаемые ищут самостоятельно. Эта форма проблемного обучения используются чаще всего на семинарских, лабораторных и практических занятиях, хотя с успехом может применяться и в ходе диалоговой лекции.

Исследовательская деятельность. Обучаемые сами находят и формулируют для себя проблемы (возможно, на основе данных, предварительно предоставленных преподавателем) и самостоятельно решают их. Такая форма проблемного обучения наиболее характерна для курсового и дипломного проектирования и научно-исследовательской работы.

Как мы уже отмечали в предыдущих исследованиях, в реальной педагогической практике проблемное обучение всегда тесно сочетается с обучением репродуктивным, но для того чтобы на каждом занятии это сочетание приближалось к оптимальному, необходимо четко представлять условия целесообразного применения обоих типов обучения. Репродуктивное обучение может использоваться, когда содержание учебного материала: имеет преимущественно информативный характер; представляет собой описание способов практических действий; весьма сложное, вследствие чего обучаемые не в состоянии самостоятельно овладевать новыми знаниями; настолько новое, что у обучаемых отсутствуют опорные знания для самостоятельного решения учебных проблем. Применение же проблемного

обучения целесообразно, когда содержание учебного материала: нацелено на формирование понятий, а не на сообщение фактической информации; служит логическим продолжением изученного ранее, обеспечивая возможность реализации накопленного опыта и знаний; ведет к обобщениям; доступно для самостоятельных выводов обучаемых [15].

В опыте зарубежных и отечественных педагогов уже есть попытки построить весь университетский курс в виде комплекса проблемных задач, решая которые в определенной последовательности, студенты осваивают весь теоретический материал, при этом у них резко повышается заинтересованность в усвоении материала, на занятиях царит творческая атмосфера. Студенты задают преподавателю вопросы, не боятся вступить с ним в научный спор, всеми силами пытаясь найти аргументы в пользу своей точки зрения. Главным препятствием на пути к широкой реализации этого типа обучения является инерция педагога, и ее преодоление – профессиональный долг каждого из них.

Знание теоретических основ проблемного обучения, изложенного в этой статье, должно способствовать формированию у преподавателей высокого методического мастерства. Однако практика высшей школы показывает, что многие педагоги, даже обладая знаниями и мастерством, неохотно используют их в своей работе. Причины тому разные. Одна из них та, что проблемное обучение требует значительно больших временных затрат, чем традиционное, репродуктивное. В этой связи все больше последователей находят идеи усиления самостоятельного творческого мышления студентов, их личностной ориентации. Важную роль в обеспечении эффективности образовательного процесса играет его активизация, основанная на использовании новых педагогических технологий с использованием компьютерных технологий. Нововведения в современном образовании, связанные с применением обновленных технических средств, оказывают положительное влияние на развитие обучаемых. Так, к явным положительным результатам можно отнести развитие творческой составляющей в работе студента, увеличение его профессиональной мобильности. Как результат – изменяется специфика знаний, расширяется спектр навыков и умений [7]. Информационные технологии являются действительно ценными для образовательного процесса. Благодаря им студенты чаще работают самостоятельно, учатся извлекать новые данные из разных источников информации. Они обогащают обучающихся знаниями, при этом развивая их креативное и интеллектуальное мышление, создают яркую интерактивную картину обучения, в которой можно применять разнообразные возможности, как педагогу, так и студенту [6].

Таким образом, в настоящей статье исследованы актуальные проблемы совершенствования учебно-воспитательного процесса в высшей школе за счет внедрения в подготовку будущих инженеров проблемного обучения, позволяющего уже на этапе нахождения в стенах учебного заведения научиться мыслить творчески, самостоятельно и креативно, что является необходимым условием для последующей успешной трудовой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Ю.В. Вопросы теории и методики проблемного обучения в высшей военной школе / Ю.В. Акимов, А.М. Данченко, В.И. Мальков. – Л.: ВАС, 1981.
2. Борисова М.В. Мотивы обучения и образовательные барьеры (на материале дополнительного образования взрослых Канады) / М.В. Борисова // Вестник института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк, 2015. – Выпуск 4 (4). – С. 44–48.
3. Вишнякова С.М. Профессиональное образование Словарь. Ключевые понятия, термины, актуальная лексика / С.М. Вишнякова. – М.: НМЦ СПО, 1999. – 538 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://didacts.ru/dictionary/1057/word/problema (дата обращения: 14.03.16).
4. Гамезо М.В. Словарь по педагогической психологии / М.В. Гамезо. – М., 2001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://didacts.ru/dictionary/1023 (дата обращения: 14.03.16).
5. Горбунова Л.И. Использование информационных технологий в процессе обучения / Л.И. Горбунова, Е.А. Субботина // Молодой ученый. – 2013. – № 4. – С. 544-547.
6. Информационные технологии в образовании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://physics.herzen.spb.ru/teaching/materials/gosexam/b25.htm (дата обращения 12.12.2014).
7. Информационные технологии в образовании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.author-edu.ru/ru/node/249 (дата обращения: 18.11.2015).
8. Кондаков Н.И. Логический словарь-справочник / Н.И. Кондаков. – М.: Наука, 1975.
9. Лернер И.Я. Проблемное обучение / И.Я. Лернер. – М.: Знание, 1974. – 18 с.
10. Махмутов М.И. Организация проблемного обучения в школе / М.И. Махмуктов. – М.: Просвещение, 1977. – 30 с.
11. Махмутов М.И. Политическое самообразование / М.И. Махмутов // Организация проблемного обучения. – 1984, № 2. – 113 с.

12. Паниотова Д.Ю. Научно-методическое обеспечение процесса формирования общекультурной компетенции будущих инженеров / Д.Ю. Паниотова // Вестник института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк, 2015. – Выпуск 4 (4). – С. 49–53.
13. Пидкасистый П.И. Проблемное обучение-понятие и содержание: Аспекти логико-гносиологический и психолого-дидактический П.И. Пидкасистый // Вестник высшей школы. 1977. – № 12.
14. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии / С.Л. Рибинштейн. – М.: Учпедгиз, 1946.
15. Стефаненко П.В. Основы педагогики высшей школы / П.В. Стефаненко / Донецк: ДонГАУ, 1998. – 82 с.

P.V. Stefanenko

WAYS OF ACTIVATION OF EDUCATIONAL AND COGNITIVE ACTIVITY OF STUDENTS

Donetsk National Technical University, Donetsk

Abstract

In the paper are discussed the current issues of higher education, accentuated the necessity of finding new methodological approaches for professional training of future specialists of engineering branch, highlighted modern trends in the reorientation of higher education. The study results showed that one of the effective ways of solving the problem is activization of educational and cognitive activity and independence of students during the educational process. Implementation of these methods into practice of higher education greatly increases the effectiveness of training of specialists of engineering specialties, which should be able not only to carry out an effective work-management of modern engineering facilities, but also to apply the acquired knowledge's and skills, demonstrating a professional approach to their activities, solving professional problems in a new, wider context.

Key words: restructuring of higher education, innovative technologies, information technology, problem-based learning, mental activity of students, cognitive activity, activation of educational and cognitive activity, motivation, self-education.

REFERENCES

[1] Akimov Y.V. Theory and methodology questions of problem-based learning in higher military school / J.V. Akimov, A.M. Danchenko, V.I. Malkov. – L.: BAC, 1981. (rus.)

[2] Borisova M.V. Learning motives and educational barriers (based on additional education of adults in Canada) / M.V. Borisov // Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management: Scientific Journal. Donetsk, 2015. Issue 4 (4). Pp. 44–48. (rus.)
[3] Vishnjakova S.M. Professional education Dictionary. Key concepts, terminology, relevant vocabulary / S.M. Vishnjakova. – M.: NMC ACT, 1999. – 538 p. Available at: http://didacts.ru/dictionary/1057/word/problema (Accessed 14, March 2016). (rus.)
[4] Gamezo M.V. Dictionary of Educational Psychology / M.V. Gamezo. – M., 2001. Available at: http://didacts.ru/dictionary/1023 (Accessed 14, March 2016). (rus.)
[5] Gorbunova L.I. Use of information technology in the learning process / L.I. Gorbunova, E.A. Subbotina // Young scientist. 2013. № 4. Pp. 544–547. (rus.)
[6] Information technology in education. Available at: http://physics.herzen.spb.ru/teaching/materials/gosexam/b25.htm (Accessed 12, December 2014). (rus.)
[7] Information technology in education. Available at: http://www.author–edu.ru/ru/node/249 (Accessed 11, August 2015). (rus.)
[8] Kondakov N.I. Logical reference dictionary / N.I. Kondakov. Moscow. Science, 1975. (rus.)
[9] Lerner I.Y. Problem-based teaching / I.Y. Lerner. Moscow. Knowledge, 1974. 18 p. (rus.)
[10] Makhmutov M.I. Organization of problem-based learning in school / M.I. Mahmuktov. Moscow. Education, 1977. 30 p. (rus.)
[11] Makhmutov M.I. Political self-education / M.I. Makhmutov // Organization of problem-based learning. 1984, № 2. 113 p. (rus.)
[12] Paniotova D.Y. Scientific and methodological support of the formation process of future engineers cultural competence / D.Y. Paniotova // Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management: Scientific Journal. Donetsk, 2015. Issue 4 (4). Pp. 49–53. (rus.)
[13] Pidkasistiy P.I. Problem-based learning – concept and content: logic–gnosiological and psychological-didactical aspects. P.I. Pidkasistiy // High school digest. 1977. № 12. (rus.)
[14] Rubinstein S.L. Fundamentals of general psychology / S.L. Ribinshteyn. Moscow. Uchpedgiz, 1946. (rus.)
[15] Stefanenko P.V. Fundamentals of the Higher School Pedagogics / P.V. Stefanenko / Donetsk: Donetsk State Management Academy, 1998. 82 p. (rus.)

УДК 372.854; DOI 10.1872/MMF-2016-17

Н.П. Танцура[1], И.А. Соколов[2]

О РОЛИ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОЧНОМ ДНЕВНОМ И ЗАОЧНОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ. ОПЫТ ПОДГОТОВКИ И СЪЕМКИ ВИДЕО КУРСА

[1]Надежда Петровна Танцура, к.х.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: natan533@mail.ru

[2]Иван Аристидович Соколов, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой общей и неорганической химии
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: iasokolovspb@mail.ru

Аннотация

Доклад посвящен вопросам, связанным с необходимостью усиления роли самообразования студентов, подготовки видео курсов и электронных курсов как формам дистанционного обучения, способным существенно увеличить роль самостоятельной работы учащихся в образовательном процессе. Рассмотрен опыт подготовки и съемки видео курса и электронного курса лекций на примере дисциплины Химия, а также подводятся итоги этой работы и предлагаются рекомендации по подготовке курсов для дистанционного обучения.

Ключевые слова: самообучение, дистанционное обучение, видео курс, электронный курс лекций, критерии обученности, результаты самообразования.

Одной из основных задач, которая стоит перед преподавателем в высшей школе или любом другом образовательном учреждении является организация эффективного и качественного учебного процесса. Это подразумевает, прежде всего, поддержание на достаточно высоком уровне содержания модулей курса (или тематических разделов) любой дисциплины и высокий процент положительных результатов при анализе обратной связи с учащимся. Выполнить эти задачи в современных условиях возможно, в основном, как минимум, тремя способами:

1) установлением высокого порога ЕГЭ для тех, кто поступает в Высшую школу, т.е. набором абитуриентов готовых к глубокому и всестороннему освоению содержания различных дисциплин;

2) использованием новых эффективных образовательных технологий, включающих активизацию самостоятельной работы студентов и усиливающих непрерывный контроль за ее результатами;

3) готовностью Высшей школы в короткие сроки, особенно на первом курсе обучения, поднять уровень знаний приблизительно 20-30% студентов, т.е. повысить их степень готовности к освоению учебного материала.

Мы неоднократно проводили анализ итогов сессии 1 курса трех направлений подготовки ИММиТ (Металлургия, Материаловедение и технологии материалов и Нанотехнологии и микросистемная техника). Анализ показал, что удовлетворительно справляются с сессией студенты, которые имеют при поступлении в Политехнический университет на технические направления подготовки балл ЕГЭ превышающий 180 по математике, физике и русскому языку. Так, например, результаты сессии у студентов, имеющих ЕГЭ по трем дисциплинам в интервале 180-200 баллов, близки со студентами, имеющими баллы, превышающие 200 (но, в нашем примере, редко выше 220 баллов). В частности, количество студентов, имевших академические задолженности на 15.02.2016 в обеих выбранных категориях, составляло 30%. Студенты, имевшие менее 180 баллов ЕГЭ, представляют группу риска, слабо подготовленную к обучению на технических направлениях бакалавриата. А доля студентов, имевших среди них академические задолженности на 15.02.2016, составляла уже 60 % , т.е. превышала в два раза тот же показатель в группах студентов со 180-200 и более 200 баллов.

Учитывая выше сказанное, необходимо, особенно на младших курсах, искать эффективные пути организации самообразования студентов или самостоятельной работы по дисциплине и осуществлять постоянный контроль ее выполнения. Всем известно, что активная и постоянная самостоятельная работа студентов – это главный путь в образовании, приносящий прочные, глубокие и продуктивные знания. Для усиления роли самостоятельной работы в учебном процессе и контроля за ее выполнением, в частности, можно использовать различные формы дистанционного обучения как для студентов очного, так и для заочного отделения. Дистанционное обучение, как известно - это целенаправленный процесс интерактивного взаимодействия преподавателей и обучающихся, не привязанный строго к определенному пространству и времени. Это новая форма организации учебного процесса, базирующаяся на важнейшем принципе в образовании – принципе самостоятельного обучения студента и усилении его активной роли в образовательном процессе. Именно по этой причине дистанционное обучение признается одной из наиболее перспективных форм обучения. Отметим основные характеристики дистанционного обучения, которые делают его перспективным и привлекательным:

1) гибкость по месту, темпам освоения материала и времени обучения (каждый может учиться столько, сколько ему лично необходимо для освоения курса и получения необходимых знаний по дисциплине);

2) возможность многократного просмотра определенных разделов курса;

3) технологичность процесса обучения благодаря использованию современных технологий телекоммуникации;

4) модульность программ и, соответственно, курсов, то есть возможность формировать из автономных модулей учебную программу и курс лекций согласно индивидуальным и групповым потребностям;

5) экономичность образовательного процесса благодаря эффективному использованию служебных площадей и технических средств;

6) легкое осуществление обратной связи преподаватель-студент через общение по интернету, проверку домашних заданий и тестирование по блокам, модулям курса и всему курсу;

7) значительное число единовременно обучающихся студентов.

По сути, дистанционное обучение является новой технологией обучения, в центре которой учащийся, а не преподаватель. Главное в этой технологии – развитие у учащегося навыков самоообразования. Следует отметить также изменение роли преподавателя при реализации дистанционной формы обучения, главными задачами которого после подготовки и запуска дистанционного курса являются: координация учебного процесса, совершенствование его структуры и обеспечения, а также поддержание непрерывной обратной связи со студентами в период освоения курса и непрерывный контроль за их самостоятельной работой.

При дистанционном обучении чаще всего используют три формы представления материалов:

1) видео курсы, записанные профессиональными операторами с использованием специальной профессиональной аппаратуры, технологий и современных средств, которыми в период съемки пользуется преподаватель;

2) широкий спектр презентаций по курсу, по сути, представляющих опорные конспекты по модулям курса, которые позволяют более успешно и в короткие сроки сформировать у студентов основные представления по данному модулю курса, акцентировать внимание на целях, которые поставлены при изучении данного модуля, ознакомить с основными понятиями, законами, правилами и т.д.

3) методически грамотно составленные электронные курсы лекций или практических занятий:

разделение их на логически законченные модули, каждый из которых может изучаться отдельно;

четкое без лишних слов изложение материала с точки зрения логики и русского языка;

разбор в конце блоков модуля лекционного курса хотя бы 1-2-х примеров практических заданий, которые позволяют закрепить теоретический материал, выполнить домашние задания и пройти этапы выполнения КИМ (контрольно-измерительных материалов, как правило, в форме тестирования).

Безусловно, наиболее эффективной и современной, но требующей больших материальных затрат, формой дистанционного обучения являются видео курсы. Однако, это, в тоже время, наиболее сложная с методической точки зрения форма дистанционного обучения. Она требует от преподавателя больших затрат времени на подготовку к съемке, т.к. из-за большой стоимости подобных работ они не предполагают дублей (только в редких случаях необходимости пересъемки), а, следовательно, преподаватель, кроме подготовки материала, будет вынужден проводить репетиции дома перед каждой съемкой. Экспромты, в отличие от классических лекций при традиционной форме обучения, в этом случае, практически, не допустимы даже при большом опыте преподавания. При этом, кроме записи курса, преподаватель обязан представить также программу и план курса и его письменный электронный вариант в соответствии с требованиями Министерства образования.

Вместе с тем надо понимать, что дистанционное обучение в любой форме имеет определенные недостатки:

1) это отсутствие прямого общения с преподавателем или полная обезличенность общения;

2) высокая зависимость от технической инфраструктуры;

3) ориентация на технические средства и виртуальную среду;

4) необходимость постоянного обновления методического обеспечения. В частности, домашних заданий и КИМ -контрольно-измерительных материалов, например, в тестовой форме, к которым предъявляются определенные требования Министерства образования РФ. Они предполагают три вида КИМ: по блокам модуля курса, по модулям курса и итоговый КИМ. Два последних вида КИМ весьма объемные и содержат не менее 30 заданий в каждом. При этом КИМ по модулям курса и итоговый КИМ следует иметь в трех вариантах, чтобы предоставить студенту возможность их пересдачи;

5) высокие инвестиции на внесение изменений в дистанционное обучение;

6) сложность внесения оперативных изменений, в случае если дистанционное обучение уже началось;

7) отсутствие достаточного количества специалистов в сфере технологий дистанционного обучения, что может привести к низкому, по сравнению с традиционной формой, качеству обучения;

8) высокие инвестиции на подготовительном этапе проведения дистанционного обучения (инвестиции в разработку дистанционных курсов и съемку видео курсов);

9) отсутствие достаточной уверенности, что студент лично и самостоятельно проходит КИМ и демонстрирует собственные знания и умения.

Таким образом, хотелось бы подчеркнуть, что при использовании дистанционного обучения при очной дневной форме необходимо помнить о его недостатках и обязательно сочетать его с традиционными формами обучения. Ошибочным является представление о том, что дистанционный курс можно создать, переведя автоматически традиционный курс в электронный вид и предоставив его обучающимся. Необходимо понимать, что для обеспечения высокого качества образовательного процесса дистанционное обучение требует:

очень серьезного методического обеспечения, которое позволит наиболее рационально спроектировать деятельность учащегося;

изучения возможностей новых компьютерных технологий передачи информации и требований к этим технологиям;

тщательнейшую разработку и корректировку критериев обученности с учетом возможностей компьютерных технологий (или оценки уровня полученных знаний).

В связи с этим необходимо предотвращать излишнюю спешку в подготовке курсов с учетом выше приведенных требований, иначе сама идея дистанционного обучения может быть дискредитирована, а качество обучения может стать крайне низким по сравнению с традиционными формами. Необходимо также не забывать о главном достоинстве и ценности традиционных форм обучения - живом контакте студентов и преподавателей.

Дистанционное обучение, в особенности наиболее его дорогая форма – видео лекции, может успешно применяться, прежде всего, в заочном обучении, курсах повышения квалификации, при получении второго высшего образования. В двух последних видах использование дистанционного обучения особенно оправдано, поскольку обучающиеся имеют опыт учебы, знания и мотивацию.

Необходимо понимать и помнить, что, несмотря на все большее распространение, данная технология обучения не является до конца исследованной, что на практике может обернуться резким снижением качества получаемого с ее помощью образования (в сравнении с традиционной технологией). Вместе с тем указанная проблема может рассматриваться отчасти как «проблема роста», проблема поспешности перехода на эту форму обучения, проблема недостаточной подготовки преподавателей и недостаточного методического обеспечения относительно нового образовательного процесса.

В случае дневного очного обучения в престижных университетах дистанционное обучение даже при использовании видео лекций может рассматриваться только как одна из форм обучения. Например, на небольших по объему курсах или при освоении наименее сложных или, наоборот, наиболее сложных модулей курса, а также как вспомогательное обучение для усиления роли самостоятельной работы студентов и для повышения уровня их знаний по дисциплине.

Самое ценное в высшем образовании – это живое общение студентов с высоко квалифицированными, высоко образованными преподавателями. Общение с ними играет также очень важную воспитательную роль, поскольку большинство преподавателей высшей школы являются носителями моральных, нравственных и культурных ценностей. Все это крайне важно во времена, когда интернет привносит в жизнь и умы молодежи большое количество аморальных, негативных примеров и образцов поведения.

При подготовке дистанционных курсов, которые могут обеспечивать достаточно высокую эффективность образовательного процесса, необходимо учитывать, что:

1) преподавателям следует проходить курсы повышения квалификации по методическому обеспечению дистанционного обучения, его особенностям, формам и структуре представления КИМ по современным программам;

2) современная молодежь тяготеет к интернету и различным формам работы в нем в большей степени, чем большинство преподавателей;

2) современные студенты имеют, как правило, плохие навыки самостоятельной работы с литературой;

3) легче усваивают материал с применением презентаций, которые в сжатой (концентрированной) форме представляют каждый модуль курса перед его изучением;

4) использование традиционных электронных пособий к курсу, также желательно предварять презентациями по данному модулю (модулям) курса, которому посвящено учебное пособие, иначе в современных условиях эффективность его использования может оказаться низкой.

Теперь мы остановимся на первом варианте дистанционного 2-х семестрового курса химии для заочного обучения, основой которого стал видео курс лекций, снятый в конце 2014 начале 2015 года по заказу СПбПУ. Он снимался для использования на заочном отделении, а также в помощь студентам дневного отделения при изучении химии. Курс был представлен в интернете на сайте lectorium.tv осенью 2015 года и собрал более 1000 слушателей (школьники выпускных классов, студенты колледжей и высших учебных заведений). Курс бесплатный для слушателей. В 2016 году он будет вновь представлен в интернете в Лекториуме в конце сентября в помощь обучающимся, когда, в частности,

студенты 1 курса обычно начинают изучать химию в высших учебных заведениях и ощущать наличие проблем. В настоящее время этот курс слушают и смотрят студенты заочного отделения СПбПУ и проходят КИМ по блокам и модулям курса для получения аттестации по дисциплине Химия.

Одному из авторов было предложено записать видео курс, состоящий из 6 лекций, его объем составил 9 часов. Команда Лекториума, которая специализируется на записи различных курсов для дистанционного обучения и имеет опыт работы в этой области, предложила эффективную и методически обоснованную форму подачи материала небольшими блоками, связанную с тем, что большинство людей наиболее продуктивно воспринимают новый материал небольшими завершенными порциями (блоками модуля). Учитывалось также, что, чаще всего, слушатели активно воспринимают материал не более 20 минут, затем концентрация внимания начинает снижаться. По этой причине каждый модуль курса разбивался примерно на 10-15 –минутные законченные отрезки (блоки модуля), каждый из которых снимался отдельно, что позволяло в последующем при обнаружении дефектов легко переснять любой блок или даже часть блока.

Группа, производящая съемку, учитывала также, что практически все преподаватели не имеют опыта работы перед камерой и не знают особенностей этой работы. По этой причине последовательность записи лекций, как при съемке фильмов, сознательно полностью нарушается, а именно, видео запись курса начинают приблизительно с его середины, затем снимают материал ближе к концу и началу курса, а в конце - завершающую и первую лекцию. Это позволяет преподавателю не выглядеть на первой лекции скованным и допускающим некоторые ошибки при выполнении правил съемки.

При подготовке блоков модулей курса было решено использовать не только доску, но и презентации, на которых были зафиксированы основные понятия и представления, что позволяло обучающемуся при повторном просмотре быстро зрительно восстановить изучаемый материал. По каждому блоку после его изучения обучаемый получал небольшое домашнее задание для закрепления материала, а затем выполнял КИМ, содержащий несколько тестовых вопросов по данному блоку. Не получив зачет, он возвращался к повторному просмотру или задавал вопросы лектору по электронной почте. Второе встречалось реже, т.к. небольшой объем блоков и возможность их многократного просмотра целиком или каких-то фрагментов позволяли обучающимся решить проблемы самостоятельно и приступать к изучению следующих блоков. Обучающийся имел также возможность в любой момент остановить просмотр блока модуля и вернуться к просмотру его определенной части или всего блока заново столько раз, сколько ему необходимо для

понимания материала. Вот это обстоятельство является очень ценным по сравнению с традиционной формой обучения. Любое недопонимание материала при такой форме обучения студент может сразу относительно легко и продуктивно ликвидировать без накопления пробелов, что улучшит качество освоения последующих модулей курса.

Хочу обратить внимание, что видео курс предполагает постоянный визуальный, хотя и не опосредованный, контакт лектора со слушателями особенно благодаря специальной стеклянной доске, перед которой находится лектор лицом к слушателям и пишет на ней цветным фломастером. Каждый обучающийся воспринимает лектора как человека, который персонально ему объясняет материал. Лекции, записанные в такой форме, воспринимаются легче и интереснее, чем при традиционной методике, что отмечали слушатели в своих электронных письмах, которые носили позитивный характер, как отзывы преподавателей химии, смотревших курс.

Однако основной материальный инструмент – доска имела свои особенности, о которых лектор должен не забывать и быстро привыкнуть, иначе могла возникнуть необходимость пересъемки всего блока или его части. В период съемки нельзя ничего стирать с доски (ее моют специальным образом после записи блока, а, чаще всего, части блока, т.к. доска имеет очень небольшой размер). Необходимо также постоянно не забывать о полях на доске, не имеющих выраженных границ, за пределами которых нельзя писать, а также, по возможности, правильно выбирать свою позицию перед доской в момент съемки, т.к. преподаватель находится на фоне написанного им материала.

На фото 1, показан момент чтения лекции по одному из блоков и работа преподавателя у доски. На фото 2, приведен момент демонстрации одной из презентаций к блоку модуля, которые монтировались отдельно после записи курса.

Лектор должен при этом понимать, что в съемочный день (обычно около 4 часов) весь материал делится на две части. Отдельно небольшими фрагментами снимался весь материал, который лектор планировал представить на доске в разных блоках в данный съемочный день. После проведения этой последовательности съемок проводили съемку той части блоков, намеченных на данный день, в которых лектор использовал презентации и не писал на доске. Последовательность записи этих двух частей выбирал лектор.

Таким образом, преподаватель, готовясь снимать видео курс, должен знать, что не только весь курс снимается с полным нарушением последовательности изложения материала, но с нарушением последовательности изложения снимаются даже блоки модулей. На этом акцентируется внимание, потому что абсолютное большинство преподавателей не имеют опыта участия и не знают правил проведения

съемок. Именно по этой причине необходимы репетиции дома, чтобы съемка с любого блока или части блока модуля начиналась свободно и укладывалась в режим отведенного времени.

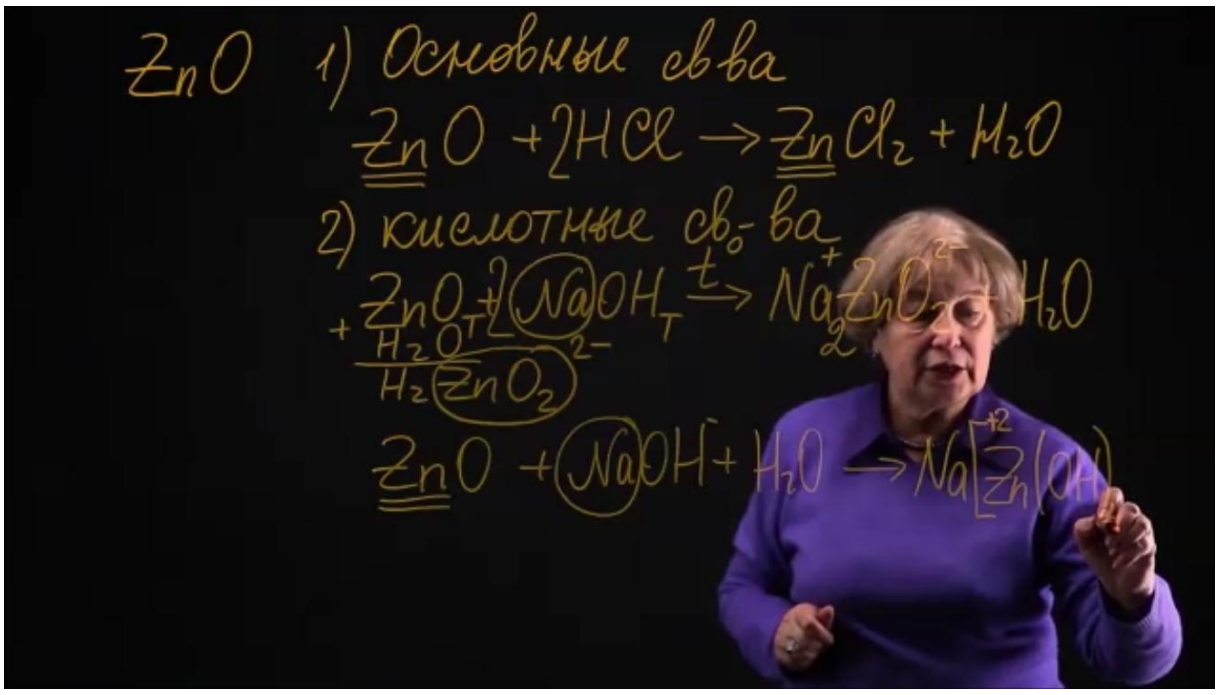


Фото1. Моментальный снимок изложения материала блока модуля курса у доски.

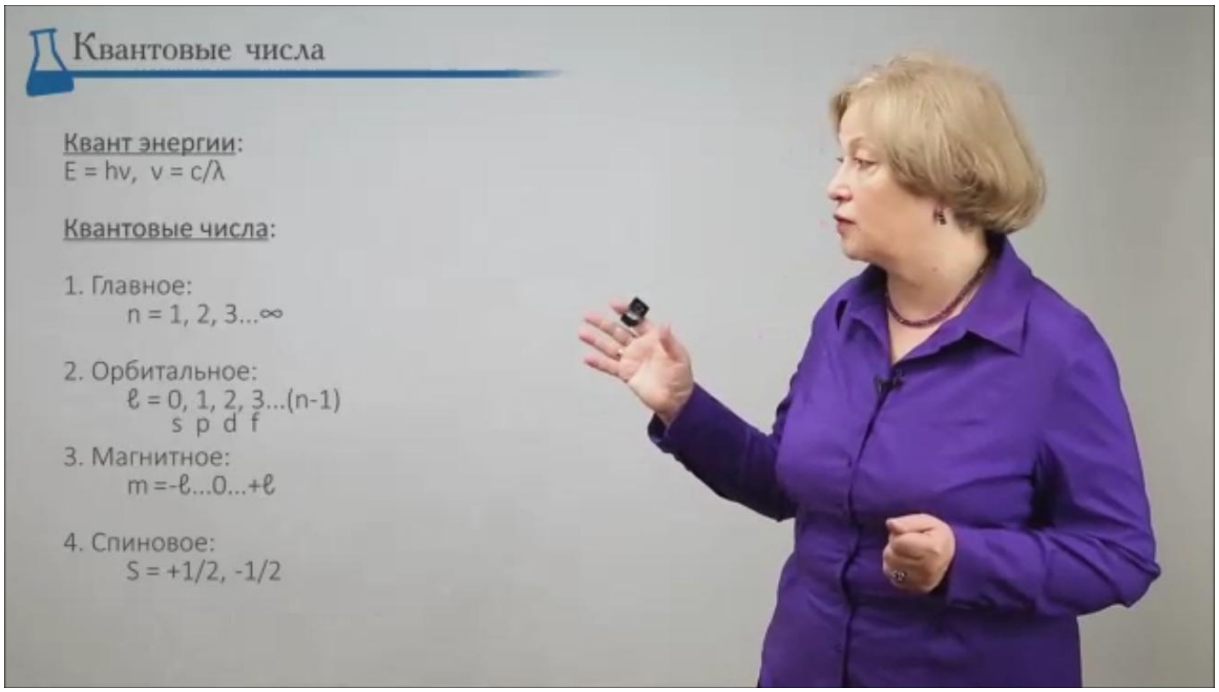


Фото 2. Моментальный снимок фрагмента блока модуля с использованием презентации.

Необходимо также понимать, что процесс съемки даже при наличии небольших перерывов является весьма трудоемким с физической и эмоциональной точки зрения и отнимает много сил. Вместе с этим это очень увлекательный процесс и преподаватели, которые смогут чувствовать себя свободно перед камерой и выполнять все правила съемок получат удовольствие от этой работы.

Вторая половина курса Химия для заочного отделения представлена в электронном виде и включает 4 модуля и разбита на отдельные блоки. Каждый модуль предваряется презентацией на 2-3 страницы, в которой, как отмечалось выше, материал представлен в концентрированной форме. Это позволяет студенту быстро ознакомиться с целями, задачами, достигаемыми результатами и их значением при рассмотрении процессов, явлений или объектов в данном модуле изучаемой дисциплины.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что электронные курсы лекций или практических занятий не могут быть точной копией обычного традиционного курса. К ним должны предъявляться более жесткие методические требования из-за отсутствия живого контакта со студентами и отсутствия возможности быстрой корректировки материала. Вне всякого сомнения, что электронный курс лекций по химии, представленный заочному отделению, который дополняет видео курс по другим тематическим разделам дисциплины, после его апробации будет требовать доработки и корректировки.

Работая над видео курсом, как одной из форм дистанционного обучения и учитывая отзывы о нем, а на втором этапе, подготавливая продолжение курса в виде лекций, представленных в электронной форме и изучая педагогическую литературу, можно подвести некоторые итоги. Прежде всего, при дистанционном обучении учебный материал должен быть представлен в строго структурированной форме. Одной из таких форм является модульная система, позволяющая разбить курс на самостоятельные завершенные единицы крупного и более мелкого размера (блоки модулей). Это существенно облегчает изучение материала при самостоятельной работе студентов и выделение тех этапов работы, которые не были качественно усвоены. Изложение блоков модулей должно быть очень четким, без лишних слов и оборотов речи. Любое отступление от этих принципов можно себе позволить, например, в кратком введении или заключении к модулю курса, если лектор испытывает в этом необходимость. Наверное, это даже желательно, чтобы курс приобрел эмоциональную окраску, присущую данному человеку.

Как отмечалось выше, мы считаем также полезным с методической точки зрения, начинать каждый модуль курса с презентации, главная цель которой - сфокусировать внимание учащегося на наиболее важных моментах данного модуля, легче понять и почувствовать логику последующих рассуждений и освоить, в целом, материал, представленный

в данном тематическом разделе. А также мы рекомендуем краткие на 0,5 страницы заключения к модулю, которыми завершался, например, каждый модуль моего видео курса, что позволяло немного расширить рамки, в которых был представлен материал соответствующего модуля.

Возвращаясь к общим вопросам дистанционного обучения, следует еще раз подчеркнуть, что именно видео лекции с их модульной и блоковой системой подачи материала и возможностями многократного просмотра любых частей блоков модулей особенно предпочтительны на младших курсах очного обучения и при заочном обучении. Такой вид дистанционного обучения позволяет легче усваивать материал, привлекает слушателей и способствуют активному развитию навыков самостоятельной работы. Об этом свидетельствовали отзывы слушателей, в особенности тех, кто ранее имел большие проблемы при изучении химии в школе, а затем в вузе. На старших курсах можно более широко использовать электронные курсы лекций, но с тщательной методической проработкой по модульной системе с презентациями перед каждым модулем для повышения качества дистанционного образовательного процесса.

Учитывая выше перечисленные особенности дистанционного обучения и все более широкое внедрение телекоммуникационных технологий в образовательный процесс, необходимо предусматривать организацию в вузах курсов повышения квалификации для преподавателей, которые будут участвовать в подготовке лекций или других видов занятий по дистанционной форме обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев С.Г. Оценка эффективности дистанционного обучения. Телекоммуникация и информатизация образования Москва, 2007, №3.- С.85-92.
2. Лебедев В.Э. Опыт использования электронного образовательного ресурса по дисциплине. Дистанционное и виртуальное обучение. Москва, 2009, №8.- С.10-22.
3. Ольнев А.С. Использование новых технологий в дистанционном обучении. Актуальные проблемы современной науки. Москва, 2011, №1.- С.96-107.
4. Осиленкер Л.Б. Высшее образование в информационном обществе – новые возможности и новые риски населения. Телекоммуникация и информатизация образования. Москва, 2005, №6.- С.110-118.
5. Селемнев С.В. Как в электронной форме представить учебное содержание? Дистанционное и виртуальное обучение. Москва, 2010, №1.- С.94-104.

6. Геращенко И.П. Развитие дистанционного и электронного обучения в университете. Портал Омского государственного педагогического университета. Омск, 2015.- С.15.
7. Аспицкая А.Ф. , Кирсберг Л.В. Использование информационно-коммуникационных технологий при обучении химии. Методическое пособие. Москва, изд-во Бином, 2012.-360 с.
8. Дорофеев А.С. Модели обучающего курса в разработке систем дистанционного обучения. Москва, изд-во Синергио, 2007.- 180 с.
9. Ибрагимов И.М. Информационные технологии и средства дистанционного обучения. Москва, изд-во Академия, 2007.- 280 с.
10. Аспицкая А.Ф. Использование информационно-коммуникационных технологий при обучении химии. Методическое пособие. Москва, изд-во Бином, 2014.-350 с.

N.P. Tantsura, I.A. Sokolov

ON THE ROLE OF DISTANCE LEARNING IN THE INTERNAL TIME AND CORRESPONDENCE EDUCATION. EXPERIENCE IN PREPARING AND SHOOTING VIDEO LECTURES

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The report is dedicated to the increasing importance of students' self-education and computer-based courses for distance learning designed to significantly intensify the level of self training in educational process. The production of chemistry video and computer-based courses has been given as an example. The experienced has been summarized and given in the form of recommendations for the preparation of courses for distance learning.

Key words: self-education, distance learning, video lectures, computer-based lectures, mastery criteria.

REFERENCES

[1] Abdullaev S.G. Evaluation of the effectiveness of distance learning. Moscow, Telecommunications and Information Education, 2007, №3. Pp.85-92 (rus.)
[2] Lebedev V.E. Experience in the use of electronic educational resources on the subject. Distance and virtual learning, 2009, №8. Pp.10-22 (rus.).
[3] Olnev A.S. Use of new technologies in distance education. Actual problems of modern science, 2011, №1. Pp.96-107 (rus.)

[4] Osilincer O.B. Higher education in the information society - new opportunities and risks of the population. Telecommunications and Information Education, 2005, №6. Pp.110-118 (rus.).
[5] Selemnev S.V. How to electronically submit educational content? Distance and virtual learning, 2010, №1. Pp.94-104 (rus.).
[6] Gerashenko I.P. The development of distance and e-learning at the University. Portal Omsk State Pedagogical University. Omsk. 2015. p.15 (rus.).
[7] Aspickaya A.F., Kirsberg L.V. The use of information and communication technologies in teaching chemistry. Toolkit. Moscow, Publishing House Beanom. 2012. 360 p. (rus.)
[8] Dorofeev A.S. Models of the training course in the development of distance learning systems. Moscow, Publishing House Synergyo, 2007. 180 p. (rus.)
[9] Ibragimov I.M. Information technology and distance learning tools. Moscow, Publishing House Academy, 2007. 280 p. (rus.)
[10] Aspickaya A.F. The use of information and communication technologies in teaching chemistry. Toolkit. Moscow, Publishing House Beanom. 2012. 360 p. (rus.)

МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.01; DOI 10.1872/MMF-2016-18

П.А. Андриенко[1], В.И. Каразин[2], И.О. Хлебосолов[3]

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

[1]Павел Александрович Андриенко – к.т.н., доцент кафедры теории механизмов и машин, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: andrienko-p@mail.ru

[2]Владимир Игоревич Каразин – д.т.н., профессор кафедры теории механизмов и машин, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru

[3]Игорь Олегович Хлебосолов – к.т.н., доцент кафедры теории механизмов и машин, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел. +7 (812) 297-4845; e-mail: tmm-russia@mail.ru

Аннотация

В работе затронуты вопросы испытаний уже изготовленных и собранных узлов изделий на виброакустические воздействия, так как окончательная сборка узлов или изделия в целом позволяет ограничить диапазон создаваемых воздействий и смоделировать реальное поведение испытуемого изделия. Особенностью необходимого испытательного оборудования является возможность возбуждения комбинированных виброакустических нагрузок на различные механические системы. Это накладывает ряд конструктивных требований на проектируемое оборудование.

В статье приводится ряд примеров проектировочных расчетов конструктивных параметров виброакустических стендов.

Ключевые слова: испытательное оборудование, виброакустические стенды, акустические стенды, виброротационные стенды, электропневмогенератор.

Процесс имитационного моделирования поведения различных систем в жидкой или газовой среде уже долгие годы представляет интерес для ученых и разработчиков в различных областях науки и техники. Традиционным способом воспроизведения возникающих нагрузок при испытаниях узлов является использование ударных и вибрационных стендов [1, 2], использующих различные схемы имитации воздействий (механические, гидравлические, пневматические, электрические и др.). Отличительной особенностью таких испытаний является и то, что воздействию подвергается каждый узел или прибор отдельно от остальных. Это в свою очередь приводит к эффекту «переиспытаний», так как приходится перекрывать диапазоны воздействий (длительность, частота, усилие и др.) значительно превышающих реальные значения условий эксплуатации самих изделий.

При этом очевидно, что в случае перемещения какого-либо тела в жидкой или газовой среде. Силовую нагрузку (перегрузку) воспринимает корпус или кожух изделия, а внутренние узлы и приборы подвергаются комбинированному воздействию. По сути, это воздействие является комбинацией вибрационной нагрузки и акустического воздействия.

Большой интерес в этом случае могут представлять не только аэродинамические характеристики изделия (или его внешней оболочки), но и ряд других параметров. Важной группой таких параметров систем и изделий являются инерционные характеристики. Они существенно влияют на поведение системы при движении, ее устойчивость и управляемость [3-6]. Очевидно, что координаты центра масс и компоненты тензора инерции имеет смысл определять после окончательной сборки узла изделия в корпусе.

Помимо прочего стоит отметить, что математическое описание (моделирование) подобных процессов, несмотря на развитие современных вычислительных технологий и программного обеспечения, требует, как правило, и экспериментального подтверждения, особенно на стадии отработки и совершенствования технологии изготовления, монтажа, компоновки и размещения фиксирующих и крепежных элементов и т.д.

Возникает необходимость создания комбинированных испытательных установок для испытания уже изготовленных и собранных узлов изделий перед их постановкой на производство (в случае серийных изделий) или окончательной «приемкой» (в случае единичных), так как окончательная сборка узлов или изделия в целом позволяет ограничить диапазон создаваемых воздействий и смоделировать реальное поведение испытуемого изделия. Особенностью такого испытательного оборудования должна стать возможность возбуждения комбинированных виброакустических нагрузок на различные механические системы.

Комбинация вибрационного и акустического воздействия реализована в стенде [7], который имеет реверберационную камеру объемом около 3 м^3

и электропневматические генераторы звука. Стол для размещения объекта испытания совмещен с приборным столом вибратора, который установлен в нижней части стенда. Совмещение механических и звуковых колебаний создает особую среду в соответствии с заданным имитационным воздействием.

Альтернативой такому способу воспроизведения нагрузок является использование электропневмовибраторов, позволяющих совмещать акустическое давление на изделие с точечным периодическим силовым воздействием в заданном диапазоне частот [8].

Целью статьи является анализ влияния ряда параметров создаваемых воздействий и то, как они могут влиять на конструкцию разрабатываемой испытательной установки.

Оговоримся еще раз, что виброакустические нагрузки возбуждаются одним или несколькими электропневмовибраторами. Принцип действия пневмовибраторов основан на создании воздушных потоков, направленных на испытуемый объект.

Важнейшими параметрами являются параметры воздушной среды, формирующей воздействие: соотношение давлений внутри пневмовибратора и в окружающей среде; плотность воздуха; показатель адиабаты; скорость звука. Кроме того, необходимо учесть и конструктивные параметры пневмовибратора и установки: диаметр насадка и критического сечения сопла; расстояние от насадка до объекта; угол наклона струи к объекту.

Одним из важных факторов формируемого воздействия является скорость воздушной струи, выходящей из электропневмовибратора. Исходными данными для расчета являются рабочее давление воздуха в пневмогенераторе $P_{\text{р}}$, плотность воздуха ρ=1,29 кг/м^3, показатель адиабаты k=1,4, скорость звука в воздухе $v_{\text{зв}}$=322 м/с.

Если сечение отверстия, откуда истекает струя, имеет постоянный диаметр, то скорость струи определяется выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_{\text{р}} \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{р}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{р}}} \right)^{\frac{1}{k}}}{(k-1) \cdot \rho}}, \qquad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ –давление на выходе из насадка.

Учет указанных параметров позволяет определить зависимость скорости истечения струи из насадка в зависимости от перепада давления внутри и снаружи электропневмовибратора (следует напомнить, что в зависимости от перепада режим истечения может быть докритический и критический, при котором скорость истечения равна скорости звука):

В зависимости от выбора формы сечения, через которое проходит струя воздуха, скорость истечения может варьироваться в широком диапазоне значений. На рис. 1 показаны зависимости скорости истекающей струи через насадок с постоянным круглым сечением и струи, проходящей через сопло Лаваля. Сопла, в соответствии с теорией [9, 10], обеспечивают максимальную скорость истечения струи газа

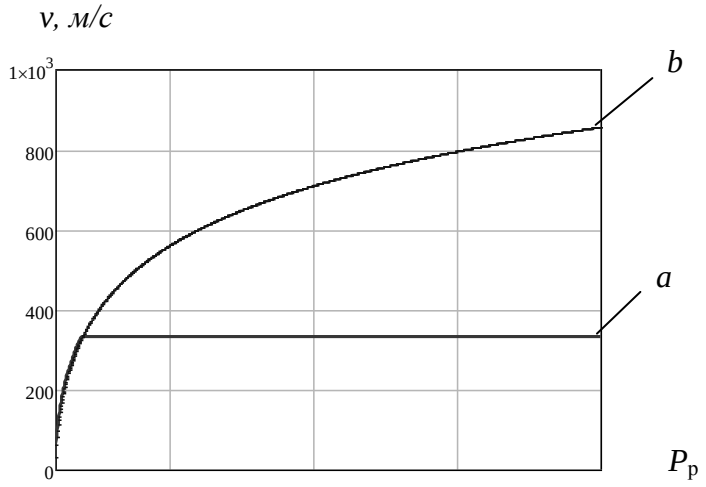


Рис. 1. Вид зависимости скорости истечения газа от рабочего давления:
кривая a – из насадка с постоянным круглым сечением; *кривая b* – из сопла Лаваля

Сила удара струи воздуха из насадка определяется по формуле [11]:

$$F = \left(1{,}06 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{l}{d_0}\right) \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S\,, \qquad (2)$$

где l – расстояние от насадка до поверхности объекта испытаний, d_0 – диаметр насадка, S – площадь поперечного сечения насадка.

Примерный вид зависимости (2) для струи из насадка и из сопла Лаваля и показан на рис. 2.

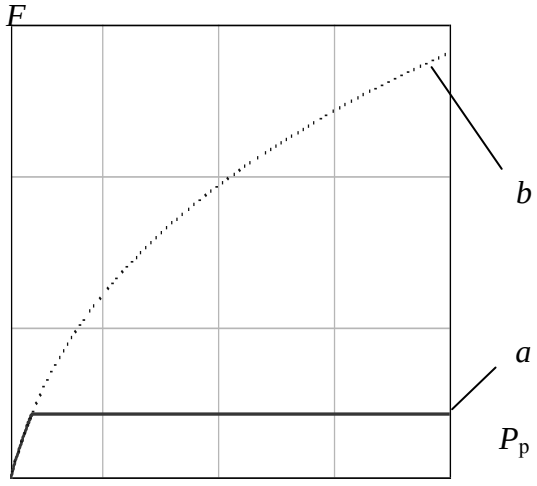


Рис. 2. Вид зависимости силы удара струи от рабочего давления
кривая a – из насадка; *кривая b* – из сопла Лаваля

Очевидно, зависимость силы удара струи от расстояния между насадком и объектом воздействия будет линейная.

Для увеличения силы удара можно использовать несколько струй газа, сфокусированных в одной точке. В этом случае струя будет направлена под углом α к поверхности, и зависимость (2) приобретает вид:

$$F = \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \sin\alpha\,. \qquad (3)$$

Пример такой схемы приведен на рис. 3.

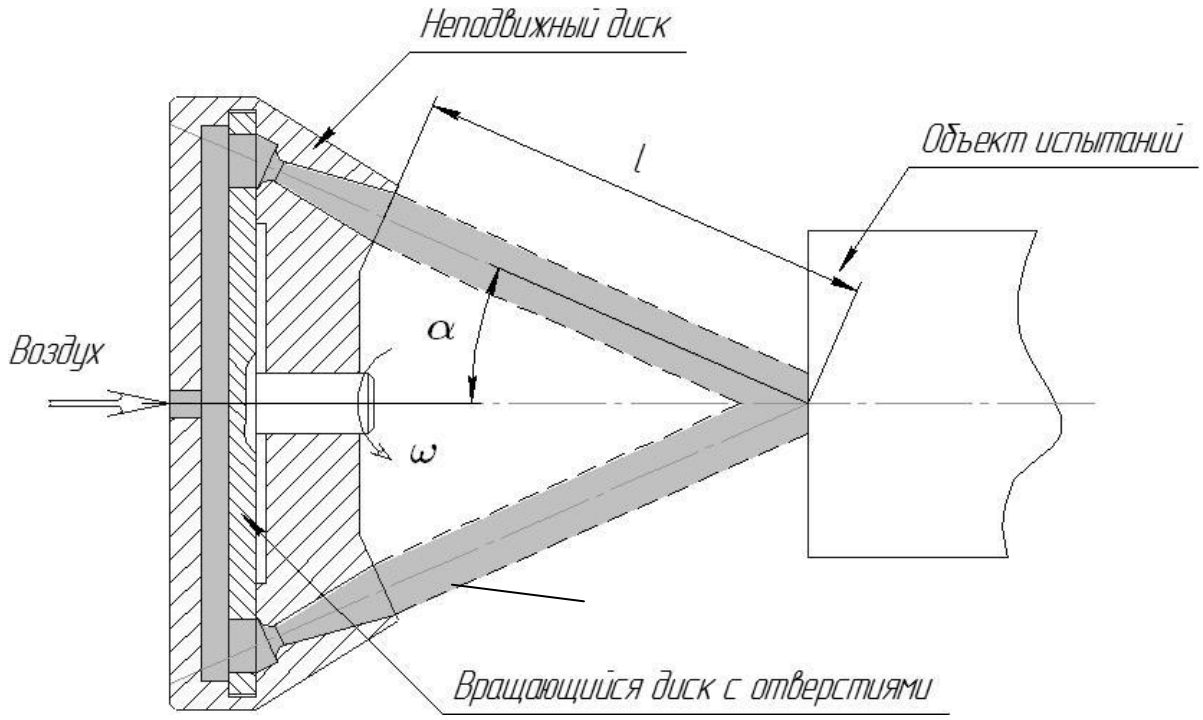


Рис. 3. Схема нагружения с использованием нескольких струй газа

Для создания импульсной нагрузки интересной представляется идея создания прерывистых воздушных потоков, направленных на объект испытаний. Подобные потоки получаются при прохождении сжатого воздуха между вращающимся и неподвижным дисками, имеющими сквозные отверстия (схема аналогична большому количеству схем прохождения газа в турбинах).

Уровень и частота вибрационного воздействия регулируются давлением в магистрали питания пневмовибраторов и числом оборотов их электродвигателей. Количеством отверстий и их взаимным расположением в дисках можно регулировать скважность воздействующих импульсов (рис. 4).

Широкий диапазон воспроизводимых частот предъявляет особые требования к системе вывешивания и закрепления объекта испытаний,

которая должна быть отстроена от собственных частот и частот испытательного воздействия. Расчетная схема подвеса приведена на рис. 5.

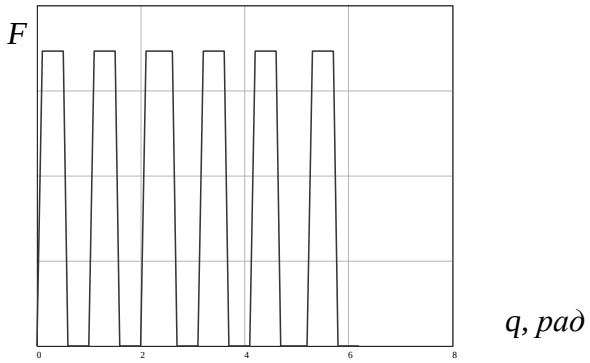


Рис. 4. Пример зависимости импульсной нагрузки F от угла q поворота подвижного диска электропневмовибратора

Расчетные зависимости пространственного низкочастотного подвеса приведены ниже и позволяют определить собственные частоты подвеса. Исходными параметрами являются масса объекта испытаний, длина тросов, их диаметр и количество.

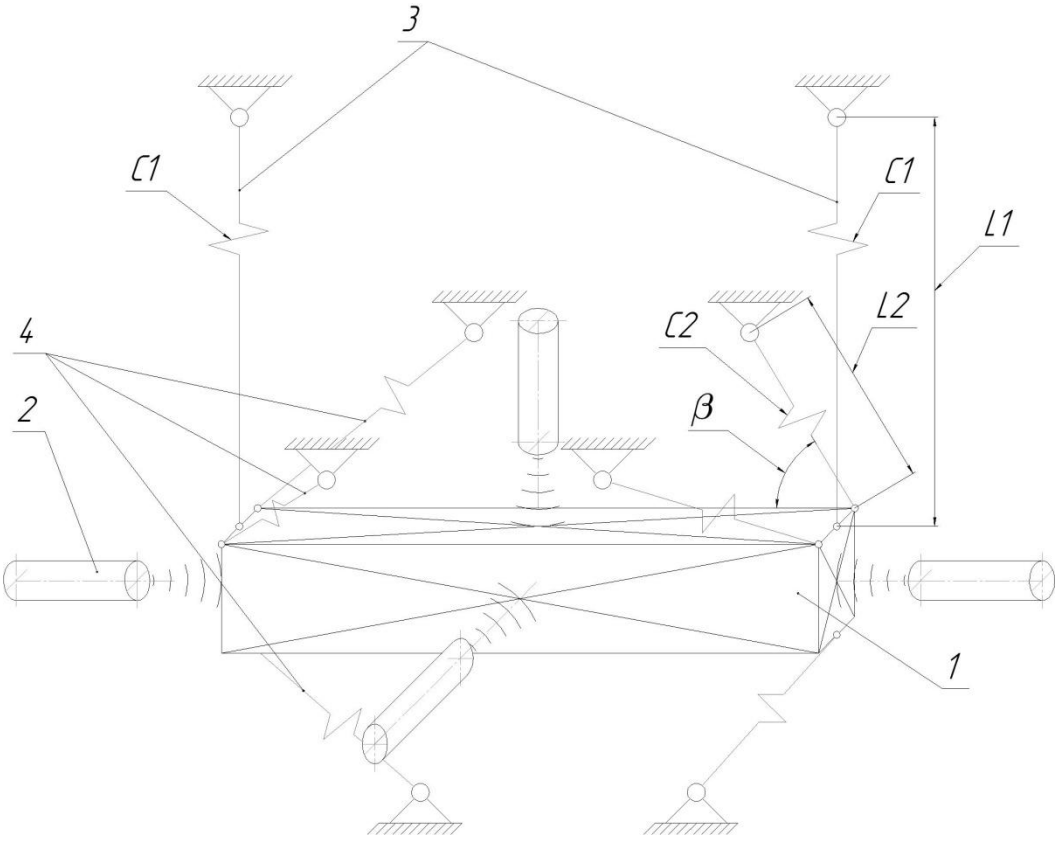


Рис. 5. Расчетная схема подвеса:
1 – объект испытаний; 2 – электропневмогенераторы;
3 – вертикальный подвес; 4 – растяжки.

Собственная (поперечная, вертикальная) частота подвеса изделия $f_{\text{поп}}$ определяется по формуле физического маятника:

$$f_{\text{поп}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L_1}}, \tag{4}$$

где g – ускорение свободного падения, L_1 – длина вертикального подвеса.

Собственная продольная (вдоль осей X, Y) частота $f_{\text{пр}}$ определяется выражением:

$$f_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{E \cdot S_{\text{тр}} \cdot \cos\beta \cdot n}{L_2 \cdot M_{\text{тр}}}}, \tag{5}$$

где E – модуль Юнга материалов тросов, $S_{\text{тр}}$ – площадь поперечного сечения тросов, β – угол между растяжкой и соответствующей осью, L_2 – длина растяжки, n – число растяжек.

Приведенные зависимости (4), (5) позволяют определить границы жесткости и собственных частот подвеса в зависимости от материала и в различных направлениях.

На основании приведенных в работе расчетных зависимостей возможно получить значения комплекса конструктивных параметров виброакустических стендов, что позволит создать условия нагружения в требуемом диапазоне и произвести адекватные испытания узлов и изделий в сборе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытательная техника: Справочник: В 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева.— Москва : Машиностроение, 1982. Кн. 1 / Г.С. Батуев, А.С. Больших, В. С. Голубков и др. — 1982 . – 528 с. (ил.).
2. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н. А. Златин [и др.]; под ред. Н. А. Златина, Г.И. Мишина.— М. : Наука, 1974 . – 344 с. : ил.
3. А.Н. Евграфов, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Экспериментальное определение инерционных параметров изделий // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. № 1. С. 205-211.
4. Бергменн Э., Дзиелски Дж. Определение инерционных характеристик космического аппарата с помощью управляющих моментов.// Аэрокосмическая техника. 1990. № 11.
5. А.И. Забегаев, Д.Н. Клюквин, Б.В. Пшеннов. Расчетно-экспериментальный метод определения высоты положения центра масс статически неопределимых амортизированных конструкций / XXXV Академические чтения по космонавтике – «Королёвские чтения». – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.

6. Ксенофонтов А.А., Николаев В.Н., Чернокрылов С.Ю. Динамический стенд многофункционального назначения. // Испытательные и поверочные стенды. – Л.: ЛГТУ, 1992. С. 29–32.
7. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Об испытаниях на комбинированные воздействия. // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. №2. С. 142-149.
8. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. О комплексном подходе к лабораторным испытаниям навигационных систем.// Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. № 4. С. 121-131.
9. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
10. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т./ Ред.совет: В.Н.Челомей (пред.) – М.: Машиностроение, 1981.
11. Нурок, Г.А. Гидромеханизация открытых разработок [Текст] / Г.А. Нурок. – М.: Недра , 1980. –582 с.

P.A. Andrienko[1], V.I. Karazin[1], I.O. Khlebosolov[1]

STAND–TESTS ON THE VIBRO-ACOUSTIC EFFECTS

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

In the work the issues of the tests already made and assembled components for vibro-acoustic effects as the final assembly of components or products in general allows you to restrict the range of generated impacts and to simulate the actual behavior of the test items. Feature of the required test equipment is the ability of the combined vibro-acoustic excitation of different mechanical loads on the system. This imposes several design requirements on project equipment. The article contains several examples of design calculation of the design parameters of vibroacoustic stands.

Key words: testing equipment, vibro-acoustic stands, acoustic stands, vibrostation stands, electropneumatic generator.

REFERENCES

[1] Test equipment: Reference book: In 2 books. Under the editorship of V. V. Klyuev.— Moscow : Mashinostroenie, 1982. KN. 1 / G. S. Batuev, A.S. Large, V.S. Golubkov, etc. 1982 . 528 p. (rus).

[2] Ballistic stands and their use in experimental researches / N. A. Zlatin [et al.]; ed. A. Zlatin, G. I. Mishin. Moscow. Nauka, 1974 . 344 p.
[3] A.N. Evgrafov, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov. Experimental determination of the inertial parameters of products. Modern mechanical engineering. Science and education. Materials of international scientific-practical conference. 2011. №1. Pp. 205-211.
[4] E. Bergmann, G. Zielski. Determination of inertial characteristics of a spacecraft using control points.// Aerospace engineering. 1990. Vol. 11.
[5] A. I. Zabegaev, D. N. Kljukvin, B. V. Pshennow. The calculated-experimental the rest method for determining the height position of the center of mass of way-cally indeterminate structures depreciated / XXXV Academic readings on cosmonautics – "Korolev`s reading". – Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2011.
[6] Ksenofontov A. A., Nikolaev V. N., Chernokalov S. Y. Dynamic multi-purpose stand. // Test and calibration stands. – Leningrad: LGTU, 1992. Pp. 29-32.
[7] P.A. Andrienko, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov. About Combined Influence Tests. Modern mechanical engineering. Science and education. Materials of international scientific-practical conference. 2012. №2. Pp. 142-149.
[8] P.A. Andrienko, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov. An Integrated Approach to Laboratory Testing of Navigation Systems. Modern mechanical engineering. Science and education. Materials of international scientific-practical conference. 2014. №4. Pp. 121-131.
[9] Loitsyansky, L.G. Fluid and Gas Mechanics. Moscow: Drofa, 2003. 840 p.
[10] Vibration in engineering: Handbook. In 6 volumes/ Ed.tip: V. N.Chelomey – M. Engineering, 1981.
[11] Nurok, G. A. Dredging surface mining. Moscow. Nedra , 1980. 582 p.

УДК 621.865; DOI 10.1872/MMF-2016-19

А.П.Борина[1], В.А.Терешин[2]

УСТОЙЧИВОСТЬ АЛГОРИТМОВ ХОДЬБЫ

[1] Анастасия Петровна Борина, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
E-mail: kamchatka1@rambler.ru.

[2] Валерий Алексеевич Терешин, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
E-mail: terva@mail.ru.

Аннотация

Работа посвящена синтезу управления ходьбой двуногого статически неустойчивого шагающего аппарата. Управление должно обеспечивать устойчивое движение [3]. В данной работе под устойчивостью понимается ограниченность отклонения скорости и координаты центра тяжести аппарата от требуемых значений в конце каждого шага. Структурная схема системы управления предполагает наличие обратной связи, содержащей «идеальный механизм» (образцовую передаточную функцию [16]). Уравнения идеального механизма позволяют определять время и место постановки ноги в конце каждого шага на основе общих требований к ходьбе. В качестве идеального механизма необходимо выбирать механизм в некотором смысле близкий к объекту управления [2], [7]. В данном случае таким механизмом является перевернутый пространственный математический маятник. Для проверки работоспособности описанного способа управления в качестве физической модели объекта управления принято абсолютно твердое тело на двух невесомых ногах [4], [10]. Для поддержания стационарных законов движения удобно выработать алгоритмы формирования координат и скоростей центра тяжести в конце шага. В работе исследована ограниченность общего члена последовательностей этих координат и скоростей при различных наиболее простых алгоритмах [14] и проиллюстрирована работа всей системы управления с указанной выше физической моделью объекта.

Ключевые слова: шагающие аппараты, динамическая устойчивость, система управления, двуногая ходьба.

Введение

Шагающий аппарат представляет собой многозвенный управляемый механизм, который может быть использован в качестве механического устройства, заменяющего ноги человека или его самого [12] при выполнении самых разнообразных операций, порой опасных для здоровья и жизни людей. Большинство разработок в области создания и управления шагающих машин представляют собой статически устойчивые системы, главные недостатки которых – большой вес и низкая скорость. Для повышения маневренности таких устройств необходимо снижать степень их статической устойчивости [6], [13]. Работоспособность таких машин должна обеспечиваться динамической устойчивостью. Статически неустойчивый аппарат по сравнению со статически устойчивым должен развивать большие скорости, обладать большей маневренностью [15]. Предполагается, что наибольшим быстродействием, маневренностью и проходимостью будет обладать двуногий аппарат с небольшими легкими ступнями, которые не в состоянии обеспечить его устойчивость.

Описание алгоритмов управления

Для составления алгоритмов управления на основе идеального механизма запишем уравнения движения пространственного перевернутого маятника [1] для момента окончания шага в виде системы четырех алгебраических уравнений.

$$\begin{cases} x_{tp} - x_{\ddot{e}} = \dfrac{1}{2}\left(x_0 - x_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{x}_0}{k} \right)\psi + \dfrac{1}{2}\left(x_0 - x_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{x}_0}{k} \right)\psi^{-1} \\ z_{tp} - z_{\ddot{e}} = \dfrac{1}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi + \dfrac{1}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi^{-1} \\ \dot{x}_{tp} = \dfrac{k}{2}\left(x_0 - x_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{x}_0}{k} \right)\psi - \dfrac{k}{2}\left(x_0 - x_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{x}_0}{k} \right)\psi^{-1} \\ \dot{z}_{tp} = \dfrac{k}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi - \dfrac{k}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

Индекс «·» обозначает производную по времени. Система четырех уравнений (1) содержит двенадцать параметров, из которых восемь считаются известными: начальные условия x_0, z_0, $\dot{x}_0$, $\dot{z}_0$ – координаты и скорости центра тяжести аппарата; $\psi = e^{ktp}$, t_p - время окончания текущего шага (темп ходьбы обычно является характеристикой шагающего механизма, вычисляемой из его физических свойств); $k = \sqrt{g/L}$, L – высота центра тяжести, g – ускорение свободного падения. Оставшиеся два

параметра следует назначать из списка конечных условий: x_{tp}, z_{tp}, $\dot{x}_{tp}$, $\dot{z}_{tp}$. Здесь возможны различные варианты. Система (1) позволяет определить оставшиеся два условия в конце шага и координаты места постановки ноги $x_л$ и $z_л$.

Проиллюстрируем возможности создания простейших алгоритмов ходьбы как числовых последовательностей [5] и исследуем их свойства. При синхронизации движений вдоль x и z уравнения (1) распадаются на две одинаковые подсистемы. Рассмотрим движение вдоль оси z .

$$\begin{cases} z_{tp} - z_{\ddot{e}} = \dfrac{1}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi + \dfrac{1}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi^{-1} \\ \dot{z}_{tp} = \dfrac{k}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} + \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi - \dfrac{k}{2}\left(z_0 - z_{\ddot{e}} - \dfrac{\dot{z}_0}{k} \right)\psi^{-1} \end{cases} \tag{2}$$

Преобразуем эту систему к более удобному виду складывая и вычитая почленно оба уравнения друг из друга:

$$\begin{cases} -\psi z_{tp} + z_0 = z_{\ddot{e}}(1-\psi) - \psi\dfrac{\dot{z}_{tp}}{k} + \dfrac{\dot{z}_0}{k} \\ z_{tp} - \psi z_0 = z_{\ddot{e}}(1-\psi) - \dfrac{\dot{z}_{tp}}{k} + \psi\dfrac{\dot{z}_0}{k} \end{cases} \tag{3}$$

Вычтем одно уравнение из другого и избавимся таким образом от параметра $z_л$

$$(z_{tp} - z_0)\cdot(1+\psi) = (\psi - 1)\cdot\left(\frac{\dot{z}_{tp}}{k} + \frac{\dot{z}_0}{k} \right) \tag{4}$$

или

$$\dot{z}_n + \dot{z}_{n-1} = \lambda(z_n - z_{n-1}), \tag{5}$$

где

$$\lambda = k\frac{\psi+1}{\psi-1} \geq 1, \quad z_n = z_{tp}, \quad z_{n-1} = z_0.$$

Обозначим

$$\dot{z}_n + \dot{z}_{n-1} = a_n, \quad z_n - z_{n-1} = b_n \ , \tag{6}$$

где

$$a_n = \lambda(z_n - z_{n-1}), \quad b_n = \frac{(\dot{z}_n + \dot{z}_{n-1})}{\lambda}.$$

Последние уравнения удобны для построения итерационных процедур [9].

• Пусть заданы координаты центра тяжести аппарата z_n в моменты окончания шагов. Из (6) получим выражение для последовательности скоростей $\dot{z}_n$ в эти же моменты времени как функции от начальной скорости $\dot{z}_0$ и последовательности z_n.

$$\begin{gathered}
\dot{z}_1 = a_1 - \dot{z}_0 \\
\dot{z}_2 = a_2 - \dot{z}_1 = a_2 - a_1 + \dot{z}_0 \\
\dot{z}_3 = a_3 - \dot{z}_2 = a_3 - a_2 + a_1 - \dot{z}_0 \\
\dots \\
\dot{z}_n = (-1)^n \left(\dot{z}_0 + \sum_{k=1}^{n} (-1)^k a_k \right)
\end{gathered} \tag{7}$$

1. Пусть длина шага

$$z_n - z_{n-1} = const, \tag{8}$$

тогда

$$a_n = \lambda(z_n - z_{n-1}) = a. \tag{9}$$

Рассмотрим сумму в (7)

$$\sum_{k=1}^{n} (-1)^k a_k = a \cdot \sum_{k=1}^{n} (-1)^k = a \frac{(-1)^n - 1}{2}. \tag{10}$$

Следовательно

$$\begin{gathered}
\dot{z}_n = (-1)^n \dot{z}_0 + (-1)^n a \frac{(-1)^n - 1}{2} = (-1)^n \dot{z}_0 + a \frac{(-1)^{2n}}{2} - \frac{(-1)^n a}{2} = \\
= (-1)^n \left(\dot{z}_0 - \frac{a}{2} \right) + \frac{a}{2}
\end{gathered} \tag{11}$$

или

$$\dot{z}_n = (-1)^n \left[\dot{z}_0 - \frac{\lambda}{2}(z_n - z_{n-1}) \right] + \frac{\lambda}{2}(z_n - z_{n-1}). \tag{12}$$

Из выражения (12) следует, что при постоянной разности $(z_n - z_{n-1})$ скорость в конце шага будет иметь периодический характер с размахом $2\left[\dot{z}_0 - \frac{\lambda}{2}(z_n - z_{n-1}) \right]$ и средним значением $\frac{\lambda}{2}(z_n - z_{n-1})$.

2. Пусть модуль

$$|z_n - z_{n-1}| = const, \tag{13}$$

но знак разности меняется. Тогда из (6)

$$a_n = (-1)^n a. \tag{14}$$

Рассмотрим сумму из (7)

$$\sum_{k=1}^{n} (-1)^k a_k = a \cdot \sum_{k=1}^{n} (-1)^k (-1)^k = a \cdot n. \tag{15}$$

Следовательно

$$\dot{z}_n = (-1)^n (\dot{z}_0 + an) \tag{16}$$

или

$$\dot{z}_n = (-1)^n [\dot{z}_0 + \lambda(z_n - z_{n-1})n]. \tag{17}$$

При таком законе изменения длины шага $z_n - z_{n-1}$ скорость $\dot{z}_n$ увеличивает размах колебаний с ростом номера шага при любом малом $|z_n - z_{n-1}|$ и лишь при точном выполнении равенства $z_n = z_{n-1}$ скорость $\dot{z}_n = (-1)^n \dot{z}_0$. Это характерно для режима покачивания.

• Пусть известен закон изменения скорости центр тяжести аппарата $\dot{z}_n$ в момент окончания каждого шага. Получим выражение для последовательности координат z_n в эти же моменты времени.

$$z_1 = b_1 + z_0$$

$$z_2 = b_2 + z_1 = b_2 + b_1 + z_0$$

…

$$z_n = z_0 + \sum_{k=1}^{n} b_k \tag{18}$$

3. Пусть

$$\dot{z}_n = \dot{z} = const, \tag{19}$$

тогда

$$b_n = b = const \ , \ z_n = z_0 + n \cdot b, \ z_n - z_{n-1} = b \tag{20}$$

где

$$b = \frac{\dot{z}_n + \dot{z}_{n-1}}{\lambda} = 2\frac{\dot{z}}{\lambda}$$

4. Пусть

$$\dot{z}_0 = \dot{z},\ \dot{z}_1 = 0,\ \dot{z}_2 = -\dot{z},\ \dot{z}_3 = 0,\ \dot{z}_4 = \dot{z},\ \dot{z}_5 = 0,\ \dot{z}_6 = -\dot{z} \text{ и т.д.} \qquad (21)$$

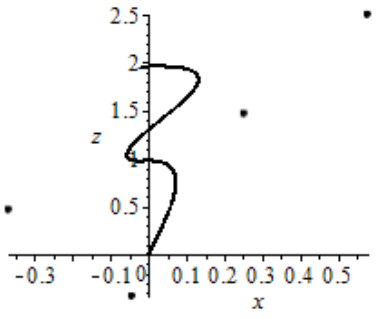
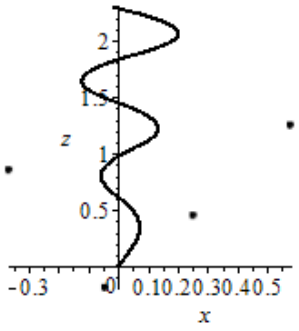
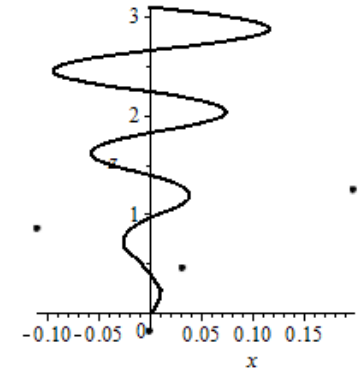
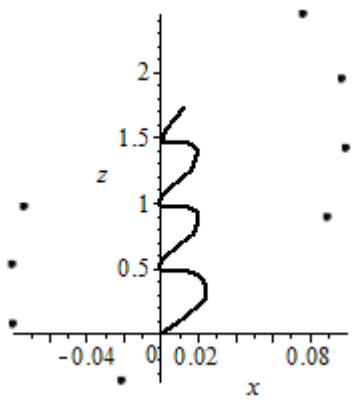
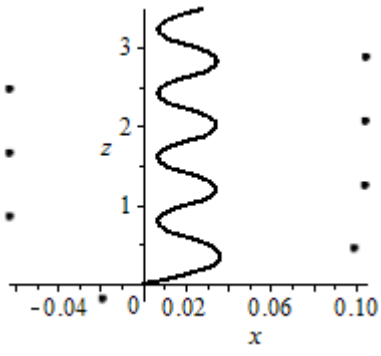
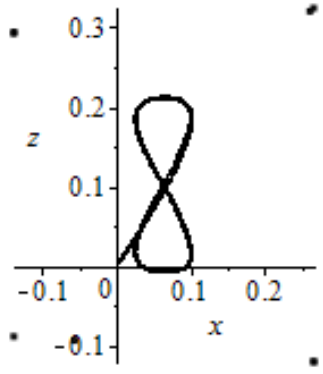
Тогда

$$z_n = z_0 + \frac{\dot{z}}{\lambda}\cos\left(\frac{\pi n}{2}\right). \qquad (22)$$

Очевидно, что при таком z_n аппарат совершает колебательные движения около положения z_0 с амплитудой $\frac{\dot{z}}{\lambda}$.

Описанные алгоритмы реализуются для продольного и поперечного направлений движения в различных сочетаниях. В зависимости от вида программного движения можно задавать следующие четыре варианта набора двух параметров $(\dot{x}_{tp}, \dot{z}_{tp})$, $(\dot{x}_{tp}, z_{tp})$, $(x_{tp}, \dot{z}_{tp})$ и (x_{tp}, z_{tp}).

Траектории двуногого аппарата

		
$\lvert x_{tp}\rvert = const,\ z_{tp} = const$	$\lvert x_{tp}\rvert = const,\ \dot{z}_{tp} = const$	$x_{tp} = 0,\ \dot{z}_{tp} = const$
		
$\dot{x}_{tp} = -\dot{x}_0,\ z_{tp} = const$	$\dot{x}_{tp} = -\dot{x}_0,\ \dot{z}_{tp} = const$	$\dot{x}_{tp} = -\dot{x}_0,\ \dot{z}_{tp} = \dot{z}_0, 0, -\dot{z}_0, 0$

Точками отмечены места постановки ног. Необходимо также ввести ограничения на значения всех параметров [8], [17] определяемые конструкцией аппарата и комфортностью движения. В таблице приведены траектории центра тяжести двуногого аппарата, рассчитанные на основе описанной выше физической модели при наиболее простых алгоритмах управления.

Выводы

В работе показано, что фиксирование ширины шага на протяжении всей ходьбы приводит к потере устойчивости [11]. Устойчивыми являются алгоритмы либо с фиксированной скоростью, либо более сложные последовательности с ограниченными общими членами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Borina, V. Tereshin. Control of biped walking robot using equations. Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (Switzerland: Springer, 2015, 23-31).
2. Борина А.П., Терешин В.А. Решение задачи о пространственном движении статически неустойчивого шагающего аппарата. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы научно-практической конференции с международным участием. 20 – 21 июня 2013 года, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013, С. 631-641.
3. Борина А.П., Терешин В.А. Прямолинейное равномерное движение антропоморфного робота. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ ч.1. - СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2014, С.160-162.
4. Борина А.П., Терешин В.А. Пространственное движение шагающего аппарата под действием управляющих воздействий со стороны ноги. Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 177-188.
5. B. Brogliato, Some perspectives on the analysis and control of complementarity-systems. IEEE Transactions on Automatic Control, n. 48(6), pp. 918‑935, 2003.
6. B. Brogliato, S.I. Niculescu, M. Monteiro-Marques. On the tracking control of a class of complementarity- slackness hybrid mechanical systems. Systems and Control Letters, n. 39, pp. 255-266, 2000.
7. B. Brogliato, A.A. ten Dam, L. Paoli, F. Genot, M. Abadie. Numerical simulation of finite dimensional multibody nonsmooth mechanical systems. ASME Applied Mechanics Reviews, n. 55, pp. 107‑150, 2002.

8. C. Chevallereau. Time-scaling control of an underactuated biped robot. IEEE Transactions on Robotics and Automation, n. 19(2), 362‑368, 2003.
9. C. Chevallereau, Y. Aoustin. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. Robotica, n. 19, pp. 557-569, 2001.
10. S. Collins, M. Wisse, A. Ruina. 3-d passive dynamic walking robot with two legs and knees. International Journal of Robotics Research, n. 20(7), pp. 607‑615, 2001.
11. H. Dankowicz, J. Adolfsson, A. Nordmark. 3D passive walkers: finding periodic gaits in the presence of discontinuities. Nonlinear Dynamics, n. 24, pp. 205‑229, 2001.
12. S.L. Das, A. Chatterjee. An alternative stability analysis technique for the simplest walker. Nonlinear Dynamics, n. 28(3), pp. 273-284, 2002.
13. M. Gienger, K. LNoOer, F. Pfei:er. Practical aspects of biped locomotion. In B. Siciliono, & P. Dario (Eds.), Experimental robotics. (Berlin, Heidelberg: Springer. 2003, 95‑104).
14. D.C. Kar, I.K. Kurien, K. Jayarajan. Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion. Mechanism and Machine Theory, n. 38, pp. 355‑366, 2003.
15. H.K. Lum, M. Zribi, Y.C. Soh. Planning and control of a biped robot. International Journal of Engineering Science, n. 37, pp. 1319-1349, 1999.
16. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 624 с.
17. T. Saidouni, G. Bessonnet. Generating globally optimised sagittal gait cycles of a biped robot. Robotica, n. 21, pp. 199‑210, 2003.

A. Borina[1], V. Tereshin[1]

STABILITY OF WALKING ALGORITHMS

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the synthesis of control of biped dynamic walking. Control system should provide the stable walking [3]. In this paper, stability is the limited deviation of the speed and the coordinates of the center of gravity of the robot from the required values at the end of each step. A block diagram of a control system has feedback with a "perfect mechanism" (an exemplary transfer function [16]). The equations of the ideal mechanism allow us to determine the time and place of setting feet at the end of each step. A perfect mechanism should be similar to the control object [2], [7]. In this case, such a mechanism is an inverted spatial pendulum. The physical model of the control is a rigid body

with two weightless legs [4], [10]. The algorithms for extracting the coordinates and velocities of the center of gravity at the end of the step are developed. The limitation of a General member of the sequence of these coordinates and velocities at a variety of the most simple algorithms [14] is investigated and the operation of the control system of the mentioned physical model is illustrated.

Key words: Walking robots, Movement Control, Dynamic Stability, biped walking.

REFERENCES

[1] A. Borina, V. Tereshin. Control of biped walking robot using equations. Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (Switzerland: Springer, 2015, 23-31).

[2] A.P. Borina, V.A. Tereshin. Problem of Spatial Movement of Dinamic Walking Device. Modern Mechanical Engineering. Science and Education. Saint-Petersburg, 2013, pp. 631-641.

[3] A.P. Borina, V.A. Tereshin. Even Movement of humanoid robot. Modern Mechanical Engineering. Science and Education. Saint-Petersburg, 2014, pp. 160-162.

[4] A.P. Borina, V.A. Tereshin. Spatial Movement of Walking Device Under the Influence of Operating Force from a foot. Modern Mechanical Engineering. Science and Education. Saint-Petersburg, 2012, pp. 177-188.

[5] B. Brogliato, Some perspectives on the analysis and control of complementarity-systems. IEEE Transactions on Automatic Control, n. 48(6), pp. 918‑935, 2003.

[6] B. Brogliato, S.I. Niculescu, M. Monteiro-Marques. On the tracking control of a class of complementarity- slackness hybrid mechanical systems. Systems and Control Letters, n. 39, pp. 255-266, 2000.

[7] B. Brogliato, A.A. ten Dam, L. Paoli, F. Genot, M. Abadie. Numerical simulation of finite dimensional multibody nonsmooth mechanical systems. ASME Applied Mechanics Reviews, n. 55, pp. 107‑150, 2002.

[8] C. Chevallereau. Time-scaling control of an underactuated biped robot. IEEE Transactions on Robotics and Automation, n. 19(2), 362‑368, 2003.

[9] C. Chevallereau, Y. Aoustin. Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. Robotica, n. 19, pp. 557-569, 2001.

[10] S. Collins, M. Wisse, A. Ruina. 3-d passive dynamic walking robot with two legs and knees. International Journal of Robotics Research, n. 20(7), pp. 607‑615, 2001.

[11] H. Dankowicz, J. Adolfsson, A. Nordmark. 3D passive walkers: finding periodic gaits in the presence of discontinuities. Nonlinear Dynamics, n. 24, pp. 205‑229, 2001.

[12] S.L. Das, A. Chatterjee. An alternative stability analysis technique for the simplest walker. Nonlinear Dynamics, n. 28(3), pp. 273-284, 2002.

[13] M. Gienger, K. LNoOer, F. Pfei:er. Practical aspects of biped locomotion. In B. Siciliono, & P. Dario (Eds.), Experimental robotics. (Berlin, Heidelberg: Springer. 2003, 95‑104).
[14] D.C. Kar, I.K. Kurien, K. Jayarajan. Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion. Mechanism and Machine Theory, n. 38, pp. 355‑366, 2003.
[15] H.K. Lum, M. Zribi, Y.C. Soh. Planning and control of a biped robot. International Journal of Engineering Science, n. 37, pp. 1319-1349, 1999.
[16] A. A. Pervozvansky. Course of automatic control theory. Saint-Petersburg, «Lan», 2010.
[17] T. Saidouni, G. Bessonnet. Generating globally optimised sagittal gait cycles of a biped robot. Robotica, n. 21, pp. 199‑210, 2003.

УДК 621.01:534.1; DOI 10.1872/MMF-2016-20

И. И. Вульфсон

К ПРОБЛЕМЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЦИКЛОВЫХ МЕХАНИЗМАХ

Иосиф Исаакович Вульфсон, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: jvulf@yandex.ru

Аннотация

Применительно к задачам динамики машин с цикловыми механизмами исследованы условия параметрического возбуждения колебаний при учёте нелинейных динамических эффектов, возникающих при совместном параметрическом и силовом возбуждении и взаимном влиянии медленных и быстрых движений. На основании метода условного осциллятора установлены условия динамической устойчивости. Обсуждаются результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: параметрические колебания, цикловые механизмы, динамическая устойчивость, диссипативные силы, биения.

1. Исполнительные органы многих технологических машин совершают периодические программные движения, которые осуществляются так называемыми цикловыми механизмами – рычажными, кулачковыми, шаговыми и др. Кинематические характеристики цикловых механизмов являются не только источником возмущений, но и формируют нелинейные и нестационарные динамические связи, которые могут привести к увеличению виброактивности системы и даже к её динамической неустойчивости [1 – 3]. Связь между координатами на «входе» и «выходе» циклового механизма описывается нелинейной функцией положения $y = \Pi(\varphi)$. Для идеального механизма, в котором отсутствуют зазоры и все звенья принимаются абсолютно жёсткими, $\varphi = \varphi_* = \omega t$, где $\omega = \text{const}$ – угловая скорость входного звена. Пусть $\varphi = \varphi_* + q$, где q – динамическая ошибка, возникающая при колебаниях. Принимая во внимание, что функция положения идеального механизма непрерывна и дифференцируема, произведём линеаризацию этой функции в окрестности программного движения: $\Pi(\varphi_* + q) \approx \Pi(\varphi_*) + \Pi'(\varphi_0)q$; здесь $\Pi' = d\Pi / d\varphi$ – первая геометрическая передаточная функция механизма (аналог скорости). Таким

образом, практически без ущерба для точности нелинейная связь трансформирована в нестационарную.

Реализуемый частотный диапазон параметрических резонансов обычно достаточно удалён от наиболее опасного главного параметрического резонанса, а резонансы высших порядков оказываются подавленными даже при малых диссипативных силах. Однако в современных технологических машинах и автоматических линиях нередки случаи, когда программное движение содержит высокочастотные составляющие. Кроме того, во время кинематического цикла может происходить подключение и отключение кинематических цепей или изменение масс перемещаемых объектов. При этом приведенные инерционные и упругие характеристики могут содержать не только низкочастотные, но и высокочастотные составляющие. В подобных случаях мы сталкиваемся с проблемой подавления параметрических резонансов при полигармоническом характере параметрического возбуждения. Практические приёмы определения областей динамической неустойчивости обычно базируются либо на различных модификациях метода малого параметра и других асимптотических методах, либо на численных методах [4 – 7].

Процедура решения подобных задач далеко не элементарна, особенно если иметь в виду не упрощённые эталонные модели с одной степенью свободы при моногармоническом параметрическом возбуждении, а реальные колебательные системы современных машин и механизмов, в которых динамические модели и параметрическое возбуждение, как уже отмечалось, имеют сложную структуру. Еще в большей степени задача усложняется при учете нелинейных факторов. В качестве основных анализируемых ниже проблем исследуются влияние следующих факторов:

- Переменность инерционных и упругих характеристик, которая в зонах параметрических резонансов может привести к нарушению условий динамической устойчивости;
- Наличие медленных и быстрых составляющих в передаточных функциях и в приведенных вынуждающих силах, что при учёте нелинейности диссипативных сил влияет на пороговые значения глубины пульсации параметров системы;
- Взаимовлияние вынужденных и параметрических колебаний;
- Возбуждение низкочастотных резонансов цикловых механизмов на частоте биений.

В статье задача решается на базе метода условного осциллятора [1 –3, 8] , что в данном классе задач позволяет избежать ряда трудностей, возникающих при использовании традиционных методов.

2. Динамические модели, отображающие колебательные системы с цикловыми механизмами весьма разнообразны [1– 3], поэтому мы здесь ограничимся анализом следующего дифференциального уравнения, позволяющего описать приведенные выше задачи:

$$J_1(1+\mu\Pi_*'^2)\ddot{q}+R(q,\dot{q})+2\mu J_1\Pi_*'\Pi_*''\omega\dot{q}+c_1(1+\zeta\Pi_*'^2)K(q)=M(t)\Pi_*'-\mu J_1\Pi_*'\Pi_*''\omega^2. \quad (1)$$

Здесь $a(\varphi_*)=J_1(1+\mu\Pi_*'^2)$, $c(\varphi_*,q)=c_1(1+\zeta\Pi_*'^2)K(q)-$ приведенные к входному звену моменты инерции и коэффициенты жёсткости, где $K(q)-$ нелинейная функция μ, ζ – коэффициенты приведения. (В частном случае $\mu=J_2/J_1$, $\zeta=c_2/c_1$; J_i, c_i – моменты инерции и коэффициенты жёсткости входного и выходного звеньев); $R(q,\dot{q})-$ позиционная диссипативная сила, соответствующая коэффициенту рассеяния ψ (подробнее см. ниже); $M(\varphi_*)-$ внешний момент, приложенный к выходному звену; $\Pi_*'=\Pi'(\varphi_*)$; $\Pi_*''=\Pi''(\varphi_*)$; $()'=d/d\varphi_*$.

Временно в уравнении (1) исключим из рассмотрения нелинейные члены. Запишем соответствующее однородное дифференциальное уравнение в виде

$$a(t)\ddot{q}+b(t)\dot{q}+c(t)q=0. \quad (2)$$

На основании метода условного осциллятора решение уравнения (2) может быть представлено как [1–3, 8]

$$q=A_0\exp[-\delta_0\int_0^t\Omega(u)du]\sqrt{\frac{a(0)\Omega(0)}{a(t)\Omega(t)}}\sin\left[\int_0^t\Omega(u)du+\alpha\right]. \quad (3)$$

Здесь $\delta_0=\psi/(4\pi)-$ диссипативный коэффициент; ψ – коэффициент рассеяния; A_0, α – определяются начальными условиями.

Связь между функцией $\Omega(t)$, входящей в зависимость (3), и переменной собственной частотой $p(t)$ определяется следующим уравнением:

$$\ddot{z}-0{,}5\dot{z}^2+2\Omega_*^2e^{2z}=2p^2(t)\ , \quad (4)$$

где $z=\ln(\Omega/\Omega_*)$, Ω_* – произвольный параметр с размерностью частоты, играющий роль нормирующего множителя:

Дифференциальное уравнение (4) соответствует некоторой фиктивной колебательной системе с «жёсткой» нелинейной характеристикой, названной *условным осциллятором*. Роль вынуждающей силы здесь играет функция, пропорциональная квадрату «собственной» частоты. Достаточно располагать частным решением этого уравнения, чтобы формула (3) превратилась в расчетную зависимость, описывающую колебательный процесс. При медленном изменении параметров $p=p_0\approx\Omega$, и решение (4) совпадает с ВКБ–приближением первого порядка [9]. Пусть $\Pi'=\Pi_0'+\Pi_\nu'$, где слагаемые соответствуют медленным и быстрым движениям. Для определённости примем $\Pi'(\varphi)=h[\sin\varphi+\varepsilon\sin(\nu\varphi+\gamma)]$; первое слагаемое отвечает «медленной», а второе – «быстрой» гармонике с частотой ν и глубиной пульсации ε. (Здесь и ниже звездочка при φ опускается.). Теперь

вместо фиксированной константы Ω_* следует принять функцию $p_0(t)$, равную медленно меняющейся составляющей «собственной» частоты $p(t) = \sqrt{c(t)/a(t)}$. На основании (3), (4) определим изменение амплитуды колебаний:

$$A(\varphi) = A_0 \sqrt{a(0)/a(\varphi)} \exp\left[-\delta \int_0^{\varphi} p_0(\varphi) d\varphi - 0,5[z(\varphi) - z(0)] \right], \qquad (5)$$

Обычно достаточную для инженерных приложений точность даёт линеаризация уравнения (4) при отображении экспоненциального члена первыми двумя членами ряда Тейлора [3, 4] :

$$\ddot{z} + 4p_0^2(t) z = 2[p^2(t) - p_0^2(t)]. \qquad (6)$$

Резонанс линеаризованного условного осциллятора соответствует главному параметрическому резонансу, который возникает в окрестности «плавающей» частоты $2p_0$. Частное решение уравнения (6) имеет вид модифицированной формулы Дюамеля

$$z = \frac{1}{\sqrt{p_0(\varphi)}} \int_0^{\varphi} \frac{[p(u)^2 - p_0(u)^2]}{\sqrt{p_0(u)}} \sin[2 \int_u^{\varphi} p_0(\tau) d\tau] du. \qquad (7)$$

Заметим, что аналитический подход в данном случае необходим в большей степени для оценок качественного характера и оптимизации параметров при динамическом синтезе, так как при инженерных расчетах можно также воспользоваться численным решением нелинейного уравнения (4).

На основании (7) мы с некоторым запасом получаем лаконичное условие динамической устойчивости в области главного параметрического резонанса при совместном учете быстрых и медленных изменений параметров:

$$\vartheta > \vartheta^* = -0,5 \Delta z / p_* , \qquad (8)$$

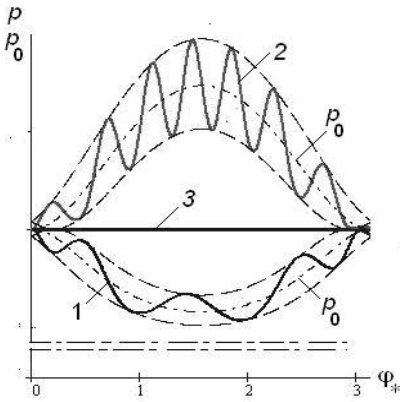
где $\Delta z = z(2\pi) - z(0)$; $p_* = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} p_0(\varphi) d\varphi$.

Как следует из (5), условие (8) исключает рост амплитудного уровня при $t \to \infty$, но такая возможность сохраняется внутри кинематического цикла из-за переменности периодически изменяющегося инерционного параметра $a = a(\varphi)$. Поскольку $a(\varphi) = a(2\pi)$, работа этой составляющей за период $2\pi/\omega$ равна нулю, что свойственно гироскопическим силам. Однако в пределах цикла возможны зоны, в которых $dA/d\varphi > 0$, что нередко приводит существенным динамическим ошибкам при реализации программного движения [10, 11]. Условие $dA/d\varphi < 0$ можно представить как

$$\vartheta > \vartheta^* = \pi p_0^{-1} \left| (a'/a + z') \right| = \pi p_0^{-1} \left| a'/a + p'/p - p_0'/p_0 \right| \qquad (9)$$

Отметим, что неравенство (9) совпадает с результатами, полученными на основании прямого метода Ляпунова, устанавливающего достаточное условие динамической устойчивости [1 –3]. Весьма эффективным способом устранения возможности возбуждения параметрических резонансов явля-

ется выполнение условий квазистационарности [10, 11]. При реализации этих условий, несмотря на переменность параметров системы, «собственные» частоты в первом приближении сохраняют постоянное значение, и отсутствует рост энергии на интервале кинематического цикла.



Для рассматриваемой модели условия квазистационарности удовлетворяются согласно (1) при $\mu = \zeta$. Тогда на основании (7) $z \equiv 0$, и выполняется условие (8), исключающее возбуждение главного параметрического резонанса. На рис.1 для ряда типовых случаев приведены графики $p(\varphi_*), p_0(\varphi_*)$ при $h = 1;\ \varepsilon = 0,2;\ \nu = 7$.

Рис. 1.Изменение «собственных» частот:
1– $\mu = 0,25; \zeta = 0$ *; 2*– $\mu = 0;\ \zeta = 0,25$ *; 3*– $\mu = \zeta = 0,25$

3. В условиях (8), (9) диссипативные силы учитывались на основании заданного значения ϑ (или ψ, δ), описывающих нелинейную позиционную диссипативную силу, которая может быть представлена как $R(q,\dot{q}) = -|R|u(|\dot{q}| - |\mathrm{v}|)\mathrm{sign}\dot{q}$, где v - скорость, связанная с дополнительным движением («чужие» гармоники, переносное движение и т.п.); u – единичная функция ($u = 1$ при $|\dot{q}| > |\mathrm{v}|$ и $u = 0$ при $|\dot{q}| < |\mathrm{v}|$). При этом эффективные значения диссипативных характеристик зависят от вынужденных колебаний и могут существенным образом уменьшиться: $\psi_* = \sigma(\lambda)\psi$. Корректирующий множитель $0 < \sigma < 1$ определяется зависимостью $\sigma = \lambda(0,4 + 0,5\lambda)/(1 + 0,5\lambda^2)$, где $\lambda = \max\dot{q}/\max\mathrm{v}$ [1 –3, 12].

Физические предпосылки этой коррекции связаны с тем, что мы обычно располагаем ограниченной исходной информацией, заимствованной из экспериментальных материалов в форме некоторых интегральных диссипативных характеристик, таких как коэффициент рассеяния ψ или логарифмический декремент ϑ, которые получены при гармонических колебаниях некоторых эталонных моделей. Однако, «настраивая» для определения этих параметров реальную механическую систему на гармонический режим, мы по существу экспериментальным методом осуществляем гармоническую линеаризацию диссипативных сил. Поэтому полученная таким образом информация о диссипативных свойствах системы является далеко не полной и отражает их лишь в той мере, в какой гармонически линеаризованная диссипативная сила соответствует действительному сопротивлению. Естественно, что при многочастотных колебаниях это соответствие нарушается, причём при определённых условиях – существенным образом. При малых значениях λ функция $\sigma(\lambda)$

близка к линейной, т.е. пропорциональна амплитуде. Это, в частности, используется для вибрационной линеаризации сил сухого трения.

На рис.2 приведены графики, полученные компьютерным моделированием уравнения (1) при пороговом значении ω, соответствующем границе динамической неустойчивости, для двух случаев: без коррекции диссипативных параметров (рис.2,а) и с учетом коррекции из-за возбуждаемых вынужденных колебаний (рис.2,б). Как следует из анализа графиков, для выполнения условий динамической устойчивости исходное значение диссипативного параметра $\delta = 0{,}03$ увеличилось в три раза. Кроме того, также возрастает интенсивность параметрического возбуждения.

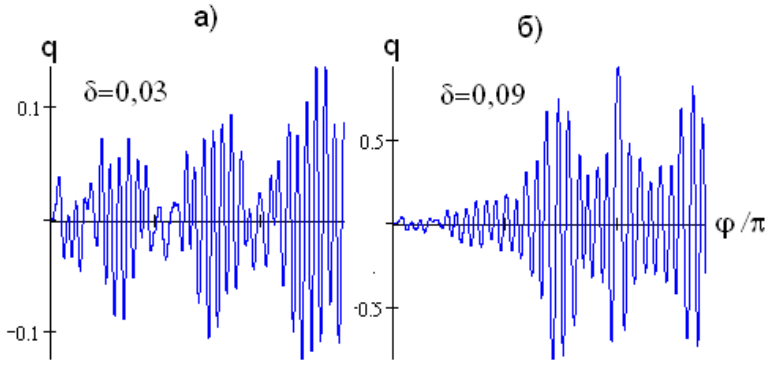


Рис. 2. К анализу коррекции диссипативных параметров

4. При совпадении частоты гармоники вынуждающей силы с частотой главного параметрического резонанса амплитуда обратно пропорциональна функции $\left|\vartheta - \vartheta^* \cos 2\Delta\gamma\right|$. где $\Delta\gamma$ – фазовый сдвиг между силовым и параметрическим возбуждением [1–3]. Таким образом, резонансная амплитуда A отвечает некоторой условной системе с измененным уровнем диссипации (рис.3).

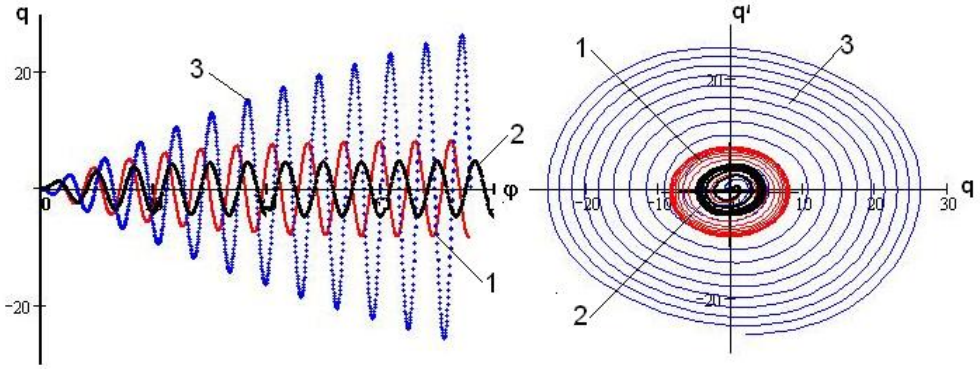


Рис.3. Влияние фазового сдвига $\Delta\gamma$ на резонансный режим

Исследуются три резонансных режима при заданном значении логарифмического декремента $\vartheta = 0,39$. Режим 1 (кривые 1) отвечает вынужденным колебаниям, при котором коэффициент динамичности $\kappa = \pi / \vartheta = 8,05$. При режимах 2 и 3 наряду с силовым возбуждением имеет место параметрическое возбуждение с глубиной пульсации $\varepsilon = 0,2$ и $\Delta\gamma = \pi / 2;\ 0$ (кривые 2, 3). Согласно (9) $\vartheta^* = 0,31$; тогда при режиме 2 имеем $\vartheta_{\text{ðåç}} = \vartheta_{\max} = 0,7$ (кривая 2), а при режиме 3 – $\vartheta_{\text{ðåç}} = \vartheta_{\min} = 0,08 < \vartheta^*$. Разумеется, при $\vartheta_{\text{ðåç}} < \vartheta^*$ вопрос о максимальной амплитуде теряет смысл, так как в этом случае система динамически неустойчива. При $\vartheta^* < \vartheta < 2\vartheta^*$ фазовый сдвиг $\Delta\gamma$ существенно влияет на интенсивность роста резонансной амплитуды (рис.4). На графике $q(\varphi)$ четко видно, что при относительно большом эффективном значении $\vartheta_{\max}$ (кривая 1) на начальном этапе реализуется режим силового резонанса, который далее перекрывается экспоненциальным нарастанием амплитуд, свойственным параметрическому резонансу. При $\vartheta_{\min}$ (кривая 2) этап силового возбуждения практически не заметен.

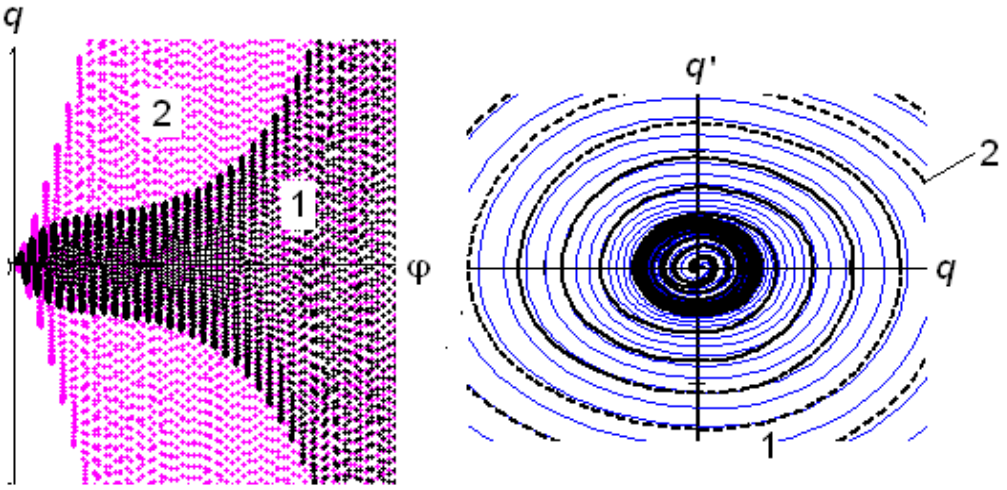


Рис.4. Влияние $\Delta\gamma$ на резонанс при $\vartheta^* < \vartheta < 2\vartheta^*$: 1 – $\Delta\gamma = \pi / 2$; 2 – $\Delta\gamma = 0$

Далее проведем коррекцию полученных результатов при совместных силовых и параметрических возмущениях и учете высокочастотных воздействий на резонансные колебания (см. п. 3). При учете полученных корректированных диссипативных параметров можно показать, что при наиболее неблагоприятном соотношении фаз максимальная резонансная амплитуда в этом случае определяется как $A^* = \chi A$, где A – амплитуда при отсутствии высокочастотного возбуждения, χ – коэффициент возрастания резонансной амплитуды, который определяется как

$$\chi = 0,5\left[1 + sL + \sqrt{(1+sL)^2 + 4s(1-L)}\right] / (1-L),$$

где $L = 2\pi\varepsilon / \vartheta, \quad s = \sigma^{-1}(\lambda) - 1.$

Параметр L отражает влияние параметрического возбуждения, а параметр s– высокочастотную компоненту вынуждающей силы. При $L \to 1$ нарушаются условия динамической устойчивости, поэтому $\chi \to \infty$ не зависимо от значения s.

5. Далее учтем нелинейность упругой характеристики. Запишем уравнение (1), в виде

$$(1+\mu\Pi_0'^2)\ddot{q} + f(q,\dot{q}) + k^2(1+\zeta\Pi_0'^2)K(q) = w\sin\omega t\cos\Omega t - 0{,}5\mu\omega^2\sin 2\omega t, \quad (10)$$

где $f(q,\dot{q}) = R(q,\dot{q}) / J_1; w(t) = M_*\cos(\Omega t)\Pi_*' / J_1; \quad k = \sqrt{c_1 / J_1}; M_*, \Omega$ – амплитуда и частота момента, приложенного к выходному звену.

При этом колебательная система подвержена бигармоническому возбуждению при $\Omega >> \omega$. В уравнении (10) опущена гироскопическая составляющая, пропорциональная $\dot{q}$, работа которой за период $2\pi/\omega$ обращается в нуль.

Пусть $\Pi_0' = h\sin\varphi, \Pi_0'' = h\cos\varphi$, а нелинейная восстанавливающая сила отвечает муфте с кубической характеристикой. Тогда $K(q) = q(1+\beta q^2)$, а «собственная» частота после гармонической линеаризации равна

$$p(\varphi, A) = k\sqrt{(1+\zeta\Pi_0'^2)((1+0{,}75\beta A^2)/(1+\mu\Pi_0'^2)}\ . \quad (11)$$

Для аналитического решения задачи метод условного осциллятора был совмещен с методом гармонической линеаризации. На рис.5,а показано существенное изменение фазовых портретов условного осциллятора при учете нелинейности упругой характеристики, что привело к повышенной пульсации «собственных» частот p (рис. 5,б), а следовательно, и к изменению пороговых условий параметрического возбуждения. Даже при соблюдении условий динамической устойчивости значительно возрастает амплитуда вынужденных колебаний A (рис. 5,в).

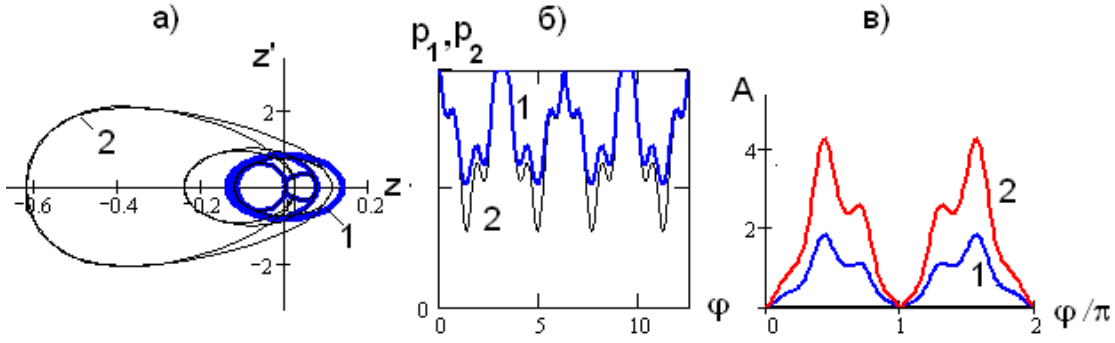


Рис.5. К анализу влияния нелинейностей: 1. $\beta = 0$ *; 2.* $\beta = -0{,}25$

Также следует отметить, что при малой диссипации переходный процесс выхода на установившийся режим завершается потерей устойчивости и

затягиванием в зону повышенных амплитуд (рис.6). Аналогичная картина наблюдается при изменении фазовых сдвигов между силовым и параметрическим возбуждением

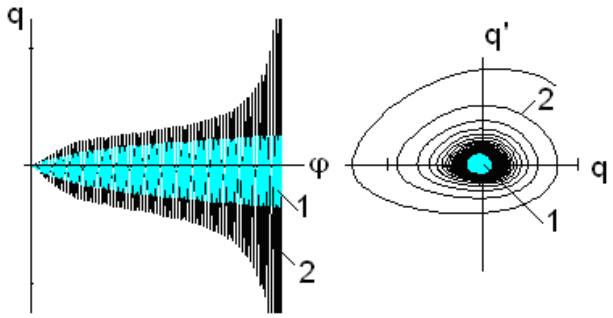


Рис.6. К анализу эффекта затягивания: 1. $\delta = 0{,}036$ *; 2.* $\delta = 0{,}07$

Для более чёткого выявления динамических эффектов, связанных с амплитудной модуляцией вынуждающей силы, примем в (1) $\mu = \zeta$, что соответствует условию квазистационарности (см. выше). При этом нестационарная связь в явном виде отсутствует и, на первый взгляд, параметрических эффектов ожидать не следует. На рис.7 показан близкий к параметрическому возбуждению режим, когда нелинейность упругой характеристики привела к локальным нарушениям динамической устойчивости, которые чередуются со срывами, образуя интенсивный режим биений.

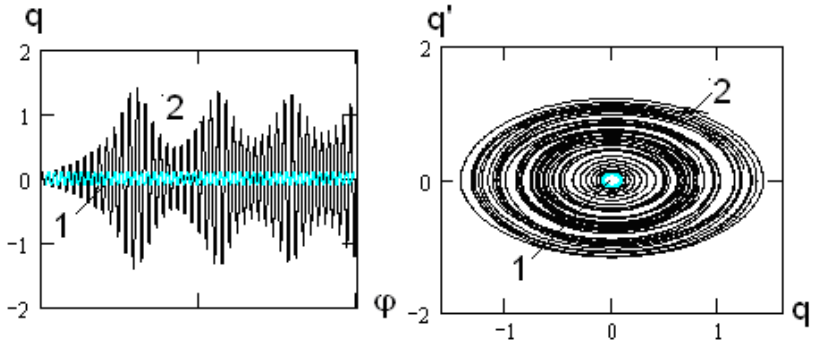


Рис.7 . Сопоставление колебательных режимов: 1. $\beta = 0$ *; 2.* $\beta = -0{,}25$

В связи с исследуемой проблемой несомненный интерес представляет выявленный М.З. Коловским динамический эффект, который состоит в том, что при определенных условиях имеет место низкочастотное резонансное возбуждение на частоте биений, возникающих при высокочастотной амплитудной модуляции [13]. Применительно к задачам динамики машин этот эффект частично рассмотрен в работе [14]. Можно показать, что нелинейная составляющая восстанавливающей силы описывается зависимостью $K(q) = [1 + 1{,}5\beta h(\omega^2 / \Omega^2)\sin^2\varphi + \beta q^2]q$. Биения приводят к пульсации собственной частоты $p(A)$, что, в свою очередь, создаёт ситуацию, близкую к параметрическому возбуждению.

Заключение

В данной статье получили свое дальнейшее развитие методы решения ряда нелинейных задач динамики цикловых машин. В частности, предложены и исследованы способы снижения виброактивности за счет подавления некоторых динамических эффектов, возникающих при совместном и параметрическом и силовом возбуждении и учете взаимовлияния медленных и быстрых движений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 309 с.
2. Вульфсон И.И. Динамика цикловых машин. – СПб.: Политехника, 2013. – 425 с.
3. Vulfson, I. Dynamics of Cyclic Machines. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2015. – 410 p.
4. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Физматгиз, 1958. – 408 с.
5. Митропольский Ю. А. Проблемы асимптотической теории нестационарных колебаний. – М.: Наука, 1964. – 432 с.
6. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Гостехтеоретиздат, 1956. – 600 с.
7. Шмидт Г. Параметрические колебания. – М.: Мир. 1978. – 336 с.
8. Вульфсон И. И. О колебаниях систем с параметрами, зависящими от времени.// Прикладная математика и механика.1969. Т.33, №2.– С. 331–337.
9. Фреман Н., Фреман П. У. ВКБ - приближение. М.: Мир, 1967. – 168 с.
10. Vulfson I.I. Quasistationarity of Dynamic Modes in Cyclic Mechanisms Forming Rheonomic Oscillating Systems with Lattice Structure // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. No. 4. Pp. 312–318.
11. Вульфсон И.И. К проблеме квазистационарности динамических характеристик цикловых механизмов //Теория механизмов и машин. 2015. № 1. С. 6 – 15.
12. Vulfson I.I. Some Nonlinear Effects of Machine Dynamics// Journal of Vibroingeneering. 2008. Vol. 10, No. 4 .– Pp. 442–450.
13. Коловский М.З. О влиянии высокочастотных возмущений на резонансные колебания в нелинейной системе // Динамика и прочность машин. Труды ЛПИ. № 226. М., Л.: Машгиз, 1963.– С. 7–17
14. Вульфсон И.И. Нелинейные резонансные колебания привода на частоте амплитудной модуляции высокочастотного возбуждения // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2005. № 6. – С. 17–22

I.I. Vulfson

TO THE PROBLEM OF PARAMETRIC EXCITATION OF VIBRATIONS IN CYCLIC MECHANISMS

Saint Petersburg State University of of Industrial Technologies and Design

Abstract

With regard to dynamics problems of cyclic mechanisms we investigated the conditions of parametric excitation of vibrations by taking into account non-linear dynamic effects resulting from the joint action of parametric and forced excitation, and the joint influence by slow and fast movements. On the basis of the conditional oscillator method are set dynamic stability conditions. The results of computer simulation are discussed.
Key words: parametric oscillations, cyclic mechanisms, dynamic stability, dissipative forces, beats.

REFERENCES

[1] Vulfson, I.I. Vibrations in machines with cyclic action mechanisms., Lenungrad: Mashinostroenie, 1990.
[2] Vulfson, I.I Dynamics of Cyclic Machines. Sankt Petersburg: Politechnica, 2013.
[3] Vulfson, I. Dynamics of Cyclic Machines. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2015.
[4] Bogoliubov, N.N.& Mitropolsky ,Ju.A.: Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. New York: Gordon & Breach, 1958.
[5] Mitropolsky, Ju.A. Problems of the asymptotic theory of nonstationary vibrations. Moskow: Nauka, 1964.
[6] Bolotin, V.V. Stability of elastic systems. Moskow: Gostehteoretizdat, 1956.
[7] Schmidt G. Parametric oscillations. Moskow: Mir, 1978.
[8] Vulfson, I. I. Oscillations of systems with parameters depending on the time. // Prikladnaya matematika i mechanika. 1969. V. 33, No2, 331-337.
[9] Freman, N. & Freman, P. JWKB-approximation. Amsterdam: North Holand Publ. Comp., 1967.
[10] Vulfson, I.I. Quasistationarity of Dynamic Modes in Cyclic Mechanisms Forming Rheonomic Oscillating Systems with Lattice Structure // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. No. 4. 312–318.
[11] Vulfson, I. I. To the problem of quasi-stationary dynamic characteristics of cyclic mechanisms // Theory of mechanisms and machines. 2015. № 1. 6 – 15.
[12] Vulfson, I.I. Some Nonlinear Effects of Machine Dynamics// Journal of Vibroingeneering. 2008. Vol. 10, No. 4. 442–450.

[13] Kolovskiy, M. Z. On the effect of high-frequency of perturbations on resonant oscillations in a nonlinear system // Dynamics and strength of machines. Proceedings of the LPI. No 226. Moskow, Leningrad : Mashgiz, 1963. 7–17.
[14] Vulfson, I.I. Nonlinear resonant oscillations of a drive at the amplitude-modulation frequency of high-frequency excitation.// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2005. No. 6. 13–17.

УДК 621 + 531.8; DOI 10.1872/MMF-2016-21

А.Н. Евграфов[1], Г.Н. Петров[2]

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ

[1]Александр Николаевич Евграфов, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: alexevgrafov@mail.ru .

[2]Геннадий Николаевич Петров, к.т.н., доцент кафедры теории механизмов и маши, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845.

Аннотация

Рассмотрены 2D и 3D модели механизмов, созданные с помощью пакетов «Model Vision» и «AnyLogic» Для исследования отобраны механизмы, имеющие вычислительные особенности: механизмы с избыточными связями, с избыточными входами, с сингулярными положениями, многоподвижные механизмы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, интерактивные модели, Model Vision, AnyLogic, турбулентный смеситель, платформа Стюарта, шарнир Гука, автомобильный дифференциал.

Развитие компьютерной техники увеличивает значимость вычислительного эксперимента для многих задач механики, в том числе для расчета механизмов и машин. В вычислительном эксперименте на первом этапе исследуемый объект заменяется математической моделью, представленной в форме дифференциальных либо иных уравнений. На следующем этапе создается программа, реализующая их решение соответствующими численными методами. Современные средства визуализации полученных результатов позволяют увидеть не только таблицы чисел и графики, но и сами исследуемые объекты с большей или меньшей степенью детализации. Особый интерес для исследователей представляет создание интерактивных анимированных моделей [1, 2].

Появились работы, в которых представлена методика компьютерного моделирования анимации механических систем без применения специальных программных приложений с использованием визуальных анимационных эффектов [3]. Для решения задач визуализации результатов расчетов

хорошо подошли математические пакеты, такие, как Mathlab [4, 5], MathCad [6, 7, 8, 9]. Интересный пример использования программы GeoGebra в изучении кинематической геометрии плоских механизмов показан в работе [10]. Анимация кинематических схем различных механизмов описана в работах [11, 12].

В данной статье представлено использование пакетов «Model Vision» и «AnyLogic», которые позволяют значительно упростить решение математической модели и обеспечить визуализацию решаемой задачи. Подробно с этими программными комплексами можно ознакомиться на сайте http://www.xjtek.com.

Пакеты позволяют:

1. Проводить вычислительный эксперимент, базирующийся на принципах объектно-ориентированного программирования. Действующая модель может быть разбита на множество отдельных устройств, взятых из имеющейся библиотеки или созданных самим пользователем. Связи между устройствами устанавливаются с помощью легко осваиваемого графического интерфейса.
2. Решать алгебраические, дифференциальные уравнения. Запись алгебро-дифференциальных уравнений производится на языке, близком по форме к языку пакета MATHCAD.
3. Создавать для каждого устройства карты поведения, которые способны описывать смену поведения динамических систем.

Среды легко осваиваются, удобны в использовании. В данной статье приведены описания нескольких моделей механических систем, созданных с помощью этих пакетов. Для каждой модели были использованы:

1. Встроенная в пакет 2D-анимация. С ее помощью создавался «пульт управления» с различными индикаторами, кнопками, бегунками, позволяющими в процессе эксперимента дискретно или плавно менять отдельные параметры модели.
2. 3D-анимация для наблюдения за движением исследуемого объекта в пространстве во время проведения вычислительного эксперимента («Model Vision»).
3. Окна графиков временных и фазовых диаграмм.

Рассмотрим несколько моделей, реализованных в указанных пакетах.

1. Турбулентный смеситель («Model Vision»)

На рис. 1 показана работа замкнутого пространственного шестизвенного механизма. Механизм связывает две параллельные оси 1 и 5. Пять подвижных звеньев соединены между собой шестью вращательными кинематическими парами.

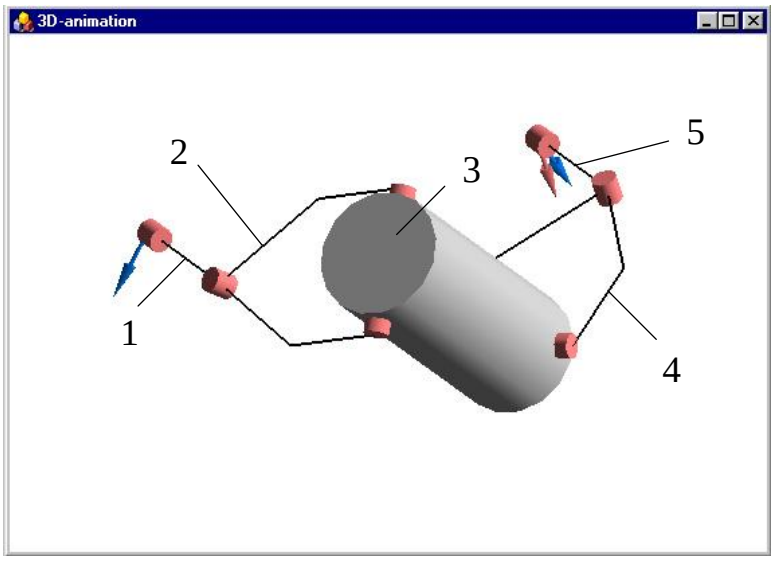


Рис. 1.

Механизм имеет одну избыточную (лишнюю) связь за счет того, что оси кинематических пар, соединяющих каждое подвижное звено с соседними, взаимно перпендикулярны. Звено 3 выполнено в виде полого герметичного цилиндра. При сложном пространственном движении этого звена жидкость или сыпучие материалы, помещенные внутрь цилиндра, перемешиваются.

2. Платформа Стюарта с избыточными входами («Model Vision»)

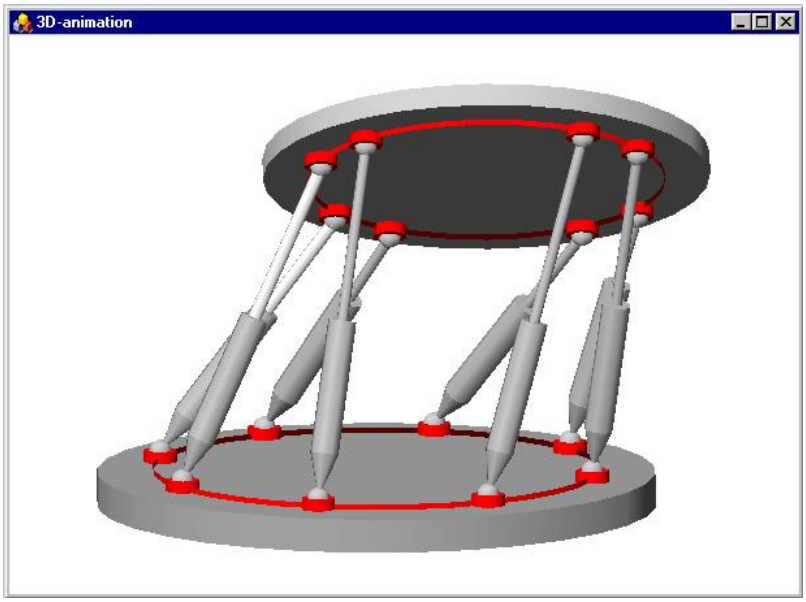


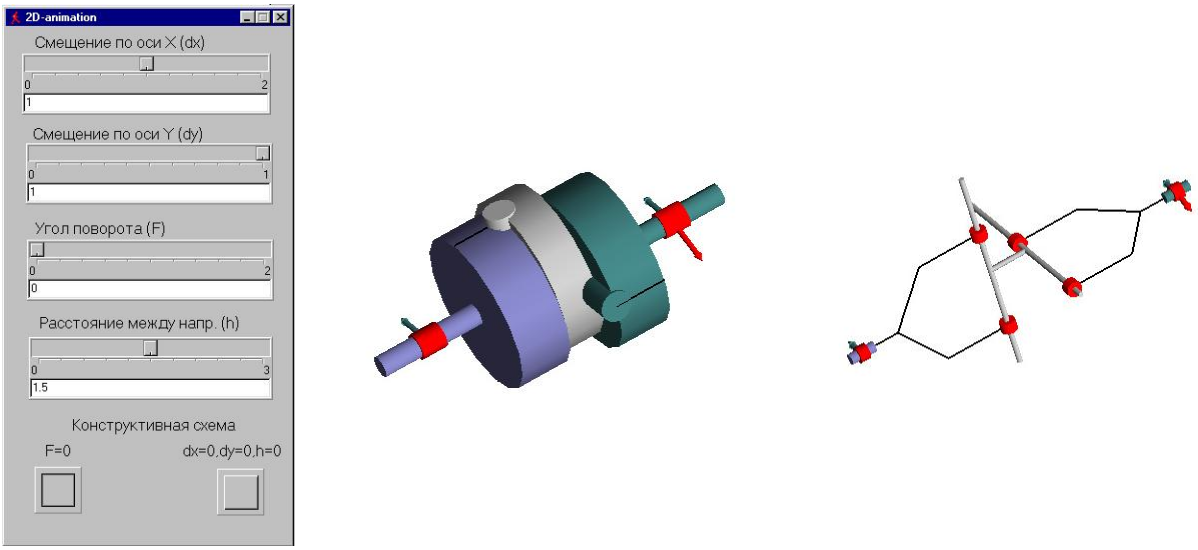
Рис. 2.

Механизм (рис. 2) предназначен для позиционирования платформы в пространстве. «Ноги» платформы выполнены в виде гидроцилиндров, связанных сферическими шарнирами с самой платформой и с основанием.

Для нормальной работы механизма достаточно иметь шесть входов, поэтому в каждый момент времени два гидроцилиндра должны быть отключены. Активные (работающие) гидроцилиндры помечены более светлым цветом их штоков, а неактивные – более светлым цветом. Силовой расчет замкнутых рычажных механизмов описан в работе [13]. Выбор шести активных приводов, обеспечивающих оптимальную работу механизма, описан в работе [14]. Расчет геометрии и кинематики замкнутых механизмов, представленных выше, подробно излагается в работах [15, 16].

3. Муфта («Model Vision»)

Муфта передает вращение между двумя валами с параллельными осями. На рис. 3, *a* показано окно 2D-анимации.



a) *b*) *c*)

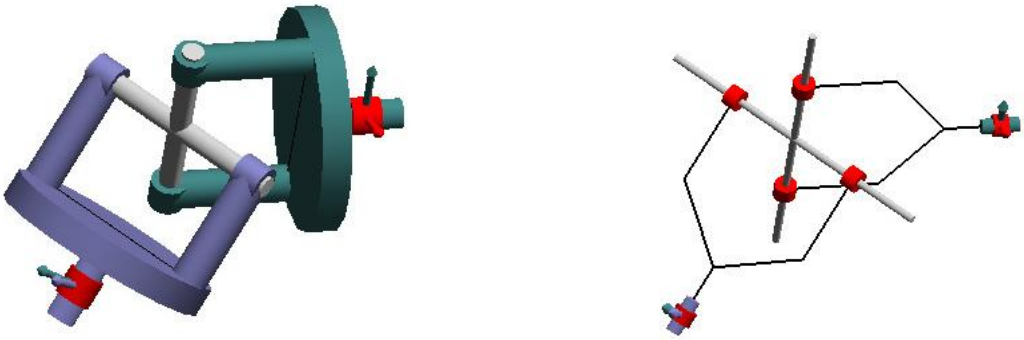
Рис. 3

Установим с его помощью угол скрещивания осей $F = 0$, расстояние между направляющими $h = 1{,}5$; несоосность по осям $dx = 1$, $dy = 1$. На рис. 3, *b* показана конструктивная схема муфты, а на рис. 3, *c* – ее кинематическая схема (переход от одной схемы к другой осуществляется нажатием соответствующей кнопки в окне 2D-анимации). Оси 1 и 3 соединены двумя взаимно перпендикулярными поступательными кинематическими парами с вкладышем 2 и имеют одинаковую угловую скорость вращения.

4. Шарнир Гука («Model Vision»)

Шарнир Гука предназначен для передачи вращения между валами со скрещивающимися осями. В том же окне 2D-анимации (рис. 3, *a*) установим угол скрещивания осей $F = 1$, $dx = dy = h = 0$. На рис. 4 показаны конструктивная (*a*) и кинематическая (*b*) схемы шарнира. В данном случае

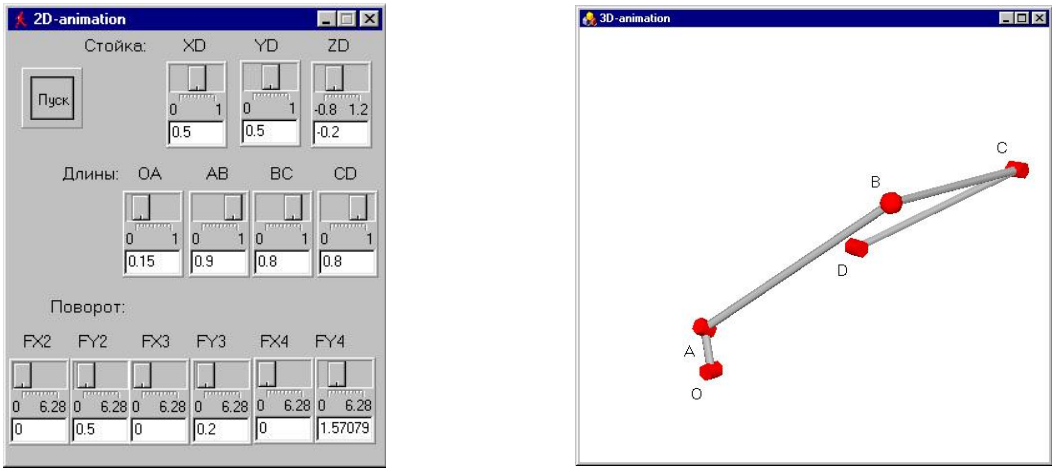
звенья 1 и 3 соединены с вкладышем 2 вращательными кинематическими парами, оси которых скрещиваются под углом 90°.



a) *b*)

Рис. 4

5. Пространственный механизм («Model Vision»)



a) *b*)

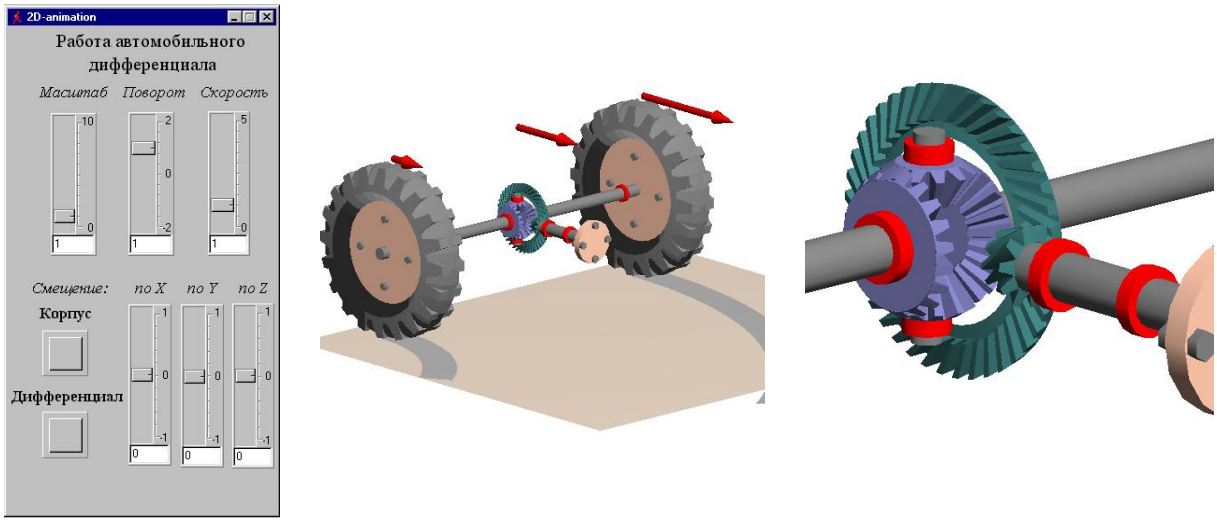
Рис. 5

На рис. 5, *a* показана панель 2D-анимации, которая позволяет установить нужные длины звеньев (*OA*, *AB*, *BC*, *CD*) и координаты присоединения шарнира *D* к стойке (*XD*,*YD*,*ZD*) пространственного пятизвенного механизма с одной степенью подвижности (рис. 5, *b*). Четыре подвижных звена составляют замкнутую кинематическую цепь.

Шарниры *O*, *A*, *C*, *D* цилиндрические, шарнир *B* сферический. Для цилиндрических кинематических пар на панели 2D-анимации указывается ориентация относительно локальных систем координат (*FX*, *FY*). На данном примере нетрудно убедиться, что даже при незначительном изменении размеров механизм часто попадает в так называемые «особые положения», когда он не может провернуться.

6. Задний мост автомобиля («Model Vision»)

На рис. 6, *a* показана панель 2D-анимации, на рис. 6, *b* – конструктивная схема заднего моста заднеприводного автомобиля.



a) *b*) *c*)

Рис. 6

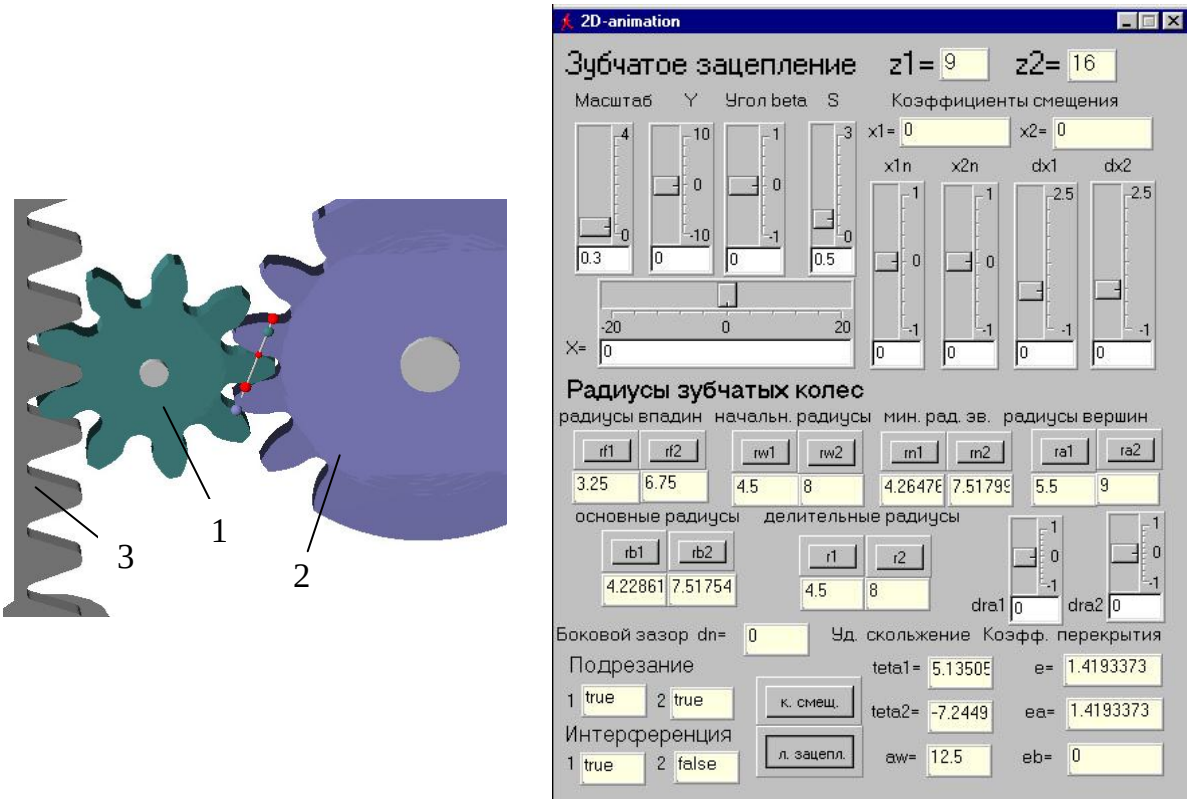
Кнопками «Корпус» и «Дифференциал» на панели 2D-анимации можно «снять» (сделать невидимыми) корпус моста и крышку автомобильного дифференциала. Соответствующими бегунками можно сместить рисунок по координатам *X*, *Y*, *Z* и изменить масштаб (рис. 6, *c*). Коэффициент *KV* («Поворот») показывает соотношение скорости левого колеса и средней скорости моста ($-2 < KV < 2$). Изменяя этот коэффициент, можно наблюдать работу дифференциала при вращении левого и правого колес с разными скоростями. Бегунок «Скорость» позволяет увеличить или уменьшить среднюю скорость двигателя.

7. Зубчатое зацепление («Model Vision»)

На рис. 7, *a* изображено зацепление зубчатого колеса 1 с колесом 2 и инструментальной рейкой 3. Модуль зубчатого зацепления m принят равным 1мм. С помощью панели 2D-анимации (рис. 7, *b*) можно изменять следующие параметры:

*x*1*n*, *x*2*n* – номинальные коэффициенты смещения при нарезании колес (для беззазорного зацепления);

*dx*1, *dx*2 – добавочные коэффициенты смещения при нарезании колес (они не приводят к изменению межосевого расстояния, т.е. появляется боковой зазор в зацеплении);



a) *b*)

Рис. 7

X, *Y*, «Масштаб» – можно сместить рисунок по координатам *X*,*Y* и изменить масштаб;

«beta» - угол наклона линии зуба (для косозубого зацепления);

S – толщина зуба;

*dra*1,*dra*2 – добавки к радиусам вершин.

Нажатием соответствующих кнопок можно сделать видимыми различные радиусы колес, линию зацепления, точки входа профилей в зацепление и пр. На рис. 7, *a* показана только линия зацепления и точки входа профилей в зацепление. На панель 2D-анимации (рис. 7, *b*) выводится также следующая справочная информация: числа зубьев колес, коэффициенты смещения, радиусы окружностей: делительных, основных, начальных, вершин, впадин; минимальные радиусы с эвольвентным профилем; межосевое расстояние, коэффициент перекрытия, коэффициенты удельного скольжения, наличие интерференции и подрезания. В среде «Model Vision» (до создания выполняемого файла) можно также задать нужные числа зубьев колес.

Пакет **AnyLogic** фирмы XJ Technologies (Экспериментальные объектные технологии) позволяет создавать динамические модели, которые в силу своей компактности могут размещаться в сети интернет и использоваться в режиме on-line. AnyLogic – профессиональная компьютерная про-

грамма, предназначенная для моделирования и визуализации поведения различных систем, в том числе механических. Для существенного упрощения создания пользователями новых моделей плоских рычажных механизмов авторами была создана библиотека объектов. Объект – это модель, описывающая какую-либо часть механизма: звено, группу Ассура. Объекты «звено» или «группа Ассура» похожи, но не тождественны звеньям и группам Ассура в привычном для ТММ смысле. Например, в библиотеке имеется 6 видов объекта «звено»: стойка с вращательной или поступательной парой, кривошип с вращательной или поступательной парой, а также звено присоединения с вращательной или поступательной парой. Два последних объекта предназначены для расчета координат точки наблюдения или точки присоединения следующей группы. В библиотеке используются двухзвенные группы Ассура. Они различаются не только по сочетанию вращательных и поступательных пар, но и номером звена в группе, длина которого является переменной. Например, в кулисной группе В_ПВ (Pair*RPR*1) переменная длина у первого звена, а в группе ВП_В (Pair*RPR*2) – вторая. Поэтому в библиотеке 10 объектов «Группа Ассура». Наконец, еще один объект – мотор – предназначен для изменения входной координаты. Из этих объектов, как из кубиков, пользователь может составить модель любого ассурова механизма 2-го класса.

С помощью построенной модели пользователь имеет возможность:

наблюдать механизм в движении,

изменять все параметры механизма,

получать графики функций $xE(t)$ и $yE(t)$ произвольно выбранной точки наблюдения E;

исследовать влияние параметров механизма на его работоспособность;

наблюдать особые (сингулярные) положения.

Можно также изменять масштаб изображения, скорость вращения кривошипа, положение механизма в окне анимации.

Интерфейс имеет примерно такой вид, как на рис. 8. Он включает в себя окно анимации, панель управления и окна вывода графиков.

Окно анимации предназначено для отображения анимации механизма, геометрических изменяемых параметров, положения точки наблюдения E, а также для сигнализации о попадании механизма в «особое» положение. С помощью ползунков на границе окна можно изменять положение начала неподвижной системы координат в окне анимации.

Панель управления содержит элементы управления, позволяющие запускать и останавливать анимацию механизма, задавать и изменять параметры механизма, положение точки наблюдения, а также управлять выводом информации в окне анимации.

Окна вывода графиков отображают графики функций $xE(t)$ и $yE(t)$, где E – задаваемая точка наблюдения. При нажатии переключателя «Схема» на

месте графиков выводится кинематическая схема механизма с условными обозначениями изменяемых параметров. Рассмотрим динамические модели, составленные с помощью пакета AnyLogic.

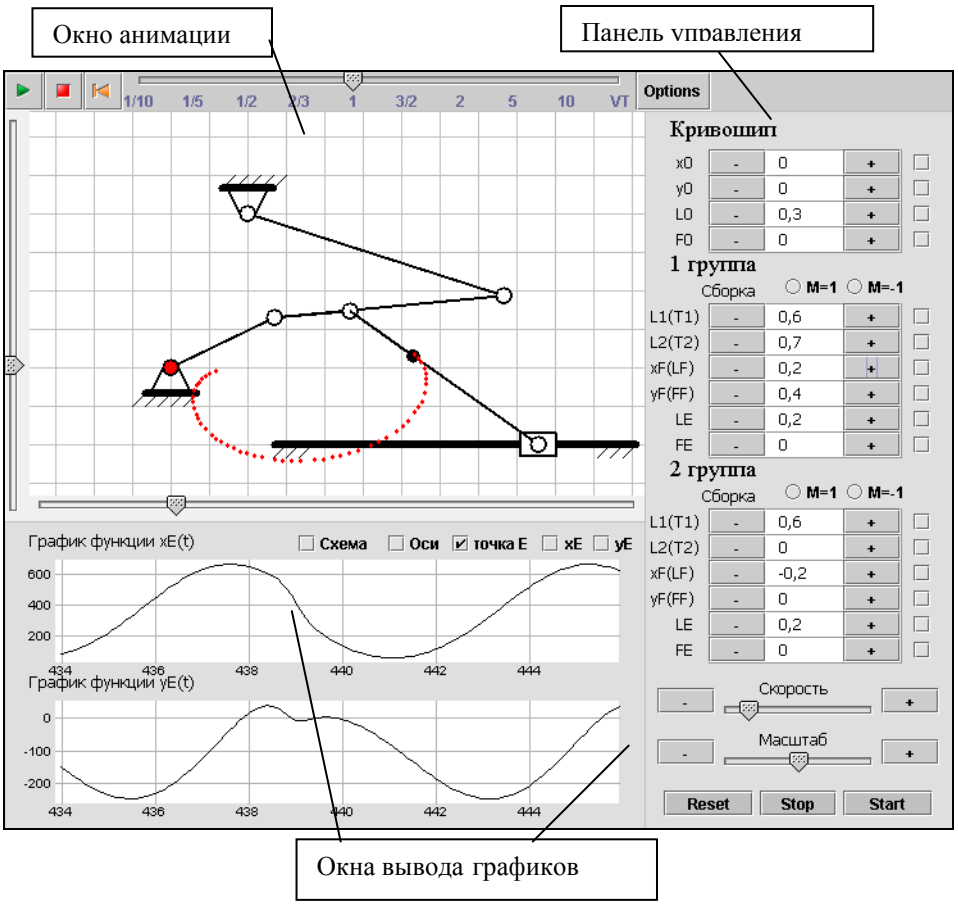


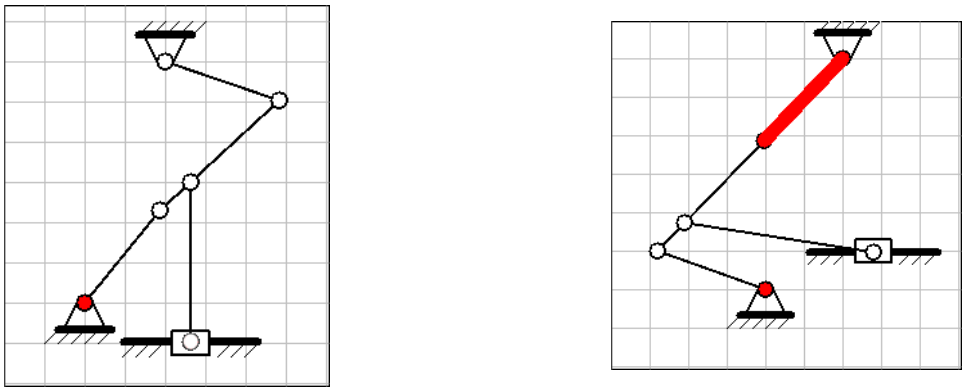
Рис. 8

8. 6-звенный рычажный механизм («AnyLogic»)

К кривошипу присоединены две группы Ассура: ВВВ и ВВП (см. рис. 8). Вторая группа Ассура присоединена с первому звену первой группы (шатуну). Точка наблюдения E находится на первом звене второй группы.

Полученную визуализированную модель механизма можно использовать как для исследовательских, так и учебных целей (например, для решения траекторной задачи).

Отметим, что в случае непроворачиваемости механизма программа не «зависает» и не останавливается, а автоматически изменяет размеры одного из звеньев таким образом, чтобы выполнялось условие существования кривошипа; изменяемая часть звена выделяется красным цветом и увеличенной толщиной.



a) *b*)

Рис. 9

На рис. 9, *a* приведена модель механизма в особом положении (шатун перпендикулярен линии перемещения ползуна). На рис. 9, *b* приведена модель механизма, для которого решения системы групповых уравнений для группы BBB не существует. Для того, чтобы механизм провернулся, длина звена увеличена (увеличенная часть звена отмечена утолщенной линией).

Несколько готовых примеров механизмов (10 четырехзвенных и 15 шестизвенных) помещены в библиотеку примеров AnyLogic.

9. V-образный двигатель внутреннего сгорания («AnyLogic»)

Модель демонстрирует работу четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания (рис. 10): перемещение звеньев, изменение давления в цилиндрах, открытие и закрытие клапанов. Модель позволяет изменять размеры звеньев, угол V, параметры кулачков распределительного вала.

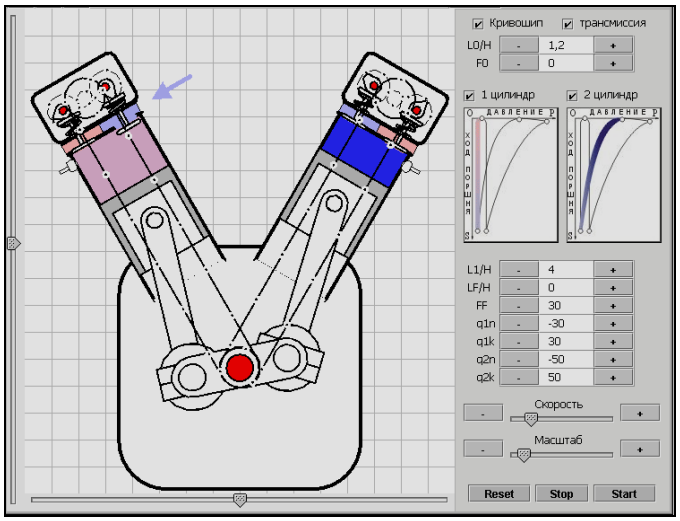


Рис. 10

Рассмотренные в статье примеры можно найти на портале «Теория механизмов и машин» по адресу: http://tmm.spbstu.ru/download.html.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Betrancourt M. The animation and interactivity principles in multimedia learning. The Cambridge handbook of multimedia learning. R.E. Mayer (ed.). New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 287 p.
2. Rick Parent. Computer Animation, 3rd ed.: Algorithms and Techniques. (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers Inc., CA, 2012, 542 p.
3. Вульферт Ф.Н., Кочегаров Б.Е. Компьютерное моделирование анимации механических систем / Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2016. № 1 (26). С. 24-32.
4. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при кинематическом анализе плоских механизмов / Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1(19). С. 46-52.
5. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при силовом расчете плоских механизмов / Теория механизмов и машин. 2013. Т. 11. № 1(21). С. 77-83.
6. Орловский Б.В., Дворжак В.М., Савченко И.В. Схемотехническое моделирование механизмов основовязальных машин с тремя степенями свободы с структурными группами III класса IV порядка / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки . 2013. №3. С. 174-181.
7. Мацюк И.Н. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов высоких классов в программе MathCAD /И. Н. Мацюк, В. М. Третьяков, Э.М. Шляхов//Теория механизмов и машин. -2012. -№ 1. -Т. 10. -С. 65-70.
8. Зиборов К.А. Силовой анализ механизмов с помощью программы Mathcad / К.А. Зиборов, И.Н. Мацюк, Э.М. Шляхов // Теория механизмов и машин. 2010. №1. Том 8. С. 83 – 88.
9. Доронин Ф.А. Силовой анализ некоторых пространственных конструкций и механизмов с помощью пакета MathCad / Теория механизмов и машин. 2014. Том 12. №1(23). С. 59-69.
10. Верховод В.П. Изучение кинематической геометрии плоских механизмов в системе GeoGebra / Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 659-669.
11. Бабичев Д.Т. Компьютерное моделирование работы плоских механизмов и многовариантное конструирование одноступенчатых цилиндрических редукторов / Теория механизмов и машин. 2011. Т. 9. № 2(18). С. 38-47.
12. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и MathCAD / Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. №1(11) С. 71-80.
13. Петров Г.Н. Алгоритм кинетостатического расчета на ЭВМ замкнутых рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 3.
14. Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of the multidirectional mechanism with excess inputs. Springer. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. pp. 31-37

15. Семенов Ю.А. Теория механизмов и машин в примерах и задачах, ч.1: учеб. пособие / Ю.А.Семенов, Н.С.Семенова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 286 с.
16. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2011. – №2(123). – С. 170–176.

A.N.Evgrafov[1], G.N.Petrov[1]

COMPUTER MODELING OF MECHANISMS

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Paper presents several examples of 3D and 2D animation of mechanical systems using “Model Vision” and “AnyLogic” environment. All examples considered in the paper can be found on the following web-site: http://tmm.spbstu.ru/download.html.

Key words: “Model Vision”, “AnyLogic”, computer modeling, interactive models, Stewart platform, car differential

REFERENCES

[1] Betrancourt M. The animation and interactivity principles in multimedia learning. The Cambridge handbook of multimedia learning. R.E. Mayer (ed.). New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 287 p.
[2] Rick Parent. Computer Animation, 3rd ed.: Algorithms and Techniques. (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers Inc., CA, 2012, 542 p.
[3] Vulfert F. N., Kochegarov B.E. Computer modeling animation of mechanical systems. / The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin. 2016. № 1 (26). C. 24-32. (rus.)
[4] Mkrtychev O. V. Computer modeling at the kinematic analysis of flat mechanisms. Theory of Mechanisms and Machines. 2012. Vol. 10. № 1(19). pp. 46-52. (rus.)
[5] Mkrtychev O.V. Computer modelling at force calculation of flat mechanisms. Theory of Mechanisms and Machines. 2013. Vol. 11. № 1(21). pp. 77-83. (rus.)
[6] Orlovskiy B.V., Dvorzhak V.M., Savchenko I.V., Circuitry Modeling of crochet-base machines mechanisms with tree degree of freedom with structure group 3rd class 4th order. Hmelnickiy national university herald. Technical sciences. 2013. №3. pp. 174-181.

[7] Matsyuk I. N., Tretyakov W. M., Shlyahov E. M. A kinematics analysis of flat lever mechanisms of high classes is in the program MathCAD. Theory of Mechanisms and Machines. 2012. Vol. 10. № 1(19). pp.65-70. (rus.)
[8] Ziborov K.A., Matsyuk I.N., Shlyahov E.M. A power analysis of mechanisms is by the program MathCAD. Theory of Mechanisms and Machines. 2010. Vol. 8. №1. pp. 83 – 88. (rus.)
[9] Doronin F. A. The power analysis of some space frames and mechanisms by means of a MathCAD package. Theory of Mechanisms and Machines. 2014. Vol. 12. №1(23). pp. 59-69. (rus.)
[10] Verhovod V.P. Study of kinematic geometry plane mechanisms in GeoGebra. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2013. № 3. pp. 659-669. (rus.)
[11] Babichev D. T. Computer simulation of planar mechanisms and design of multivariate reducers. Theory of Mechanisms and Machines. 2011. Vol. 9. № 2(18). pp. 38-47 (rus.)
[12] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer animation of kinematic chains using Excel and MathCAD. Theory of Mechanisms and Machines. 2008. Vol. 6. №1(11) pp. 71-80. (rus.)
[13] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of the multidirectional mechanism with excess inputs. Springer. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. pp. 31-37
[14] Petrov G.N. Algorythm of kinetostaic calculation with computer of closed lever mechanisms. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1993. № 3.
[15] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Theory of machines and mechanisms with samples and tasks, part 1: textbook. St.-Petersburg. Publishing House of the Polytechnic University 2015. 286 p. (rus.)
[16] Hrostickiy A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometry and kinematics of spatial six-membered mechanism with redundant links. Science technic sheets of SPbSTU. – SPb.: SPbSTU Press, 2011. – №2(123). – pp. 170–176.

УДК 621.01; DOI 10.1872/MMF-2016-22

В.И.Каразин[1], Д.П.Козликин[2], А.А.Суханов[3], В.А. Терешин[4], И.О.Хлебосолов[5]

НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ УСТОЙЧИВОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОДВИЖНЫХ МАСС НА ЦЕНТРИФУГАХ

[1]Владимир Игоревич Каразин, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru

[2]Денис Петрович Козликин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com

[3]Александр Алексеевич Суханов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 552-7801, E-mail: Alexeevich@post.ru

[4]Валерий Алексеевич Терешин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-48-45, E-mail: terva@mail.ru

[5]Игорь Олегович Хлебосолов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: khlebosolov@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены способы уравновешивания центробежных сил инерции в виброротационных стендах. Решается задача определения обобщенного условия устойчивой работы уравновешивающего устройства, которое построено по принципу рычажной системы.

Ключевые слова: центробежный испытательный стенд, вибрации, устойчивость, уравновешивание инерционных сил.

Вопросам воспроизведения комбинированных воздействий в поле линейного ускорения посвящено довольно много трудов [1] - [11]. Авторами подчеркивается особая важность указанного направления исследований, так как экономическая целесообразность использования лабораторного оборудования для испытания изделий на различных стадиях его отработки несомненна.

Воспроизведение широкополосной вибрации на фоне постоянных и переменных линейных ускорений [12], [13] осуществляется на виброротационных стендах, создание которых представляется достаточно сложной задачей, связанной с использованием нестандартных решений и значительных объемов исследований.

Функционирование таких стендов отличается тем, что в процессе работы осуществляется возвратно-поступательное перемещение стола с объектом испытания. При этом центробежная сила переменна, так как зависит от радиуса расположения масс и постоянно препятствует возврату системы в сторону уменьшения радиуса.

Далее приводится краткий обзор известных схемно-конструктивных решений уравновешивания инерционных сил, действующих на относительно подвижные элементы стенда, которые в процессе испытаний осуществляют управляемые радиальные возвратно-поступательные движения [14], [15], [16], [17].

На рис. 1 ротор центрифуги 1 жестко соединен с корпусом вибростенда 2. Объект испытания 3 установлен на столе 4 вибростенда. Центробежная сила F, возникающая при вращении центрифуги с угловой скоростью Ω, стремится помешать осуществлению возвратно-поступательного движения Δx относительно-подвижной системы 3 и 4. Указанная инерционная сила компенсируется с помощью уравновешивающей массы 5 связанной тягой 6 со столом 4. Такая схема уравновешивания может быть применена при малых значениях Δx, реализуемых в пределах упругости тяги 6. В иных случаях очевидна потеря устойчивости системы в связи с отсутствием восстанавливающих сил [14], [16].

На рис. 2 приведена схема, в которой для уравновешивания инерционной силы F используются линейные пружины сжатия 7, установленные между столом 4 и упором 8, являющимся элементом платформы 1. Восстанавливающая сила, пропорциональная смещению Δx в соответствии с жесткостью пружины, обеспечивает необходимую устойчивость при возвратно поступательном движении. Однако область работоспособности такой схемы ограничена диапазоном линейных ускорений центрифуги [16].

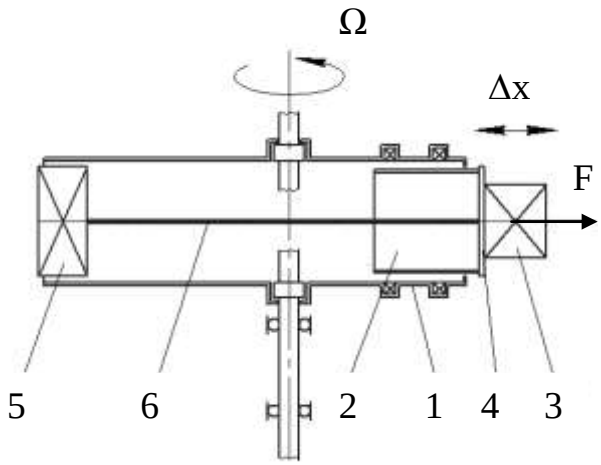


Рис.1

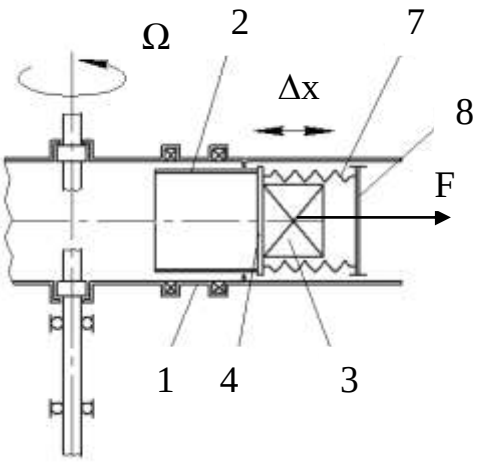


Рис.2

Увеличение верхней границы испытательного диапазона линейных ускорений, воспроизводимых на центрифуги, приводит к увеличению смещения Δx упора, что в свою очередь, накладывает конструктивные особенности в части реализации пружин сжатия и упора на установке. Например, для компенсации центробежной силы инерции в 60000 Н необходимо 10 витых пружин и смещение упора на 1,5 м.

Обе предыдущие схемы, представленные на рис. 1 и рис. 2, объединены в следующем решении на рис. 3. Пружины 7 перенесены в левую часть платформы 1 и формируют восстанавливающую силу на уравновешивающей массе 5. В такой комбинации пружины 7 менее нагружены и их практическая реализация становится возможной.

Использование пружин для получения восстанавливающей силы, что обеспечивает устойчивость функционирования системы, имеет свою особенность. Она заключается в том, что при изменении скорости вращения центрифуги Ω необходимо изменить начальную силу взаимодействия пружин 7 и уравновешивающей массы 5. Такую регулировку можно обеспечить радиальным перемещением упора 8, который жестко соединен с платформой 1.

Еще одна схема, обеспечивающая устойчивое равновесие подвижной системы виброротационного стенда представлена на рис. 4. Вместо витых механических пружин, возможно, использовать упругие свойства сжатого воздуха [15]. Создание необходимой инерционной силы F обеспечивают подачей в закрытый объем 7 воздуха под расчетным давлением. Уравновешивающая масса 5 выполняет роль поршня, а закрытый объем функции цилиндра.

На рис. 5 и 6 представлены две конструктивные схемы разгрузки инерционных сил на роторе центрифуги с использованием пневматических подушек 7 [15]. Они нашли широкое применение в промышленности и по

ряду признаков удобны для решения нашей задачи. Во-первых - они обладают низкой собственной частотой, что обеспечивает воспроизведение вибраций без искажений. Во-вторых - высокая грузоподъемность и возможность значительной деформации в рабочем направлении при практическом отсутствии деформаций в других направлениях. В-третьих – достаточно простое регулирование по положению и подъемной силе. В-четвертых – отсутствие сопряжений, которые необходимо уплотнять, например так как в схеме на рис. 4.

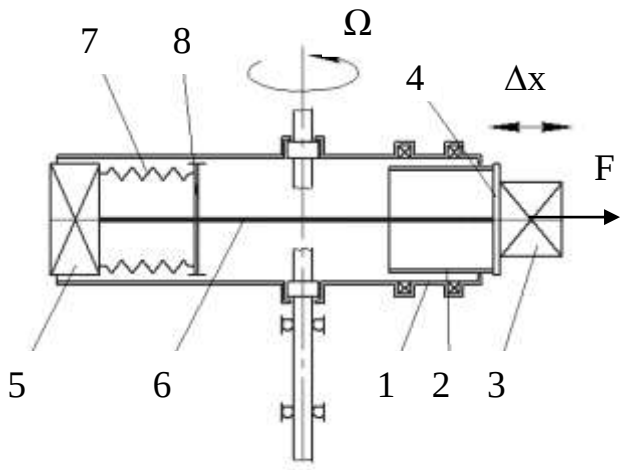


Рис.3

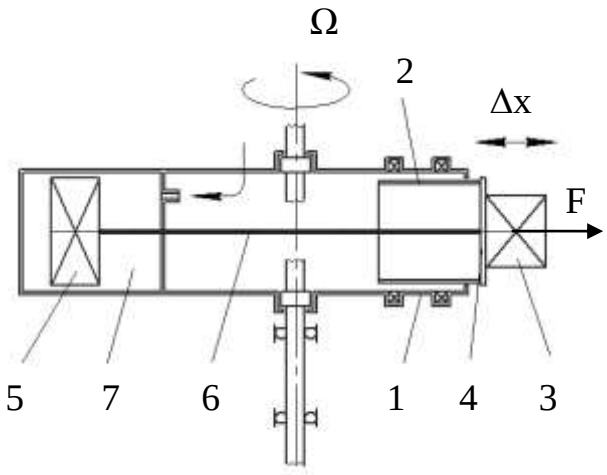


Рис.4

Схемы на рис. 5 и 6 отличаются расположением пневматических подушек. В первом случае она располагается на периферии ротора и является буфером для уравновешиваемых инерционных сил. Во второй схеме используется тяга 6, которая соединяет стол вибратора 4 и дно подушки 8.

Недостатком этих схем является необходимость осуществлять постоянный подвод воздуха под нормированным давлением.

На рис. 7 приведена конструктивная схема уравновешивания центробежных сил, в которой использован рычажный механизм [16] и [17]. Разгружающая масса 5 жестко соединена с вершиной С жесткого треугольника ОАС, в вершинах А и О которого располагаются шарниры кривошипно-ползунного механизма ОАВ. Его ползуном являются массы 3 и 4, поступательная подвижность которых обеспечивается подвеской - направляющей стола 4 вибростенда 2. Неподвижным звеном этого механизма в данном случае является ротор центрифуги.

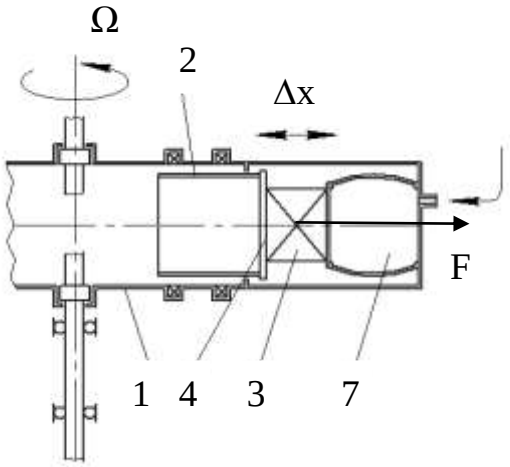


Рис.5

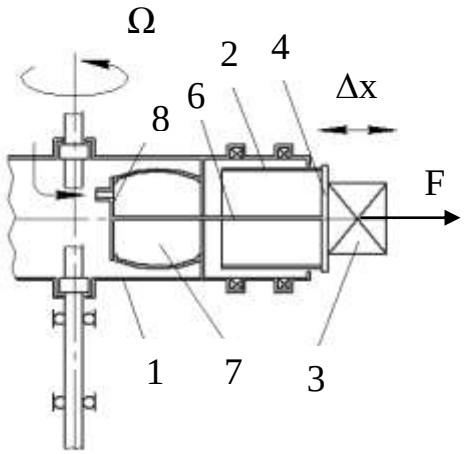


Рис.6

Далее приводится исследование устойчивости функционирования такой схемы в поле линейного ускорения с целью доказательства возможности ее использования на реальной конструкции. На рис. 8 представлена расчетная схема.

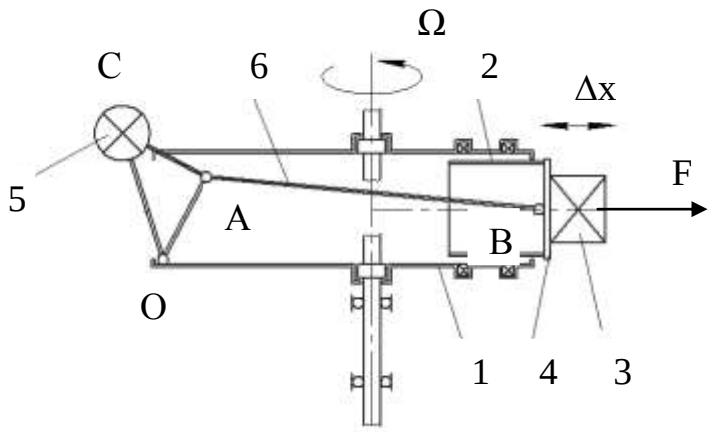


Рис.7

Для описания движения воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода, в котором правая часть будет нулевой, так как обобщенная движущая сила $Q = 0$ и сила сопротивления $Q_C = 0$.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial T}{\partial q} = 0. \qquad (1)$$

где T – кинетическая энергия механизма, q – обобщенная координата, $\dot{q}$ – обобщенная скорость.

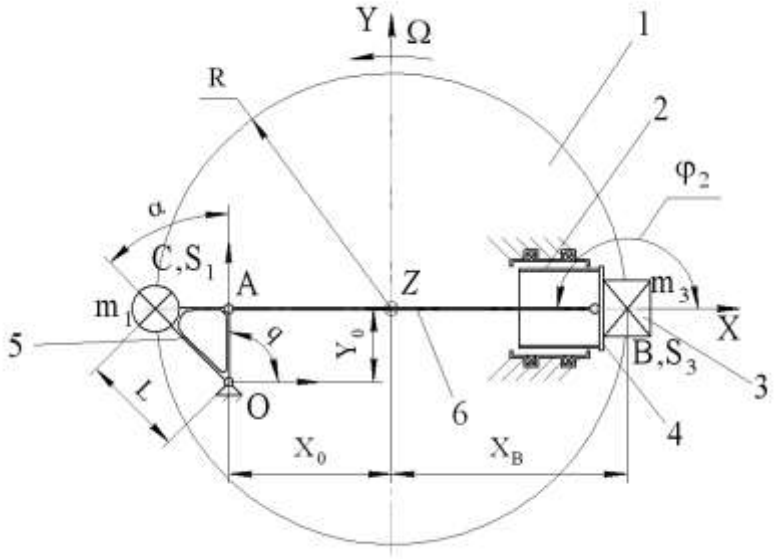


Рис.8

Кинетическая энергия механизма T складывается из кинетических энергий каждого звена T_i, где $i=1...N$. N - количество подвижных звеньев. Согласно теореме Кенига:

$$T_i = \frac{m_i}{2} v_{Ci}^2 + \frac{J_{Ci}}{2} \omega_i^2, \tag{2}$$

где m_i - масса звена i, v_{Ci} - абсолютная линейная скорость центра тяжести i-ого звена, J_{Ci} - момент инерции звена i относительно его центра тяжести, ω_i - абсолютная угловая скорость i-ого звена.

Согласно теореме о сложении скоростей, абсолютную линейную скорость можно представить в виде:

$$\vec{v}_{Ci} = \vec{v}_{Ci}^{\,r} + \vec{\Omega} \times \vec{r}_{Ci}, \tag{3}$$

а абсолютную угловую скорость по правилу сложения вращений:

$$\vec{\omega}_i = \dot{\vec{\varphi}}_i + \vec{\Omega},$$

где $\vec{\Omega}$ - угловая скорость вращения платформы центрифуги, $\vec{v}_{Ci}^{\,r}$ - линейная скорость центра тяжести i-ого звена относительно платформы, $\vec{\Omega} \times \vec{r}_{Ci}$ - переносная скорость центра тяжести i-ого звена, $\vec{r}_{Ci}$ - расстояние от оси вращения платформы до центра тяжести i-ого звена, $\dot{\vec{\varphi}}_i$ - угловая скорость i-ого звена относительно платформы.

Представляя векторное выражение (3) в виде проекций на оси вращающейся системы координат $OXYZ$, связанной с платформой, и подставляя в уравнение (2), получим:

$$T_i = \frac{m_i}{2}\left[(\dot{X}_{Ci} - \Omega \cdot Y_{Ci})^2 + (\dot{Y}_{Ci} + \Omega \cdot X_{Ci})\right] + \frac{J_{Ci}}{2}\left(\dot{\varphi}_i + \Omega\right)^2,$$

ось OZ - ось вращения рамы центрифуги, а плоскость движения звеньев механизма параллельна плоскости OXY. X_{Ci} и Y_{Ci} - координаты центра масс i-ого звена, $\dot{X}_{Ci}$ и $\dot{Y}_{Ci}$ - проекции относительных скоростей центра масс i-ого звена на те же оси.

Преобразуем это выражение:

$$T_i = \frac{m_i}{2}\left[\dot{\mathrm{X}}_{Ci}^2 - 2\cdot\Omega\cdot \mathrm{Y}_{Ci}\cdot\dot{\mathrm{X}}_{Ci} + \Omega^2\cdot Y_{Ci}^2 + \dot{\mathrm{Y}}_{Ci}^2 + 2\cdot\Omega\cdot X_{Ci}\cdot\dot{\mathrm{Y}}_{Ci} + \Omega^2\cdot X_{Ci}^2\right] +$$

$$+\frac{J_{Ci}}{2}\left(\dot{\varphi}_i^2 + 2\cdot\Omega\cdot\dot{\varphi}_i + \Omega^2\right).$$

Перейдем в этом выражении к аналогам скоростей:

$$T_i = \frac{m_i}{2}\cdot[\mathrm{X}'^2_{Ci}\cdot\dot{q}^2 - 2\cdot\Omega\cdot\mathrm{Y}_{Ci}\cdot\mathrm{X}'_{Ci}\cdot\dot{q} + \Omega^2\cdot Y_{Ci}^2 + \mathrm{Y}'^2_{Ci}\cdot\dot{q}^2 +$$

$$+2\cdot\Omega\cdot X_{Ci}\cdot\mathrm{Y}'_{Ci}\cdot\dot{q} + \Omega^2\cdot X_{Ci}^2] + \frac{J_{Ci}}{2}\left(\varphi'^2_i\cdot\dot{q}^2 + 2\cdot\Omega\cdot\varphi'_i\cdot\dot{q} + \Omega^2\right).$$

Далее объединим слагаемые с одинаковыми степенями $\dot{q}$:

$$T_i = \left[m_i\cdot\left(\mathrm{X}'^2_{Ci} + \mathrm{Y}'^2_{Ci}\right) + \cdot\varphi'^2_i\right]\cdot\frac{1}{2}\dot{q}^2 +$$

$$+\left[m_i\left(X_{Ci}\cdot\mathrm{Y}'_{Ci} - \mathrm{Y}_{Ci}\cdot\mathrm{X}'_{Ci}\right) + J_{Ci}\cdot\varphi'_i\right]\cdot\Omega\cdot\dot{q} + \left[m_i\cdot\left(X_{Ci}^2 + Y_{Ci}^2\right) + J_{Ci}\right]\cdot\frac{1}{2}\cdot\Omega^2. \quad (4)$$

Запишем кинетическую энергию всего механизма:

$$T = \frac{1}{2}\cdot J_{ПР}(q)\cdot\dot{q}^2 + A(q)\cdot\Omega\cdot\dot{q} + \frac{1}{2}\cdot J_Z(q)\cdot\Omega^2, \quad (5)$$

где:

$$J_{ПР}(q) = \sum_{i=1}^{N}\left[m_i\cdot\left(\mathrm{X}'^2_{Ci} + \mathrm{Y}'^2_{Ci}\right) + J_{Ci}\cdot\varphi'^2_i\right],$$

$$A(q) = \sum_{i=1}^{N}\left[m_i\left(X_{Ci}\cdot\mathrm{Y}'_{Ci} - \mathrm{Y}_{Ci}\cdot\mathrm{X}'_{Ci}\right) + J_{Ci}\cdot\varphi'_i\right],$$

$$J_Z(q) = \sum_{i=1}^{N}\left[m_i\cdot\left(X_{Ci}^2 + Y_{Ci}^2\right) + J_{Ci}\right].$$

Подставим (5) в (1):

$$\frac{\partial T}{\partial\dot{q}} = J_{ПР}(q)\cdot\dot{q} + A(q)\cdot\Omega,$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial\dot{q}} = J_{ПР}(q)\cdot\ddot{q} + J'_{ПР}(q)\cdot\dot{q}^2 + A'(q)\cdot\dot{q}\cdot\Omega,$$

$$\frac{\partial T}{\partial q} = \frac{1}{2}\cdot J'_{ПР}(q)\cdot\dot{q}^2 + A'(q)\cdot\Omega\cdot\dot{q} + \frac{1}{2}\cdot J'_Z(q)\cdot\Omega^2.$$

Окончательно уравнение движения механизма в центробежном поле (1) может быть записано в виде:

$$J_{ПР}(q)\cdot\ddot{q}+\frac{1}{2}\cdot J'_{ПР}(q)\cdot\dot{q}^2-\frac{1}{2}\cdot J'_Z(q)\cdot\Omega^2=0. \qquad (6)$$

По сравнению с классическим уравнением движения механизма на неподвижном основании с нулевой правой частью, в данном случае появилось третье слагаемое с отрицательным знаком, которое определяет значение уравновешивающего момента.

Рассмотрим задачу устойчивости малых колебаний в окрестности координаты q_0. Положим

$$q=q_0+\psi, \qquad (7)$$

где ψ - величина отклонения от положения равновесия q_0,

$$\begin{aligned}\dot{q}&=\dot{\psi},\\ \ddot{q}&=\ddot{\psi}.\end{aligned} \qquad (8)$$

Подставляя (7) и (8) в (6):

$$J_{ПР}(q_0+\psi)\cdot\ddot{\psi}+\frac{1}{2}\cdot J'_{ПР}(q_0+\psi)\cdot\dot{\psi}^2-\frac{1}{2}\cdot J'_Z(q_0+\psi)\cdot\Omega^2=0. \qquad (9)$$

Разложим в степенной ряд величины

$$\begin{aligned}J_{ПР}(q_0+\psi)&=J_{ПР}(q_0)+J'_{ПР}(q_0)\cdot\psi,\\ J'_{ПР}(q_0+\psi)&=J'_{ПР}(q_0)+J''_{ПР}(q_0)\cdot\psi,\\ J'_Z(q_0+\psi)&=J'_Z(q_0)+J''_Z(q_0)\cdot\psi.\end{aligned}$$

Подставим их в (9):

$$J_{ПР}(q_0)\cdot\ddot{\psi}+J'_{ПР}(q_0)\cdot\psi\cdot\ddot{\psi}+\frac{1}{2}\cdot J'_{ПР}(q_0)\cdot\dot{\psi}^2+\frac{1}{2}\cdot J''_{ПР}(q_0)\cdot\psi\cdot\dot{\psi}^2-$$

$$-\frac{1}{2}\cdot J'_Z(q_0)\cdot\Omega^2-\frac{1}{2}\cdot J''_Z(q_0)\cdot\psi\cdot\Omega^2=0.$$

Пренебрежем в этом выражении нелинейными относительно ψ и его производных слагаемыми. Получим линейные уравнения движения:

$$J_{ПР}(q_0)\cdot\ddot{\psi}-\frac{1}{2}\cdot\left[J'_Z(q_0)+J''_Z(q_0)\cdot\psi\right]\Omega^2=0. \qquad (10)$$

Будем решать это уравнение методом последовательных приближений. В нулевом приближении:

$$\psi=0,\ \ddot{\psi}=0,$$

тогда

$$J'_Z(q_0)=0. \qquad (11)$$

Из этого уравнения можно найти координату q_0, которая определяет положение равновесия механизма в центробежном поле. Положение равновесия будет в точках экстремума функции $J_Z(q_0)$. С учетом (11) уравнение малых колебаний относительно положения равновесия примет вид:

$$\ddot{\psi}-\frac{J''_Z(q_0)}{2\cdot J_{ПР}(q_0)}\cdot\Omega^2\cdot\psi=0. \qquad (12)$$

Множитель при ψ в уравнении (12) представляет собой частоту свободных колебаний системы [18]:

$$k = \Omega \cdot \sqrt{-\frac{J_Z''(q_0)}{2 \cdot J_{ПР}(q_0)}}. \tag{13}$$

Частота будет вещественной и ненулевой в случае, если

$$J_Z''(q_0) < 0, \tag{14}$$

так как согласно (5) $J_{ПР}(q_0)$ всегда величина положительная. Выражение (14) является условием устойчивости положения равновесия q_0 рычажного механизма в центробежном поле. Данное условие показывает, что движение механизма будет возможно в случае, если функция $J_Z(q)$ в положении q_0 будет иметь максимум.

Величина $J_Z(q)$ представляет собой, согласно (5), момент инерции механизма относительно оси вращения центрифуги (теорему Штейнера). Примечательно, что полученное условие устойчивости применимо для любой схемы рычажного механизма, так как записано в общем виде. Имеется возможность производить выбор параметров механизма, влияющих на процесс устойчивой работы системы.

Для схемы рис. 8 выражение $J_Z(q)$ согласно (5) будет выглядеть:

$$\begin{aligned} J_Z(q) = {} & m_1 \cdot \left(X_{S1}^2(q) + Y_{S1}^2(q) \right) + J_1 + m_2 \cdot \left(X_{S2}^2(q) + Y_{S2}^2(q) \right) + J_2 + \\ & + m_3 \cdot \left(X_{S3}^2(q) + Y_{S3}^2 \right). \end{aligned} \tag{15}$$

где m_1, m_2, m_3 - массы кривошипа, шатуна и ползуна соответственно (в m_3 учитывается общая масса объект испытаний и подвижного стола вибростенда), J_1, J_2 - моменты инерции первого и второго звена, так как они совершают вращательные движения, $X_{S1}(q)$, $Y_{S1}(q)$, $X_{S2}(q)$, $Y_{S2}(q)$, $X_{S3}(q)$, Y_{S3} - координаты центров масс первого, второго и третьего звеньев соответственно относительно системы координат $Oxyz$.

Для определения координат центров масс необходимо составить уравнения геометрического анализа рассматриваемого механизма. Эти уравнения запишутся в виде:

$$\begin{cases} X_O + OA \cdot \cos(q) = X_B(q) + AB \cdot \cos(\varphi_2(q)) \\ Y_O + OA \cdot \sin(q) = Y_B + AB \cdot \sin(\varphi_2(q)) \end{cases}$$

Система записана относительно двух групповых координат $X_B(q)$, $\varphi_2(q)$. Решение этой системы необходимо искать относительно этих неизвестных:

$$\sin\left(\varphi_2(q)\right) = \frac{Y_O + OA\cdot\sin(q) - Y_B}{AB},$$

$$\cos\left(\varphi_2(q)\right) = -\sqrt{1-\sin\left(\varphi_2(q)\right)^2},$$

$$X_B(q) = X_O + OA\cdot\cos(q) - AB\cdot\cos\left(\varphi_2(q)\right).$$

Зная групповые координаты, легко записать выражения для координат центров масс, при этом предложим, что масса второго звена намного меньше массы звеньев первого и третьего ($m_2 = 0$). Откуда:

$$X_{S1}(q) = L\cdot\cos(q+\alpha) + X_O,$$

$$Y_{S1}(q) = L\cdot\sin(q+\alpha) + Y_O,$$

$$X_{S3}(q) = X_B(q),$$

$$Y_{S3}(q) = Y_B.$$

Величины J_1 и J_2 не влияют на определение экстремумов функции $J_Z(q)$, так как являются постоянными. Положим, что

$$m_1 = 50кг,\ m_3 = 50кг.$$

Зададимся геометрическими параметрами механизма:

$$OA = 200мм,\ R = 2500мм,\ AB = 4800мм,\ Y_B = 200мм,$$

$$Y_O = -200мм,\ X_O = -2300мм,\ \alpha = 45°.$$

Положим, что $L = \sqrt{2\cdot OA^2}$, так как будем считать, что ΔOAC прямоугольный и равнобедренный.

По этим исходным данным можно построить зависимость $J_Z(q)$ согласно (15) и определить ее экстремумы в интервале изменения координаты q от $0°$ до $360°$.

Как можно видеть из рис. 9, максимум функции $J_Z(q)$ достигается при $q \approx 90°$. Это положение будет положением равновесия и оно будет устойчиво в силу рассуждений, приведенных выше.

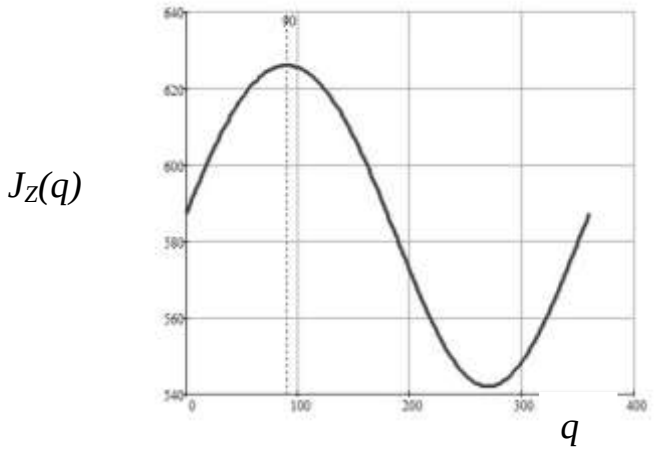


Рис. 9

Нетрудно показать, что в случае изменения исходных геометрических или массовых величин изменится величина координаты q. Например, положим, что виброподвижная масса увеличилась на 10 кг, а все остальные параметры остались прежними:

$$m_1 = 50кг,\ m_3 = 60кг.$$

Новое положение равновесие достигается при $q_0 \approx 74°$. В этом случае вибрация ползуна будет происходить относительно нового положения. Для возврата в положение вибрации принятое за исходное (например, при $q_0 \approx 90°$), как показано в [16], необходимо скорректировать массу m_1 либо изменить положение опоры О.

Полученный результат исследования позволят производить выбор разгружающих устройств, построенных по схеме рычажных механизмов. В связи с тем, что условие устойчивости выражается виде аналитической зависимости, оно просто поддается анализу для выявления параметров, влияющих на работу самого устройства. По выражению (13) достаточно просто оценить частоту свободных колебаний, возникающих в системе, и судить о резонансных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Клюева. –М.: Машиностроение, 1982. – Кн.1, 1982. - 528 с.
2. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н.Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.5. Измерения и испытания /Под ред. М.Д.Генкина, 1981. – 496 с.
3. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Смирнов Г.А. Роторные стенды для воспроизведения параметров движения. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – СПб.: СПбГТУ. – 1999. № 3(17). – С. 89 – 94.
4. Евграфов А.Н., Каразин В.И, Хлебосолов И.О. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах. // Теория механизмов и машин. – СПб.: СПбГТУ. - 2003. №1. – с. 92 – 96.
5. Ксенофонтов В.И., Николаев В.Н, Чернокрылов С.Ю. Динамический стенд многофункционального назначения. // Испытательные и поверочные стенды. – Л.: ЛГТУ. - 1992. С. 29 – 32.
6. Rodgers J. D., Cericola F., Doggett J. W., Young M. L. Vibrafuge: Combined Vibration and Centrifuge Testing. Shok and Vibration Symposium. SAND89 – 1659C. 1989.
7. Doggett, J. and Cericola, F., "Vibrafuge - A Combined Environment Testing Facility Vibration Testing on a Centrifuge" SAE Technical Paper 892368, 1989, doi:10.4271/892368.
8. Doug VanGoethem, Richard Jepsen, and Edward Romero. "Vibrafuge: Re-Entry and Launch Test Simulation in a Combined Linear Acceleration and Vibration Environment", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings. 2006.

9. J. Kang, F. Arute, D. Yoel, J. Littlefield, T. Harris. Testing using Combined Environments to Reduce Payload Mass, Cost and Mission Risk. 27 Annual AIAA/USU Conferense on Small Satellites, 2013.
10. Jepsen, Richard Alan, and Edward F. Romero. "Testing in a Combined Vibration and Acceleration Environment." IMAC XXIII, Orlando, FL (2005).
11. Rojers, J. D. "Testing in combined dynamic environments." Journal of the IES36.6 (1993): 19-25.
12. Каразин В. И., Козликин Д.П., Слоущ А. В., Хлебосолов И. О. Динамическая модель виброротационного стенда. // Теория механизмов и машин: периодический научно – методический журнал. №1(9). Том 5. – 2007. – С. 38-45.
13. Каразин В.И., Козликин Д.П., Хлебосолов И.О. О воспроизведении виброротационных воздействий // Наука и технологии, Секция 3, Динамика и прочность: Краткие сообщения XXVIII Российской школы. – 2008. – С. 42-43.
14. Каразин В. И., Козликин Д. П., Хлебосолов И. О. Динамические стенды для виброротационных испытаний // Научно – технические ведомости СПбГТУ. – СПб: издание СПбГПУ; №3(45). – 2006. – С. 44-49.
15. Каразин В.И., Козликин Д.П., Хлебосолов И.О. Об уравновешивании инерционных сил в виброцентрифугах // Теория механизмов и машин.: Периодический научно-методический журнал. – 2007. – №2(10). Том 5. – С. 63-71.
16. Каразин В.И., Козликин Д.П., Суханов А.А., Хлебосолов И.О. Об одной схеме устойчивого динамического разгружения центробежных сил // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 203-216.
17. Karazin V. I., Kozlikin D. P., Sukhanov A. A., Khlebosolov I.O. One Stable Scheme of Centrifugal Forces Dynamic Balance // Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Evgrafov A., (ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2016, p.75-87, DOI 10.1007/978-3-319-29579-4.
18. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1980. - 272 с.

V.I.Karazin, D.P.Kozlikin, A.A.Sukhanov, V.A.Tereshin, I.O.Khlebosolov

SOME METHODS OF STABLE BALANCING OF RELATIVE MOVING MASSES ON THE CENTRIFUGE

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This article considers the methods of the centrifugal inertial forces balancing in the vibration stands. Given article solves the problem of the

generalized condition determination of stable work of a balancing device which is built as a linkage system.

Key words: centrifugal test device, vibrations, stability, inertial forces balancing

REFERENCES

[1] Test Equipment Handbook. In 2 books /Ed. V.V.Klyueva, Moscow: Engineering, 1982, Book 1, 1982, 528 p. (in Russian)

[2] Vibration technique. Directory in 6 Vols. /Ed. Tip: V.N.Chelomei (chairman), Moscow: Engineering, 1981, V. 5. Measuring and testing /Ed. M.D.Genkin, 1981, 496 p. (in Russian)

[3] Evgrafov A.N, Karazin V.I., Smirnov G.A. Rotary stands for motion variables simulation. Scientific and technical reports of SPbGTU. – SPb.: SPbGPU. – 1999, N 3(17), 89–94. (in Russian)

[4] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. Playing motion parameters on rotary stands //Theory of mechanisms and machines. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University Press, 2003, V. 1, N 1, 92-96. (in Russian)

[5] Ksenofontov V.I., Nikolaev V.N., Chernokrylov S.Yu. Multifunctional dynamic stand // Testing and control stands. – L.: LGTU. - 1992. p. 29 – 32. (in Russian)

[6] Rodgers J. D., Cericola F., Doggett J. W., Young M. L. Vibrafuge: Combined Vibration and Centrifuge Testing. Shok and Vibration Symposium. SAND89 – 1659C. 1989.

[7] Doggett, J. and Cericola, F., "Vibrafuge - A Combined Environment Testing Facility Vibration Testing on a Centrifuge" SAE Technical Paper 892368, 1989, doi:10.4271/892368.

[8] Doug VanGoethem, Richard Jepsen, and Edward Romero. "Vibrafuge: Re-Entry and Launch Test Simulation in a Combined Linear Acceleration and Vibration Environment", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings. 2006.

[9] J. Kang, F. Arute, D. Yoel, J. Littlefield, T. Harris. Testing using Combined Environments to Reduce Payload Mass, Cost and Mission Risk. 27 Annual AIAA/USU Conferense on Small Satellites, 2013.

[10] Jepsen, Richard Alan, and Edward F. Romero. "Testing in a Combined Vibration and Acceleration Environment." IMAC XXIII, Orlando, FL (2005).

[11] Rojers, J. D. "Testing in combined dynamic environments." Journal of the IES36.6 (1993): 19-25.

[12] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sloushch A.V., Khlebosolov I.O. Dynamic model of vibratory stand. Theory of mechanisms and machines. Periodic scientific and methodical journal. Number 1 (9), V. 5, St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University Press, 2007, 38-44. (in Russian)

[13] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. About simulation of the vibro-rotary impactий // Science and technologies, Section 3, Dynamics

and resistance: XXVIII Russian school paragraphs. – 2008. – P. 42-43. (in Russian)
[14] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. Dynamic stands for vibro-rotary tests // Scientific and technical reports of SPbGPU. – SPb: Publishing House of SPbGPU; №3(45). – 2006. – P. 44-49. (in Russian)
[15] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. On balancing the inertial forces in vibrotsentrifugal. Theory of mechanisms and machines. Periodic scientific and methodical journal. Number 2 (10), V. 5, St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University Press, 2007, 63-71. (in Russian)
[16] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. About one scheme of stable dynamic unloading og centrifugal forces // Contemporary engineering. Science and education. 2014. № 4. P. 203-216. (in Russian)
[17] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. One Stable Scheme of Centrifugal Forces Dynamic Balance // Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Evgrafov A., (ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2016, p.75-87, DOI 10.1007/978-3-319-29579-4.
[18] Panovko Ya.G. Introduction to mechanical vibrations. Moscow: Science, 1980, 272 p. (in Russian)

УДК 531.8; DOI 10.1872/MMF-2016-23

В. А. Крюков

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕРМИНОСИСТЕМЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Владимир Алексеевич Крюков, д.т.н., профессор
Тульский государственный университет
Россия, Тула
Тел.: (4872)25-46-39, E-mail: va.krukov@gmail.com.

Аннотация

В работе рассмотрено современное состояние терминологии теории механизмов и машин. Проанализированы основные ошибки, допускаемые при построении терминосистемы и дефиниций.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, терминология, терминосистема, термин.

Введение

Одним из основных условий успешного развития любой отрасли деятельности человека, особенно науки и техники, является точная передача информации. Обмен научной информацией предполагает наличие отправителя информации, получателя информации и обязательное промежуточное звено – сообщение, содержащее эту информацию. Точность и полнота восприятия информации получателем в значительное степени определяются используемой терминологией.

В СССР для упорядочивания работы в области технической терминологии в 1933 г. была создана комиссия по технической терминологии при Общем собрании АН СССР. С 1933 по 1990 гг. было выпущено 110 терминологических сборников, 7 из которых были посвящены терминологии теории механизмов и машин. Начало работы в 1971 г. постоянной комиссии по стандартизации терминологии при Международной федерации по теории машин и механизмов (IFToMM) привело к активизации терминологической деятельности в области теории механизмов и машин, созданию нескольких версий печатного и интерактивного терминологического словаря. Появилось большое число статей, посвященных анализу терминологической работы, планированию и организации этой работы, анализу терминосистемы теории механизмов и машин и её отдельных разделов [18, 21, 8, 13, 4, 17].

Несмотря на такое внимание к проблемам терминологии и большую работу по её упорядочиванию и стандартизации существующая термино-

логия по теории механизмов и машин вызывает ряд критических замечаний [10, 24, 3]. Одновременно с совершенствованием терминологии наблюдается обратная тенденция – рост числа ошибок при использовании терминов [23]. Это является как следствием недостатков в образовании, так и несовершенства используемой терминологии. Целью данной работы является анализ современного состояния терминологии теории механизмов и машин; допущенных при её составлении неточностей и ошибок.

Теоретические основы

Прежде чем перейти к анализу терминологии теории механизмов и машин рассмотрим некоторые основные понятия, которые будут при этом использоваться [5]: «термин» – лексическая единица определенного языка для специальных целей, обозначающая общее – конкретное или абстрактное – понятие теории определенной специальной области знаний или деятельности; «терминоведение» – комплексная научная дисциплина, изучающая термины, терминосистемы, а также различные аспекты языка для специальных целей (как в лингвистическом, так и в практическом плане); «терминология» – стихийно складывающаяся, неупорядоченная совокупность терминов; «терминосистема» – упорядоченная, иерархически организованная совокупность терминов, которая отражает не просто систему понятий, а систему понятий определенной теории. Основными признаками терминосистемы являются её целостность, структурированность, наличие системы общих понятий (базовых и основных терминов). Кроме них терминосистема может содержать производные, сложные и привлеченные термины.

Исходной теоретической основой для формирования системы понятий определенной науки и соответствующей терминосистемы служит логика. Основной операцией при образовании понятия является дефиниция – логическая операция раскрытия содержания понятия, которая должна удовлетворять ряду требований [16]:

– определение должно содержать только существенные признаки – такие, каждый из которых, взятый отдельно, необходим, а все, вместе взятые, достаточны, чтобы с их помощью можно было отличить данный предмет из всех остальных и обобщить однородные предметы в класс;

– определение должно быть соразмерным, т.е. объем определяемого понятия должен совпадать с объемом определяющего понятия;

– определение не должно содержать логического круга;

– определение должно быть четким, явным.

Основными логическими операциями для построение системы терминов конкретной науки на основе базовых терминов служит деление понятий и классификация – последовательное деление. Основные правила деления: деление должно быть соразмерным; деление должно производиться только по одному основанию; члены деление должны исключать друг друга; деление должно быть непрерывным.

Многочисленные работы ученых в области общего и частного терминоведения позволили сформулировать дополнительные требования как к самим терминам, так и к построению их определений [6, 1, 22, 11]:

– в любом контексте при замене термина его определением истинность и содержание суждения не должны нарушаться;

–в определении не допускается использовать отрицательные, неясные, нечеткие признаки. Признак, связанный с количественной характеристикой объекта, процесса, состояния может быть введен в определение лишь на правах сопутствующего, а не конституирующего;

– при определении термина необходимо использовать либо ранее определенные термины, либо принимаемые как общеизвестные;

– необходимо избегать синонимии и омонимии;

– термины должны соответствовать нормам языка;

– при построении терминосистемы необходимо учитывать внедренность, интернациональность, современность, и эзотеричность терминов.

Одним из обязательных требований при построении терминосистемы является систематизация понятий, построение их иерархической структуры и соответствующая группировка. При отборе понятий необходимо также учитывать, что в конкретной науке, кроме специфических понятий для данной области знаний могут использоваться понятия, одновременно рассматриваемые в смежных областях, и понятия, принадлежащие к общетехническим, общефизическим и другим системам понятий. В этом случае недопустимо переопределение таких терминов, изменение объема или содержания соответствующих понятий.

Анализ терминологии теории механизмов и машин

В качестве источников при анализе существующей терминологии использовались сборники рекомендуемых терминов комитета научно-техни–ческой терминологии АН СССР, интерактивный терминологический словарь IFToMM [19, 20], отечественная учебная литература.

Первое, что обращает на себя внимание при анализе развития терминологических словарей теории механизмов и машин – это резкое увеличение числа терминов, изменение и усложнение структуры терминосистемы. Сборник рекомендуемых терминов 1978 г. [14] содержал 137 терминов, разбитых на 5 групп, словарь 2004 г. [13] – 410 терминов в 7 группах, последняя версия электронного словаря IFToMM [20] – 1829 терминов в 16 группах, разбитых в свою очередь на 49 подгрупп. К сожалению, такой значительный рост объема терминосистемы не в полной мере отражает действительное состояние терминологии теории механизмов и машин, её иерархическую структуру, в должной мере не сопровождается соответствующей систематизацией терминов и их группировкой.

Структура сборника 1978 г. в основном соответствовала построению учебного курса теории механизмов и машин и включала следующие разделы: структура механизмов, кинематический анализ механизмов, динамиче-

ский анализ механизмов, синтез механизмов. В отдельный раздел были выделены термины, связанные с основами теории машин. Определения терминов соответствовали определениям, используемым в отечественной учебной литературе; термины из смежных областей, общетехнические, общефизические термины отсутствовали.

В терминологии 2004 г. [13] отдельно были выделены общие понятия теории механизмов и машин, причем кроме действительно базовых понятий, таких как «машина», «механизм», и понятий, которые условно могут быть отнесены к базовым: «двигатель», «привод» в этом раздел попал ряд основных терминов: «звено», «кинематическая пара», «стойка» и т.д., которые ранее традиционно включались в раздел «Структура механизмов». Добавлены разделы «Колебания в механизмах», «Динамика приводов» и «Системы управления движением в машинах-автоматах». Кроме терминов собственно «Теории механизмов и машин» в это пособие добавлен ряд терминов из смежных областей: «скорость точки», «ускорение точки», «угловая скорость» и т.д. В большинстве случает, приводимые для этих терминов определения, совпадали или соответствовали общепринятым. Но отдельные определения ошибочны, не соответствуют общепринятым или приведенным выше требованиям к построению определений. Например:

«3.11. Поступательное движение – движение звена, при котором прямая линия, жестко связанная с ним, остается параллельной своему начальному направлению». Здесь пропущено важное условие, не просто прямая, а любая прямая;

«3.4. Скорость точки – производная радиус-вектора точки по времени». Здесь в качестве основного признака использована количественная характеристика. Верное определение «Скорость точки – кинематическая мера движения точки, равная производной по времени от радиуса-вектора этой точки…» [12].

«4.42. Упругость» определяется как «свойство тела…», а «4.43. Жесткость» – как «мера сопротивляемости…». Однотипные понятия одного уровня определены по-разному и во втором определении использована количественная характеристика. Верное определение: «Жесткость – способность деталей сопротивляться изменению формы под действием сил» [2].

«3.13. Вращательное движение – движение звена относительно оси, принимаемой за неподвижную, все точки которой описывают окружности». Определение не совпадает с общепринятым «Вращательное движение твердого тела – движение тела, при котором все точки, лежащие на некоторой прямой, неизменно связанной с телом, остаются неподвижными в рассматриваемой системе отсчета» [12] и содержит явную стилистическую ошибку – получается, что точки неподвижной оси описывают окружности.

Приведенные в рассмотренной выше работе [14] определения базовых понятий теории механизмов и машин: «кинематическая пара» и «звено» устарели, не полностью соответствуют современному состоянию науки и

требуют дальнейшего уточнения. В [13] была сделана попытка ввести новые определения. Однако, на наш взгляд, эта работа не закончена, она требует внимательного пересмотра всей терминосистемы и ряда используемых в течении многих лет формул и зависимостей. Согласно [13] вводится новое родовое понятие «твердого тела», входящего в состав механизма, которое в зависимости от участия в преобразовании движения делится на два видовых понятия: «1.12. Звено» – участвующее в заданном преобразовании движения и «1.13. Элемент механизма» – обеспечивающий взаимодействие его звеньев и непосредственно не участвующий в преобразовании движения. «1.24. Кинематическая пара» (родовое понятие) образуется соединением двух твердых тел, т.е. как звеньев, так и твердотельных элементов. Но в определении «2.7. Число степеней свободы кинематической пары» говорится только о звеньях, входящих в кинематическую пару.

Наиболее авторитетным и полным словарем терминов по теории механизмов и машин является электронный словарь, разработанный комиссией по стандартизации терминологии IFToMM. Остановимся на последней версии 3.1 [20]. Словарь содержит 1829 терминов в 16 разделах, разбитых в свою очередь на 49 подразделов. Кроме разделов, которые либо выделялись и ранее, либо соответствуют содержанию учебного курса теории механизмов и машин: «1. Структура машин и механизмов»; «2. Кинематика», «3. Динамика», «12. Зубчатые передачи» добавлены разделы, содержащие термины из смежных областей, математические, общетехнические и общефизические термины: «6. Общие термины», «7. Динамика. Дополнения». В отдельные разделы выделены термины: «4. Управления машинами и измерения», «5. Робототехника», «8. Динамика роторов и измерения», «9. Вибрации и нелинейные колебания», «10. Стабильность», «11. Биомеханика», «13. Мехатроника», «14. Подъемно-транспортное оборудование и логистика». Последний добавленный раздел “16. Compliant Mechanisms” (Механизмы с упругими звеньями) доступен только в английской версии. Обращает на себя внимание отсутствие унификации в структуре разделов. Первый подраздел, содержащий основные понятия раздела, назван: «Общие термины» («Кинематика» и «Биомеханика»), «Общие понятия» («Динамика»), «Область знаний» («Мехатроника»), «Компоненты» («Структура машин и механизмов»), «Общие термины и транспортные перемещения» («Подъемно-транспортное оборудование и логистика»).

При определении порядка терминов в основном использована систематизация и их группировка по принципу: «родовое понятие – видовое понятие»), а также требование использовать при дефиниции либо ранее определенные термины, либо принимаемые как общеизвестные. Например: «1.1.1. Элемент механизма» → «1.1.2 Звено» → («1.1.3. Входное звено», «1.1.4 Выходное звено»). К сожаление, этот принцип выдержан далеко не везде. Так в указанном разделе в термины 1.1.6 – 1.1.14, определяющие виды звеньев, попал термин «1.1.12 Направляющая –элемент поступательной

пары». В разделе «8. Динамика роторов и измерения» подряд идут термины: «8.1. Приемлемая область», «8.2. Аэросопло», «8.3. Настройка», «8.4. Анализатор в реальном времени», связь между которыми не просматривается. В этом же разделе используются ссылки на ранее не определенные термины: термин «8.1. Приемлемая область» использует в определениях термины 8.110, 8.62; термин 8.3 – 8.62, термин 8.5 – 8.62 и 8.74.

Имеется ряд логических ошибок и отступлений от указанных выше требований при построении определений терминов. Так в определении термина «1.1.2. Кинематическая пара» использован термин «1.1.2. Звено», а в определении термина «1.1.2. Звено» – термин «1.2.3. Кинематическая пара», т.е. здесь присутствует логический круг. В определении термина «1.2.6. Замыкание кинематической пары» указываются возможные методы замыкания: силовое, геометрическое или упругое. Логично предположить, что дальше будут введены три видовых понятия: «Кинематическая пара с силовым замыканием», «Кинематическая пара с геометрически замыканием» и «Кинематическая пара с упругим замыканием». Однако последнее понятие в словаре отсутствует. При подстановке в определение термина «1.2.5. Число степеней свободы кинематической пары» соответствующих дефиниций получим довольно странное высказывание: «Число степеней свободы кинематической пары – число независимых координат, необходимых для описания относительных положений *твердых тел как элементов механизма, соединенных одной или несколькими кинематическими парами с другими телами,* соединенных *соединениями двух звеньев, ограничивающими их относительное движение*».

Добавление новых разделов и соответствующих терминов привело к росту объема терминосистемы. Однако в значительное мере этот рост объясняется не включением новых терминов, а добавлением терминов из смежных наук, математических, общетехнических и общефизических терминов. К сожалению их определения часто не соответствуют общепринятым и даже являются ошибочными. Укажем только на некоторые из них.

«.2.2.9. Скорость – производная *перемещения* по времени». Первая ошибка – в качестве основного признака использовано понятие, связанное с количественной характеристикой. В дефиниции используется термин «2.2.6. Перемещение», определяемый как «изменение положения тела относительно неподвижной системы отсчета». Указание на неподвижную систему отсчета противоречит следующим терминам «2.2.10. Абсолютная скорость», «2.2.11. Относительная скорость» и «2.2.12. Переносная скорость». Термин «изменение» в словаре не определен. В русском языке существительное «изменение» толкуется как происходящее от глагола «изменить – сделать иным, т.е. речь идет о качественном понятии, не имеющим четкого количественного выражения, а, следовательно, производная в этом случае не может быть определена. На самом деле в механике термин

«перемещение» определяется как «вектор, соединяющий положение движущейся точки в начале и в конце некоторого промежутка времени [15].

Термины «3.5.33. Растяжение», «3.5.35. Сжатие» и т.д. определяются как «напряженные состояния». На самом деле принято считать, что эти термины определяют виды деформации, а напряженные состояния относятся к конкретной точке и определяются совокупностью напряжений в этой точке [9].

В определении термина «3.5.16. Деформация» утверждается, что деформация вызывается действием напряжений, а в определениях понятий «3.5.17. Упругая деформация», «3.5.18. Пластическая деформация», которые являются видовыми по отношению к 3.5.16, говорится о деформации под действием системы сил.

Вопрос гармонизации терминологии в современных условиях приобретает все большую актуальность. К сожалению этот вопрос также решен далеко не полностью.

Имеются разночтения в определениях русских и соответствующих английских терминов. Так в определении русского термина «8.1. Приемлемая область» дается ссылка на термин «3.9.6. Колебание», а соответствующего английского “8.1. Acceptance region” – на “3.9.1. Vibration”. В формулировке «3.4.12. Закон относительности Галилея» в русском языке в дефиниции используется термин «5.3.1. Инерциальная (земная) система координат», а в английском – “3.8.21. Inertial system”, обозначающие разные понятия. Как отмечалось ранее [10] формулировки законов не являются терминами и не должны включаться в терминологический словарь. Кроме того, во многих случаях, общепринятые русские названия заменены кальками с английского языка, например названию на английском языке “3.4.1. Principle of work and energy” сопоставлен термин «Принцип работы и энергии» (в русском языке принято название «Теорема об изменении кинетической энергии»), а вот «3.4.12. Закон относительности Галлея» в русском языке принято называть «Принцип относительности Галилея» [15]. Раздел 10 назван «Стабильность», хотя в русском языке используется название «Теория устойчивости», аналогично все термины в этом разделе «10.4. Стабильность в смысле Лагранжа», «10.5. Стабильность в смысле Ляпунова» и т.д. не соответствуют общепринятым: «Устойчивость по Лагранжу», «Устойчивость по Ляпунову» [7].

Отдельно хотелось бы остановиться на разделе «14. Подъемно-транспортное оборудование и логистика». Включение его в терминологический словарь по теории механизмов и машин представляется весьма спорным. Если подъемно-транспортные машины относятся к классу машин, хотя и отраслевых, что противоречит содержанию теории механизмов и машин, как науки «об общих методах исследования свойств механизмов и машин и их проектирования» [13], то транспортная логистика имеет дело не с механикой, машинами, механизмами, а с «планированием, координацией и

контролем функций оперативного управления транспортной системой» [20]. Вопросы транспортной логистики отнесены к научной специальности 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте», входящую в группу специальностей 05.22.00 «Транспорт», а вопросы машиноведения, теории механизмов и машин, систем приводов, деталей машин робототехники, мехатроники относятся к группе научных специальностей 05.02.00 «Машиностроение и машиноведение». Академик А.Ю. Ишлинский не счел необходимым включить термин «логистика» в политехнический словарь [9]. И совершенно необоснованно на наш взгляд включение в терминосистему теории механизмов и машин таких терминов, как: «14.5.1 Логистическая цепь (система снабжения) – система организаций, людей, технологий, производственных операций, информации и ресурсов, обеспечивающая перемещение продукции или услуг от производителя к потребителю», «14.5.10. Поддон (паллета) – грузовая единица в виде платформы», «14.5.31. Грузополучатель – физическое или юридическое лицо, уполномоченное принимать товар», «14.5.27. Передатчик – устройство для трансляции передаваемого радиосигнала с целью обмена информацией», «14.1.5. Груз (фрахт) – товары или материалы, перемещаемые посредством транспортных средств», «14.1.28. Габарит – контур, через который должен проходить железнодорожный подвижной состав с грузом, имея в виду ограничения в туннелях и на железнодорожных перегонах» и ряда аналогичных. Не имеют практической ценности использованные в этом разделе определения: «14.4.23. Автоматически управляемое транспортное средство – автоматически управляемое или автоматическое транспортное средство», «14.5.3. Изменение (транспортной моды) – изменение транспортной моды», «14.5.25. Первое (последнее) место хранения (грузовой единицы) – первое (последнее) место хранения: термин, используемый для обозначения места хранения грузовой единицы».

Заключение

Используемая в настоящее время совокупность терминов содержит ряд жаргонизмов, устаревших терминов и квазитерминов, не является правильно организованной и упорядоченной терминосистемой теории механизмов и машин. Как уже отмечалось ранее [10], в терминологические словари теории механизмов и машин включено большое число привлеченных терминов, принадлежащих к общетехническим, общефизическим и родственным системам понятий, причем в ряде случаев используемые определения противоречат общепринятым или содержат ошибки. В то же время ряд терминов имеющих большую степень внедренности в словарях отсутствуют. Работа по гармонизации терминов наряду с согласованием терминов разных языков привела к замене ряда общепринятых терминов русского языка кальками с английского.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринев-Гриневич С.В. Терминоведение. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 304 с.
2. Детали машин / Л.А. Андриенко [и др.]; под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.
3. За единна и правилна терминология в областта на зъбните предавки и на другите трансмисионни елементи / К Арнаудов [и др.] // Българско списание за инженерно проектиране. – 2011. – № 8. С. 5-19.
4. Крюков В.А. Некоторые аспекты исторического развития основных понятий теории механизмов и машин. // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст. – Ч. 1. – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2012. – С. 40-48.
5. Лейчик В.М. Терминоведение: Предмет, методы, структура. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 256 с.
6. Лотте Д.С. Основы построения научно-технической терминологии. – М.: АН СССР, 1961. – 158 с.
7. Математическая энциклопедия / Гл. ред. И.М. Виноградов. М.: Советская энциклопедия, 1984. 1248 стб.
8. Новый подход к определениям некоторых фундаментальных терминов теории механизмов и машин / В.Д. Плахтин [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. – 2002. – № 1 (58). – С. 58-60.
9. Новый политехнический словарь / Гл. ред. А.Ю. Ишлинский. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 671 с.
10. Пейсах Э.Е. О терминологии по теории механизмов и машин // Теория механизмов и машин. – 2004. – Т. 2. – № 2. С. 80-94.
11. Проблематика определений терминов в словарях разных типов / Ред. кол. С.Г. Бархударов (пред.). – М.: Наука, 1976. – 266 с.
12. Теоретическая механика. Терминология. Вып. 102. – М.: Наука, 1984. – 46 стр.
13. Теория механизмов и машин. Терминология / Н.И. Левитский [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 80 с.
14. Теория механизмов и машин. Терминология. Вып. 93. – М.: Наука, 1978. – 33 стр.
15. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М. :Советская энциклопедия, 1983. – 944 стр.
16. Философия математики и технических наук / С.А. Лебедев [и др.]: под общ. ред. проф. С.А. Лебедева. – М.: Академический проект, 2006. – 779 с.
17. Шалобаев Е.В., Толочка Р.Т. К вопросу о терминологии в области мехатроники // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 5(81). – С. 148-151.
18. Boegelsack G. Twenty-five Years IFToMM Commission A “Standardization of Terminology” - history, methodology, results and future work // Mech. Mach. Theory. – 1998. – Vol. 33. – N 1/2. – P. 1-5.

19. IFToMM dictionaries online. October 2007 version. [Электронный ресурс] // URL: http:// http://79.6.136.172/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=196 (дата обращения 11.04.2016).
20. IFToMM dictionaries online. Version 3.1 – May 2014. [Электронный ресурс] // URL: http://www.iftomm-terminology.antonkb.nl (дата обращения 11.04.2016).
21. Ionescu T., Boegelsack G., Leinonen T. Past, present and future in TMM terminology // International Symposium on History of Machines and Mechanisms. Proceedings HMM2004. – Dordrecht /Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 27-34.
22. Ionescu T.G. On the Progress of Standardization of Mechanism and Machine Science Terminology // 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18-21. – 2007.
23. Williams J.D. "It's just a theory": trainee science teachers' misunderstandings of key scientific terminology // Evolution: Education and Outreach. – 2013. – 6:12.
24. Zdanytė J. Few Remarks on the IFToMM Dictionary from the linguistic Point of View // Terminology for the Mechanism and Machine Science: Proceedings of the Scientific Seminar. Belarus, 2010. – P. 135-136.

V.A. Krukov

ON SOME PROBLEMS OF THE THEORY OF MECHANISMS AND MACHINES TERM SYSTEM BUILDING

Tula State University, Russia.

Abstract

The article describes the current state of terminology of theory of mechanisms and machines. The major mistakes making when building the term system and definitions are analyzed.

Key words: theory of mechanisms and machines, terminology, term system, term, mechanism and machine science.

REFERENCES

[1] Grinev-Grinevich S.V. Science of terminology. – M.: Publ. centre "Academy", 2008. – 304 p. (in Russian).
[2] Machine elements / L.A. Andrienko [et al.]; O.A. Ryahovskiy (ed.). – M.: Publ. BMSTU, 2002. – 544 p. (in Russian).
[3] Unified and correct terminology in the field of gearing and other transmission elements / K. Arnaudov [et al.] // Bulgarian Journal for Engineering Design. – 2011. – N 8. P. 5-19. (in Bulgarian).

[4] Krukov V.A. Some Aspects of Historical Development of the Main Concepts of the Mechanism and Machine Theory // Controlled Vibrational Technologies and Machines: collected science articles. – P. 1. – Kursk: SWSU, 2012. – P. 40-48. (in Russian).
[5] Leichik V.M. Science of Terminology: Subject, Methods, Structure. – M.: Publ. Centre LKI, 2007. – 256 p. (in Russian).
[6] Lotte D.S. Foundations of Constructing Scientific and Technical Terminology. – M.: AS USSR, 1961. – 158 p. (in Russian).
[7] Mathematical Encyclopedia / I.M. Vinogradov (ed. in chief). M.: Soviet Encyclopedia, 1984. – 1248 col. (in Russian).
[8] A New Approach to Definitions of some Fundamental Terms of Theory of Mechanisms and Machines / V.D. Plachtin [et al.] // Handbook. An Engineering Journal. – 2002. – N 1 (58). – P. 58-60. (in Russian).
[9] The New Polytechnic dictionary / A.U. Ichlinskiy (ed. in chief). – M.: Great Russian Encyclopedia, 2000. – 671 p. (in Russian).
[10] Peysah E.E. About the Terminology of Theory of Mechanisms and Machines // Theory of Mechanisms and Machines. – 2004. – V. 2. – N 2. P. 80-94. (in Russian).
[11] The Problem of Definitions in Dictionaries of Different Types / The Ed. Board S.G. Barhudarov (Chairman.). – M.: Science, 1976. – 266 p. (in Russian).
[12] Theoretical Mechanics. Terminology. Issue 102. – M.: Наука, 1984. – 46 p. (in Russian).
[13] Theory of Mechanisms and machines. Terminology / N.I. Levitskiy [et al.]; K.V. Frolov (ed). – M.: Publ. BMSTU, 2004. – 80 p. (in Russian).
[14] Theory of Mechanisms and machines. Terminology. Issue 93. – M.: Science, 1978. – 33 p. (in Russian).
[15] Physical Encyclopedic Dictionary / A.M. Prohorov (ed. in chief). – M.: Soviet encyclopedia, 1983. – 944 p. (in Russian).
[16] Philosophy of Mathematics and Technical Sciences / S.A. Lebedev [et al.]: prof S.A. Lebedev (ed). – M.: Publ. "Academic Projec", 2006. – 779 p. (in Russian).
[17] Shalobaev E.V., Tolochka R.T. To the Question of Terminology in the Field of Mechatronics // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2012. – N 5(81). – P. 148-151. (in Russian).
[18] Boegelsack G. Twenty-five Years IFToMM Commission A "Standardization of Terminology" - history, methodology, results and future work // Mech. Mach. Theory. – 1998. – Vol. 33. – No 1/2. – P. 1-5.
[19] IFToMM dictionaries online. October 2007 version. [Электронный ресурс] // URL: http:// http://79.6.136.172/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=196 (access date 11.04.2016).
[20] IFToMM dictionaries online. Version 3.1 – May 2014. [Электронный ресурс] // URL: http://www.iftomm-terminology.antonkb.nl (access date 11.04.2016).

[21] Ionescu T., Boegelsack G., Leinonen T. Past, present and future in TMM terminology // International Symposium on History of Machines and Mechanisms. Proceedings HMM2004. – Dordrecht /Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 27-34.
[22] Ionescu T.G. On the Progress of Standardization of Mechanism and Machine Science Terminology // 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18-21. – 2007.
[23] Williams J.D. "It's just a theory": trainee science teachers' misunderstandings of key scientific terminology // Evolution: Education and Outreach. – 2013. – 6:12.
[24] Zdanytė J. Few Remarks on the IFToMM Dictionary from the linguistic Point of View // Terminology for the Mechanism and Machine Science: Proceedings of the Scientific Seminar. Belarus, 2010. – P. 135-136.

УДК 621.74.047.06:001; DOI 10.1872/MMF-2016-24

А. Л. Сотников

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

Алексей Леонидович Сотников, к.т.н., доцент
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
ул. Артема, 58, Донецк, 83001, ДНР
E-mail: m-lab@ukr.net

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы контроля соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ с помощью разработанного комбинированного способа измерения координат кристаллизатора в статике и динамике. Результаты промышленного опробования показали эффективность предложенных технических решений на основе применения электронного тахеометра и анализатора вибрации. Данные решения позволили сформировать альбом неисправностей механизма качания кристаллизатора по форме траектории контрольной точки.

Ключевые слова: механизм качания, кристаллизатор, технологическая ось, МНЛЗ, анализатор вибрации, орбита.

Механизм качания кристаллизатора (МКК) относится к динамическому оборудованию машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), к которому предъявляются повышенные требования по обеспечению заданных параметров колебательного движения кристаллизатора. В первую очередь это касается соосности траектории движения гильзы кристаллизатора (по базовой стенке) с технологической осью ручья МНЛЗ.

С целью контроля траектории движения кристаллизатора автором ранее были разработаны методы измерения его радиуса качания [1,2]. Также известны методы контроля траектории движения контрольной точки механизма качания с помощью двух- или трехкоординатных датчиков вибрации (акселерометров) [3], которые позволяют в режиме реального времени регистрировать траекторию в одной или в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, соответственно.

Как показали результаты апробирования данных методов контроля, они не полностью отвечают требуемой точности результатов измерения. При определении радиуса качания по измерениям амплитуды

колебательного движения в двух контрольных точках механизма качания [1,2] результаты очень сильно расходятся. Например, фактический радиус качания может варьироваться от 2 до 9 м при базовом радиусе МНЛЗ 8 м, как для нового МКК, так и для механизма качания уже находящегося короткое время в эксплуатации. Регистрация траектории движения контрольной точки механизма качания позволяет определить фактическую форму траектории, но при этом вычислить отклонение соосности оси гильзы кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ практически невозможно. Недостаток данного способа контроля траектории движения стола качания заключается в измерении параметров механических колебаний в системе координат используемых при этом датчиков вибрации, которая непривязана к системе координат МНЛЗ, что не дает возможность вычислить положение кристаллизатора относительно технологической оси ручья машины.

В связи с этим актуальной проблемой является разработка способа контроля параметров колебательного движения кристаллизатора относительно технологической оси МНЛЗ на их соответствие заданным значениям.

Для решения поставленной задачи разработан комбинированный способ измерения координат положения стола качания в статике и динамике.

Измерение координат контрольных точек оборудования МНЛЗ с помощью измерительного комплекса "Визир 3D" на базе электронного тахеометра [4] осуществляется только в статике, т.е. при неподвижном положении оборудования машины, что не позволяет однозначно определить положение кристаллизатора относительно технологической оси ручья в процессе его колебательного движения. Поэтому принято решение о комбинировании измерений координат контрольных точек кристаллизатора в статике (геодезическими методами) и динамике (виброметрическими методами).

Контроль положения МКК (кристаллизатора) с применением электронного тахометра заключается в следующем. Механизма качания в ручном режиме поочередно переводится в три положения: крайнее верхнее, среднее и крайнее нижнее. В каждом из этих положений проводится измерение координат контрольных точек МКК, а также кристаллизатора – по базовой стенке гильзы на торцевой верхней части. В первом случае измерения выполняются с помощью специального разработанных измерительных приспособлений [5], а во втором случае – на отражательную пленку, установленную на стенке гильзы кристаллизатора в торцевой верхней части.

Для расчета отклонений положения кристаллизатора МНЛЗ от заданного проектно-конструкторской документацией было разработано специальное программное обеспечение для измерительного комплекса

"Визир 3D" [5]. Программа моделирует положение кристаллизатора в системе координат МНЛЗ с учетом текущего положения кристаллизатора в вертикальной плоскости (рис. 1).

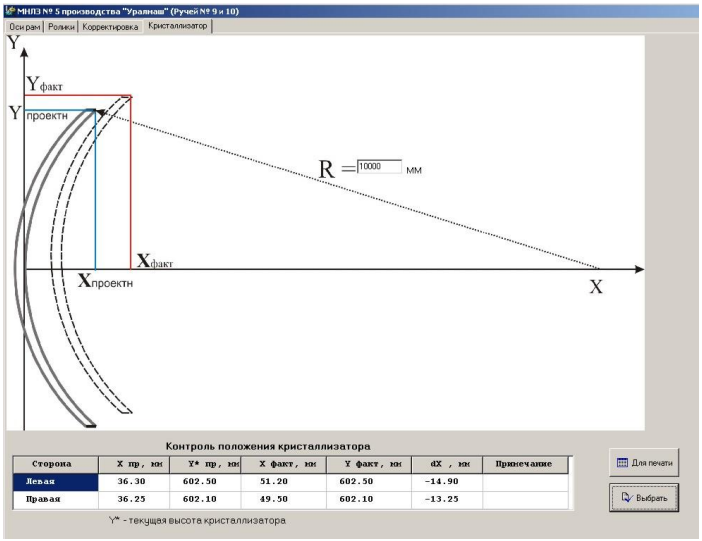


Рис. 1. Рабочее окно программы измерительного комплекса "Визир 3D", в режиме расчета отклонений положения кристаллизатора МНЛЗ от заданного проектно-конструкторской документацией

Контроль траектории контрольной точки МКК с помощью виброметрических методов выполняется для оценки отклонений положения кристаллизатора относительно технологической оси ручья в динамике [6].

В качестве средства измерения и анализа сигналов выступает современный многоканальный (минимум 2…3-х канальный) анализатор вибрации, обладающий возможностью синхронной регистрации сигналов с нескольких датчиков вибрации [7]. Анализатор вибрации должен обеспечивать измерения общей вибрации МКК в диапазоне частот, верхняя граница которых больше максимальной рабочей частоты колебательного движения кристаллизатора минимум в 2,5 раза. Диапазон измеряемых амплитуд должен приблизительно в 2...5 раз превышать значения вибрации, имеющих место в обычном рабочем режиме механизма качания, что позволит без проблем наблюдать за изменением вибрации в переходных режимах работы.

Датчик фазы необходим для синхронизации результатов измерения параметров вибрации МКК с его положением, отслеживаемым по метке на эксцентриковом вале его электромеханического привода.

Для определения общей траектории движения точки во времени необходимо применение двух датчиков абсолютной вибрации, расположенных под углов 90° друг к другу (в горизонтальном и вертикальном направлении) в одной плоскости измерения, в рассматриваемом случае, в вертикальной.

Виброметрический метод измерения траектории контрольной точки МКК (одной или двух точек, для которых в статике определенны координаты в системе координат МНЛЗ) основан на измерении орбиты ее движения в вертикальной (продольной и/или поперечной) плоскости. Типичная траектория точки МКК приведена на рис. 2.

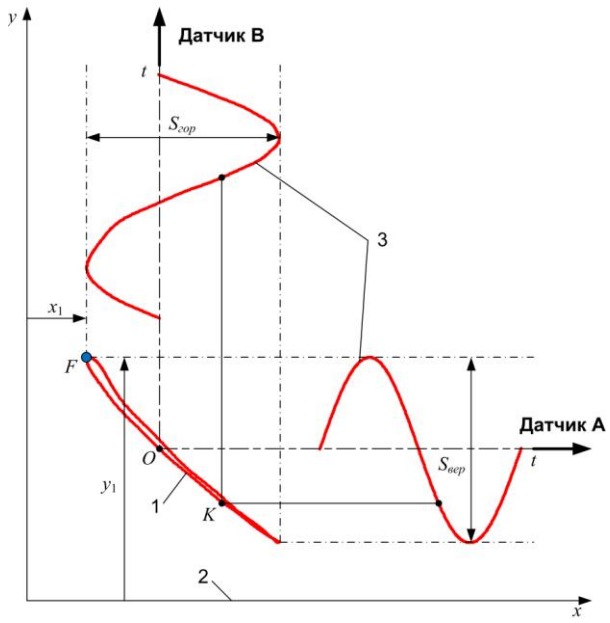


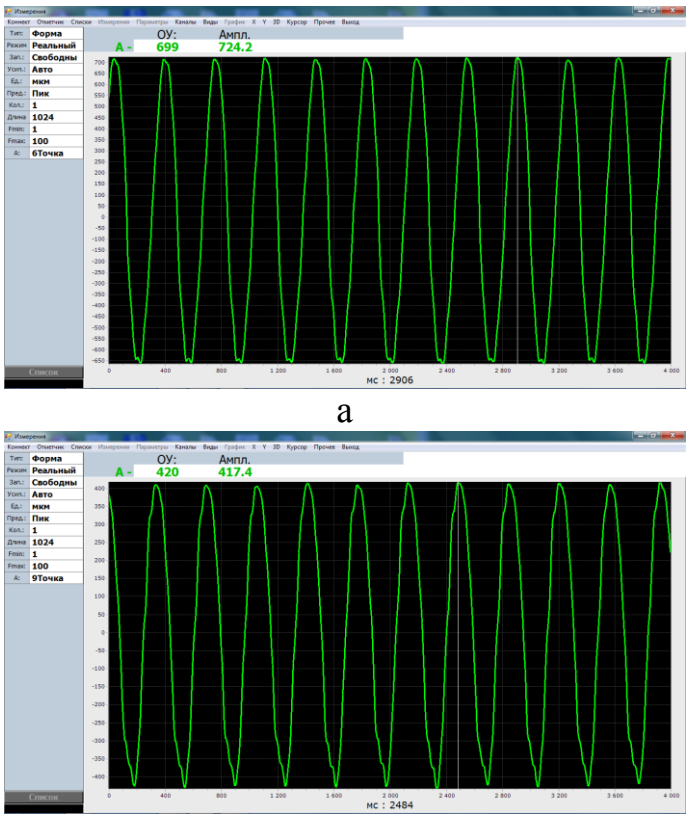
Рис. 2. Изменение во времени положения контрольной точки МКК и вызываемые этим движением сигналы, регистрируемые с датчиков вибрации *A* и *B* (при исправном состоянии МКК):
1 – траектория движения (орбита) контрольной точки;
2 – неподвижная система координат МНЛЗ; 3 – сигналы датчиков *A* и *B*;
O – точка начала отсчета инерционных датчиков вибрации;
K – мгновенное положение контрольной точки;
F – положение контрольной точки в крайнем верхнем положении стола качания, фиксируемое по сигналу с датчика фазы;
x_1 и y_1 – координаты контрольной точки в крайнем верхнем положении механизма качания в неподвижной системе координат МНЛЗ
$S_{гор}$ и $S_{вер}$ – размах перемещения контрольной точки в направлениях измерения датчиков *A* и *B*; *t* – время

Форма траектории зависит от динамических характеристик МКК, технического состояния подшипников качения шарниров и опор, геометрии рычажного механизма качания и вида сил, возбуждающих дополнительную вибрацию стола качания [8]. В общем случае, причиной отклонения траектории движения контрольной точки от заданной формы и положения может быть множество факторов, что приводит к появлению траектории сложной формы, которая представляет собой векторную сумму откликов на действие каждого вынуждающего фактора. Фактически, форма траектории контрольной точки стола качания отражает техническое

состояние МКК, качество его изготовления, сборки, монтажа и выставки. Выполненный анализ накопленных результатов измерения траектории контрольной точки механизма качания в продольной и поперечной плоскостях одной из эксплуатируемых в настоящее время сортовой МНЛЗ позволил сформировать соответствующий альбом неисправностей МКК.

Синхронизация результатов измерения траектории контрольной точки с углом поворота эксцентрикового вала позволяет определить положение на траектории точки *F*, соответствующей крайнему верхнему положению кристаллизатора (см. рис. 2). Зная координаты точки *F* в статике по результатам измерения геодезическими методами, появляется возможность построить траекторию движения этой точки в системе координат МНЛЗ для расчета отклонений ее положения относительно технологической оси ручья машины, с последующей выработкой корректирующих воздействий по дополнительной выставке МКК. Для этого результаты измерения импортируются из анализатора вибрации в программное обеспечение измерительного комплекса "Визир 3D".

Экспериментальное опробование разработанного метода контроля было осуществлено на сортовой МНЛЗ в условиях одного из металлургических заводов Донецкого региона [9]. Типичные результаты измерения параметров вибрации стола качания приведены на рис. 3.



а

б

Рис. 3. Временная форма виброперемещения контрольной точки МКК в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

На рис. 4 приведены соответствующие результаты моделирования траекторий контрольной точки механизма качания в системе координат МНЛЗ при различном техническом состоянии МКК.

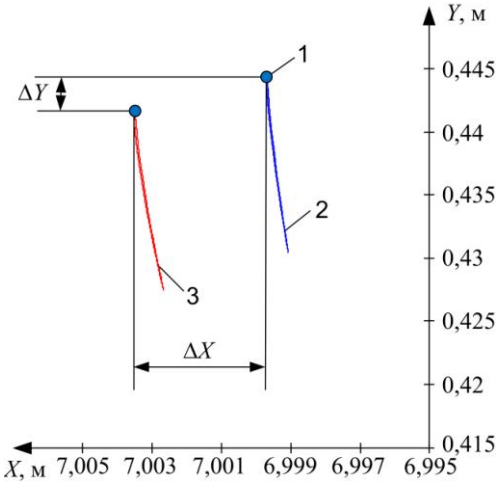


Рис. 4. Результаты построения траектории контрольной точки МКК в системе координат МНЛЗ:
1 – крайнее верхнее положение кристаллизатора;
2 и 3 – траектория при исправном состоянии МКК и нарушении его выставки

Отклонение значения размаха виброперемещения по направлениям измерения, а также наличие незначительных отклонений формы сигналов от синусоидальной указывает на ослабления посадки осей шарниров, а также ослабление резьбовых соединений МКК.

Построенная траектория контрольной точки стола качания (см. рис. 4, кривая 3) в системе координат МНЛЗ позволила определить ее форму и отклонение положения от заданного: ΔX=3,7 мм и ΔY=2,5 мм.

Основываясь на результатах анализа параметров вибрации МКК была дана оценка его технического состояния, как удовлетворительное и было принято решение в ближайшую плановую остановку МНЛЗ провести техническое обслуживания и ремонт механизма качания, включая обтяжку резьбовых соединений и выполнение повторного контроля соосности движения кристаллизатора с технологической осью ручья машины.

Таким образом, разработан новый метод комбинированного контроля соосности колебательного движения кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ, объединяющего периодический контроль положения кристаллизатора геодезическими методами с помощью электронного тахеометра и оперативный контроль траектории контрольной точки стола качания виброметрическими методами с использованием анализатора вибрации.

Следует отметить, что измерительный комплекс "Визир 3D" нашел широкое применение в образовательном процессе [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоров В.А., Сотников А.Л. Контроль сонаправленного движения кристаллизатора с технологической осью МНЛЗ / Металлургические процессы и оборудование. – 2010. – №3. – С. 34-39.
2. Сотников А.Л. Метод оперативного контроля соосности кристаллизатора с технологической осью ручья МНЛЗ / Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2006. – №1. – С. 32-35.
3. Mould Oscillation Measuring System [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mmf.de/manual/ks473_khm_mane.pdf
4. Шоломицкий А.А., Сотников А.Л. Высокоточный измерительный комплекс "Визир 3D" / Prostoev.NET. – 2014. – №1. – С. 52-58.
5. Совершенствование технологий контроля положения и выставки оборудования МНЛЗ / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.А. Лунев, А.Л. Сотников и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – №3. – С. 12-25.
6. Сидоров В.А., Сотников А.Л. Анализ систем контроля и диагностирования механизмов качания МНЛЗ / Наук. пр. Донецького національного технічного університету / Редкол.: Мінаєв О.А. (голова) та інш. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип.102. – С. 46-55. (сер.: металургія)
7. Диамех 2000: Анализатор вибрации ОНИКС [Электронный ресурс]. – URL: http://www.diamech.ru/vibration_analyzer_onyx.html
8. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А.Л. Сотников, В.М. Нагорный, А.Ю. Оробцев и др. // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – №1. – С. 44-54.
9. Состояние непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ в Украине и Молдове / А.Л. Сотников, В.Н. Киреев, А.Ю. Оробцев и др. // Сталь. – 2013. – №12. – С. 8-13.
10. Шоломицкий А.А., Сотников А.Л., Писанка С.П. Перспективы развития дисциплины "Начертательная геометрия" / Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 179-184.

A.L. Sotnikov

PARAMETERS CONTROL OF THE OSCILLATORY MOTION OF A CCM MOLD

Donetsk National Technical University, DPR

Abstract

The paper considers the issues of alignment control of the oscillatory motion of the mold with the technological axis of the CCM strand using the developed combined method of measuring the coordinates of the mold in statics

and dynamics. The industrial test results showed the effectiveness of the proposed technical solutions through the application of electronic tachymeter and vibration analyzer. These solutions allowed creating the album of faults of the oscillation mechanism of the mold under the shape of the trajectory of the control point.

Keywords: oscillation mechanism, mold, technological axis, continuous casting machine, vibration analyzer, orbit.

REFERENCES

[1] Sidorov V.A., Sotnikov A.L. Control of the codirectional move of the mold with technology axis of the CCM. Metallurgical processes and equipment, 2010, No.3, pp. 34-39. (rus.)
[2] Sotnikov A.L. The method of operational control of the alignment of the mold with the technological axis of the stream of CCM. Vibration machines: measurement, reduction, protection, 2006, No.1, pp. 32-35. (rus.)
[3] Mould Oscillation Measuring System [Electronic resource]. – URL: http://www.mmf.de/manual/ks473_khm_mane.pdf
[4] Sholomytskyi A.A., Sotnikov A.L. High precision measuring complex "Vizir 3D". Prostoev.NET, 2014, No.1, pp. 52-58. (rus.)
[5] Mogilny S.G., Sholomytskyi A.A., Luniov A.A., Sotnikov A.L et al. Development of control technologies of position and alignment of CCM equipment. Metallurgical processes and equipment, 2012, No.3, pp. 12-25. (rus.)
[6] Sidorov V.A., Sotnikov A.L. Анализ систем контроля и диагностирования механизмов качания МНЛЗ. Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Metallurgy, Donetsk, DonNTU, 2005, Vol.102, pp. 46-55. (rus.)
[7] Diameh 2000: Vibration analyzer ONIX [Electronic resource]. – URL: http://www.diamech.ru/vibration_analyzer_onyx.html (rus.)
[8] Sotnikov A.L., Nagorny V.M., Orobtsev A.Y. et al. Regulation of operating modes and vibration level of the CCM mold oscillating mechanism. Metallurgical processes and equipment, 2013, No.1, pp. 44-54. (rus.)
[9] Sotnikov A.L., Kireev V.N., Orobtsev A.Y. et al. Continuous casting of steel at bar-casting machines in Ukraine and Moldova. Steel in Translation. 2013, Vol.43, Issue12, pp. 808.
[10] Sholomytskyi A.A., Sotnikov A.L., Pisanka E.S. Rospects of development of the discipline "descriptive geometry". Proceedings of the 3rd International scientific-practical conference "Modern engineering. Science and education". St. Petersburg, Publishing House of the Polytechnic. Univ, 2013, pp. 179-184. (rus.)

УДК 621.833.7 ; DOI 10.1872/MMF-2016-25

Тимофеев Г.А.[1], Егорова О.В.[2], Самойлова М.В.[3], Григорьев И.И.[4]

КИНЕМАТИКА И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ВОЛНОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

[1]Геннадий Алексеевич Тимофеев, д.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел.: (499)263-6197, E-mail: timga@bmstu.ru

[2]Ольга Владимировна Егорова, д.и.н., к.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел.: (499)263-4567, E-mail: tmm-olgaegorova@yandex.ru

[3]Самойлова Марина Валерьевна, к.т.н., доцент
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел.: (499)263-6605, E-mail: cm2003@list.ru

[4]Григорьев Илья Игоревич, студент
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
E-mail: eysterous@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены особенности расчета и кинематика волновой зубчатой передачи (ВЗП). Изобретение американского инженера Уолтона Массера в 1955 году под названием «Strain wave gearing» (SWG), что в переводе на русских означает «зубчатая передача, использующая волны деформации» или «волновая зубчатая передача», стало знаменательным событием в инженерной деятельности, связанной с развитием механических передач. Главной идеей и движущей силой его изобретения является гибкость одного из зубчатых колес. За последующие годы проведенные исследования в России и в мире привели к созданию большого количества новых приводов с волновыми зубчатыми передачами, имеющих высокие качественные показатели по точности, КПД, быстродействию и габаритным показателям. Эти передачи, минимизированные по массе и размерам, способны передавать повышенные крутящие моменты в широком диапа-

зоне передаточных чисел, обладают способностью точного позиционирования и рядом других эксплуатационных преимуществ. Именно в силу своих достоинств волновые механизмы нашли широкое применение в космической и военной технике в нашей стране и в США.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, крутильная жесткость, быстродействие, точность, КПД

1. Введение

Наибольшее распространение среди всех известных механических передач, созданных человеческим гением, получили зубчатые передачи, благодаря своей компактности, надежности и долговечности. Они используется повсеместно и являются неотъемлемой частью практически любой машины в приборостроении и часовой промышленности, во всех отраслях машиностроения, и в частности, в металлорежущих станках, автомобилях, тракторах, сельхозмашинах. Годовое производство зубчатых колес только в России исчисляется сотнями миллионов штук, а их размеры изменяются от долей миллиметра до десяти и более метров.

Переломный момент в развитии зубчатых передач произошел в середине XVIII века, когда Леонард Эйлер (1707-1783), великий математик швейцарского происхождения, предложил в 1754 году использовать для зацепления двух цилиндрических колес эвольвентный профиль зубьев. С этого момента именно эвольвентная зубчатая передача становится основной и самой распространенной, благодаря её уникальным свойствам. Так, например, при увеличении диаметра основной окружности колеса до бесконечности, зубчатое колесо превращается в зубчатую рейку с прямолинейным профилем зубьев, что удобно для измерения и изготовления режущего инструмента, применяемого при нарезании зубьев методом обкатки. Постоянство передаточного отношени и технологичность изготовления предопределили широкое распространение эвольвентного зацепления.

Однако в сентябре 1959 года Уолтон Массер опубликовал материалы своего патента на механизм, который он назвал «Strain Wave Gearing» (SWG), что в переводе на русский язык означает - «зубчатая передача, использующая волны деформации» или «волновая зубчатая передача» (ВЗП). Наличие гибкого колеса стало главной особенностью, определяющей все необычные свойства нового изобретения.

2. Волновая зубчатая передача

Известный американский изобретатель Кларенс Уолтон Массер (1909-1998) впервые в 1959 году опубликовал свой патент (US patent 2,906,143) [1] на механизм под названием «Strain Wave Gearing» (SWG) (рис.1). Уже само сочетание слов «зубчатая волновая передача» и «волны деформации» озадачивало, так как долгие годы среди инженеров и машиностроителей господствовало мнение, что крутильная жесткость зубчатой

передачи – необходимый и естественный спутник ее прочности, надежности и долговечности. Гибкость «железной рукой» изгонялась из конструкций передач. И вдруг Массер предложил именно деформацию зубчатых колес призвать для решения «неподдающихся» проблем, связанных с улучшением их качественных показателей!

Уолтон Массер был профессиональным изобретателем. В соответствии с его официальной биографией он зарегистрировал более 250 крупных изобретений [1-3] и открытий, включая безоткатные винтовки, авиационные катапульты, приборы для подводного тестирования детонации и многое другое. Однако именно изобретение «волновой зубчатой передачи» сделало Массера всемирно известным. Кроме того, оно было включено в список 5000 событий, которые характеризуют научные и технологические достижения человечества XX века. За свою жизнь Массер получил более 70 патентов на волновые передачи в 15 странах мира.

Карьера Массера включала в себя обширный опыт в самых разнообразных областях: в течение 15 лет был научным советником Министерства обороны США; работал в качестве главного инженера, директора по исследованиям и консультанта в крупных промышленных и государственных организациях. Но, именно, занимаясь исследованием механики нежестких тел в компании «United Shoe Machinery Corp» (США), он зарегистрировал самое главное свое изобретение – «волновую зубчатую передачу», позднее получившую название «Harmonic Drive».

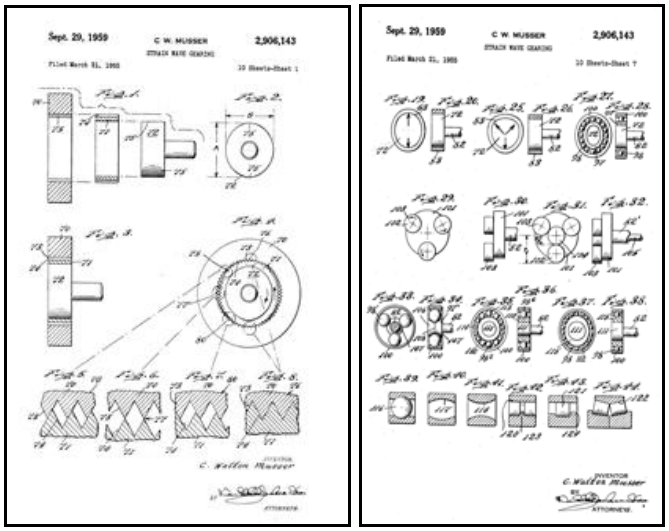


Рис. 1. Патент У. Массера на волновую передачу (US patent 2,906,143) [9]

Что же такое «волновая зубчатая передача»? Это – механическая передача, содержащая зацепляющиеся между собой гибкое и жесткое зубчатые колеса, и обеспечивающая преобразование и передачу движения за счет циклического возбуждения волн деформации в гибком элементе - гибком колесе [3-8,10-11] (рис. 2). Передача движения в волновой передаче

может производиться посредством зубьев, винтового принципа, а также фрикционного контакта.

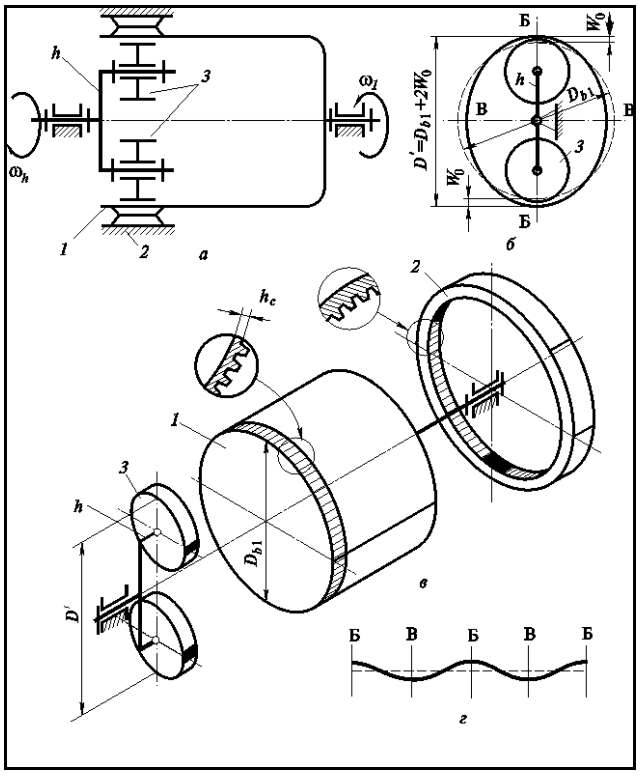


Рис. 2. Волновая зубчатая передача

Волновая зубчатая передача состоит из трех основных элементов: гибкого колеса *1* (рис.2, *а, б, в*), жесткого колеса *2* и генератора волн *h*. Ее можно рассматривать как конструктивную разновидность планетарной передачи с внутренним зацеплением, характерной особенностью которой является использование сателлита (гибкого колеса), деформируемого в процессе передачи движения.

Гибкое зубчатое колесо представляет собой тонкостенную оболочку, один конец которой соединен с валом и сохраняет цилиндрическую форму,а на другом нарезан зубчатый венец с числом зубьев $z_г$. При сборке этот конец оболочки деформируется на $2w_0$ генератором волн. Контур деформированного гибкого колеса образует относительно недеформированного две волны деформации (рис. 2, *г*). Размер по сечению Б-Б называют большой осью, а размер по В-В – малой осью кривой деформации.

В зоне большой оси деформации происходит зацепление зубьев гибкого и жесткого колес. Для обеспечения симметрии нагружения волновой зубчатой передачи обычно используют две волны деформации и четные числа зубьев колес, которые связаны соотношением $z_ж - z_г = 2$.

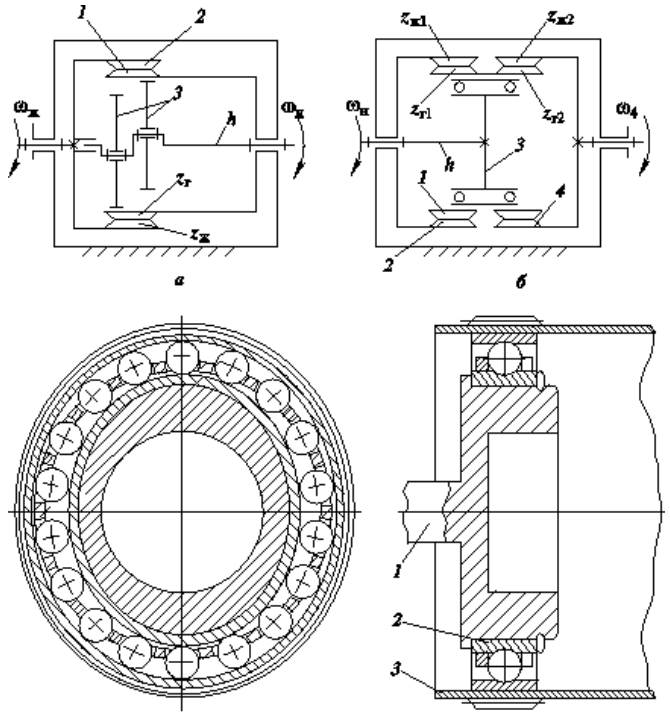


Рис. 3. ВЗП с дисковым (а) и кулачковым (б) генератором волн

Гибкое колесо *1* поджато к жесткому колесу *2* роликами *3*, расположенными на водиле *h*. Такой генератор называют ***роликовым***. Роликовый генератор волн может быть преобразован в дисковый генератор волн при значительном увеличении диаметров роликов *3* (рис.3, *а*) и расположении их в параллельных плоскостях. Чтобы задать зубчатому венцу гибкого колеса определенную принудительную форму деформации, генератор нужно выполнить в виде симметричного кулачка специального профиля. Такой генератор называют ***кулачковым*** (рис.3, *б*). На кулачок *1* напрессовывают гибкий подшипник *2*, чтобы уменьшить трение между гибким колесом *3* и генератором волн.

Дисковые и кулачковые генераторы волн применяют в высоко нагруженных передачах. Кроме механических применяют также электромагнитные, пневматические и гидравлические генераторы волн.

3. Кинематика волновой передачи

При вращении генератора волн обе волны деформации перемещаются по периметру гибкого колеса (тим). В результате каждый зуб гибкого колеса за один оборот генератора волн дважды входит в зацепление с зубьями жесткого колеса. Если числа зубьев колес равны $z_ж$ и $z_г$, а угловые шаги $\tau_ж = 2\pi / z_ж$ и $\tau_г = 2\pi / \tau_г$, то передаточное отношение такой передачи можно подсчитать следующим образом. При остановленном жестком колесе после полного оборота генератора волн $\varphi_h = 2\pi$ вал гибкого колеса повернется в противоположном движению генератора направлении на угол, равный $\varphi_г = 2\pi(z_г - z_ж) / z_г$.

Переходя от углов поворота к угловым скоростям, получаем передаточное отношение ВЗП от генератора волн к гибкому колесу при неподвижном жестком:

$$u_{h\,г}^{(ж)} = \frac{\varphi_h}{\varphi_г} = \frac{\omega_h}{\omega_г} = \frac{2\pi z_г}{2\pi(z_г - z_ж)} = -\frac{z_г}{z_ж - z_г} \qquad (1)$$

В волновой зубчатой передаче с остановленным гибким колесом при повороте генератора волн на угол $\varphi_ж = 2\pi$ жесткое колесо повернется в том же направлении на угол $\varphi_ж = 2\pi(z_ж - z_г)/z_ж$. В этом случае передаточное отношение от генератора волн к жесткому колесу при неподвижном гибком рассчитывается по формуле:

$$u_{h\,ж}^{(г)} = \frac{\varphi_h}{\varphi_ж} = \frac{\omega_h}{\omega_ж} = \frac{2\pi z_ж}{2\pi(z_ж - z_г)} = \frac{z_ж}{z_ж - z_г} \qquad (2)$$

Волновая передача может быть двухступенчатой (рис.3, *б*). В этом случае гибкое колесо *1* выполняется в виде кольца с двумя зубчатыми венцами $z_{г1}$ и $z_{г2}$, которые входят в зацепление с жесткими колесами *2* и *4,* имеющими соответственно $z_{ж1}$ и $z_{ж2}$ зубьев. Если жесткое колесо *2* неподвижно, то движение от вала генератора волн преобразуется с помощью двух волновых зацеплений и передается на выходной вал, соединенный с жестким колесом *4.*

Передаточное отношение двухступенчатой ВЗП определяется формулой:

$$u_{h\,4}^{(2)} = \frac{z_{г\,1} z_{ж\,2}}{z_{г\,1} z_{ж\,2} - z_{ж\,1} z_{г\,2}} \qquad (3)$$

4. Особенности волнового зацепления

Гибкое колесо ВЗП при его нагружении изменяет свою начальную форму. Это происходит из-за наличия зазоров и упругости элементов, взаимодействующих с гибким колесом. Изменение формы гибкого колеса *1* ограничено с внешней стороны жестким колесом *2*, а с внутренней генератором волн *h*. Гибкое колесо, опирающееся на генератор волн в пределах участков постоянной кривизны 2β (рис.4), стремится принять форму жесткого колеса.

С увеличением момента закручивающего гибкое колесо зоны выбранных зазоров в зацеплении увеличиваются, что приводит к увеличению числа пар зубьев в зацеплении. Благодаря многопарности зацепления (нагрузку могут передавать до 40% всех пар зубьев) нагрузочная способность ВЗП выше, чем планетарной. КПД волновой передачи также выше, потому что в зацеплении зубья почти не перемещаются при прилегании гибкого колеса к жесткому. При стальных гибких зубчатых колесах в одноступенчатых волновых передачах можно получить передаточное отношение 60-320, а КПД равным 0,85...0,80. Двухступенчатые ВЗП обеспечивают передаточные отношения от $2 \cdot 10^3$ до 10^4 и более при КПД от 0,7 до 0,1.

Многопарность и многозонность волнового зацепления приводят к значительному усреднению ошибок изготовления и сборки, в результате чего обеспечивается высокая кинематическая точность ВЗП.

Относительно небольшая величина радиальной деформации гибкого колеса позволяет выполнить его в виде колоколообразной оболочки и изготовить герметичные ВЗП, передающие вращение через герметичную перегородку без подвижных уплотнений.

Наиболее ответственные детали ВЗП — гибкий подшипник и гибкое колесо. Гибкое колесо имеет тонкостенное донышко, допускающее осевые перемещения торца цилиндрической оболочки при ее деформировании с другого края. Длину гибкого колеса выбирают от $0{,}5d_{\text{с г}}$ до $1{,}1d_{\text{с г}}$, где $d_{\text{с г}}$ — диаметр недеформированной серединной поверхности гибкого колеса. Толщину $h_{\text{с}}$ гибкого колеса под зубчатым венцом выбирают примерно равной величине $0{,}01d_{\text{с г}}$.Существует несколько методов расчета геометрических параметров волновых зубчатых передач. Настоящая методика, разработанная на кафедре теории механизмов и машин МГТУ им. Н.Э. Баумана [6-8], основывается на предположении, что конструкции генераторов волн рассматриваемых передач обеспечивают постоянную кривизну серединного слоя деформированного гибкого колеса в пределах зон зацепления, ограниченных центральными углами 2β (см. рис. 4, *а*). Вне этих зон гибкое колесо имеет свободную форму деформации. На участке постоянной кривизны зацепление в волновой передаче рассматривается как внутреннее эвольвентное зацепление жесткого колеса с числом зубьев $z_{ж}$ и условного, имеющего параметры гибкого и расчетное число зубьев $z_{у}$.

Исходными параметрами для расчета являются передаточное отношение передачи, ее схема, номинальный крутящий момент на выходном валу, частота вращения генератора волн, срок службы передачи, прочностные характеристики гибкого колеса. Проектировочный расчет заключается в определении диаметра серединной поверхности гибкого колеса по изгибной прочности, из расчета на выносливость или из расчета заданного коэффициента крутильной жесткости [16]. Больший из вычисленных диаметров берется за основу для определения модуля зацепления $m' = d_{\text{с г}} / z_{\text{г}}$, который округляется до ближайшего стандартного значения.

Делительные диаметры колес и толщина $h_{\text{с}}$ обода гибкого колеса под зубчатым венцом определяются по формулам:

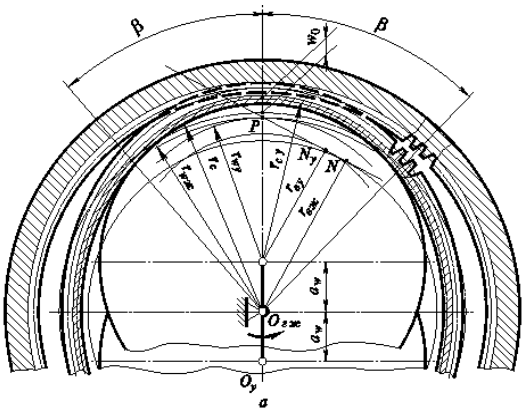
$$\begin{aligned} &d_{\text{г}} = mz_{\text{г}}; \quad d_{\text{ж}} = mz_{\text{ж}}; \\ &h_{\text{с}} = (60 + z_{\text{г}} / 5)mz_{\text{г}} \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \tag{4}$$

Основным варьируемым параметром является относительная радиальная деформация гибкого колеса по большой оси:

$$\frac{w_0}{r_{\text{сг}}} = \left(\frac{z_{\text{ж}} - z_{\text{г}}}{z_{\text{г}}} \right) \gamma, \tag{5}$$

где $\gamma = 0{,}9 \ldots 1{,}2$ — коэффициент относительной радиальной деформации.

а)



б)

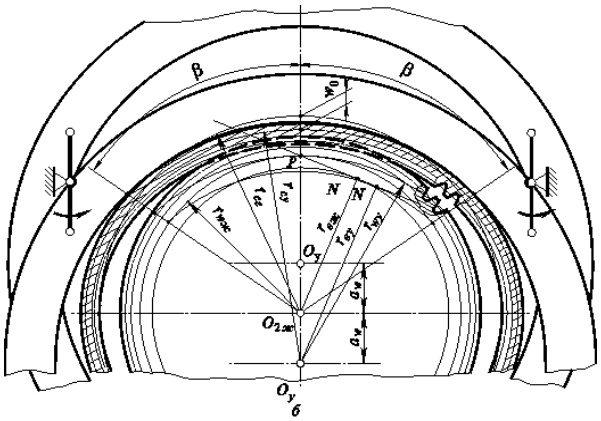


Рис. 4. Волновые зацепления: а) с кольцевым, б) с дисковым генератором волн

Расчетное число зубьев условного колеса равно:

$$z_{\text{у}} = \frac{z_{\text{г}}}{1 \pm K_{\beta}(w_0 / r_{\text{с г}})} \tag{6}$$

В формуле (6), как и во всех последующих, содержащих двойные знаки арифметических действий, верхний знак относится к внутреннему деформированию гибкого колеса дисковым или кулачковым генератором волн, нижний — к внешнему деформированию кольцевым генератором (рис.4, *б*):

$$K_{\beta} = \frac{(4\beta/\pi) - (4/\pi)\cos\beta - 2\sin\beta}{\pi/2 - \beta - \sin\beta\cos\beta}, \tag{7}$$

где β — угловая координата участка постоянной кривизны ($40° < \beta < 65°$).

Далее определяем радиус серединной окружности деформированного гибкого колеса (см. рис.3):

$$r_{\text{с у}} = m(z_{\text{г}}/2 + h_{\alpha}^{*} + c^{*} + h_{\text{с}}/2m + x_{\text{г}}), \tag{8}$$

где h_{α}^{*}, c^{*} — параметры исходного контура; $x_{\text{г}}$ — коэффициент смещения исходного контура:

$$x_{\text{г}} = (h_{\alpha}^{*} + c^{*} + h_{\text{с}}/2m)\delta, \tag{9}$$

где $\delta = 1{,}0 \ldots 1{,}4$ — коэффициент смещения.

При изменении величин β, γ и δ в указанных диапазонах их возможного изменения можно провести оптимизацию качества зацепления. Целевой функцией является теоретический коэффициент перекрытия. Ра-

диус серединной окружности недеформированного гибкого колеса рассчитывается по формуле:

$$r_{\text{с г}} = \frac{z_{\text{г}}}{z_{\text{у}}} r_{\text{с у}} \tag{10}$$

Межосевое расстояние передачи, равное эксцентриситету установки деформирующих дисков, равно:

$$a_w = e = \pm r_{\text{с г}}(1 + w_0 / r_{\text{с г}}) + r_{\text{с у}} \tag{11}$$

Тогда угол зацепления волновой передачи:

$$\alpha_w = \arccos\left(\frac{(z_{\text{ж}} - z_{\text{у}})m\cos\alpha}{2a_w}\right) \tag{12}$$

Жесткое колесо в передачах с дисковым или кулачковым генератором внутреннего деформирования, имеющее внутренние зубья, обрабатывается долбяком с числом зубьев z_0.

Угол станочного зацепления жесткого колеса и долбяка равен:

$$\text{inv}\,\alpha_{w_0\text{ж}} = \text{inv}\,\alpha - \left(\frac{(\text{inv}\,\alpha - \text{inv}\,\alpha_w)(z_{\text{ж}} - z_{\text{у}}) - 2x_{\text{г}}\,\text{tg}\,\alpha}{z_{\text{ж}} - z_0}\right), \tag{13}$$

и коэффициент смещения жесткого колеса определяется как:

$$x_{ж} = [(\cos\alpha/\cos\alpha_{w_0 ж}) - 1]\frac{z_{ж} - z_0}{2} \tag{14}$$

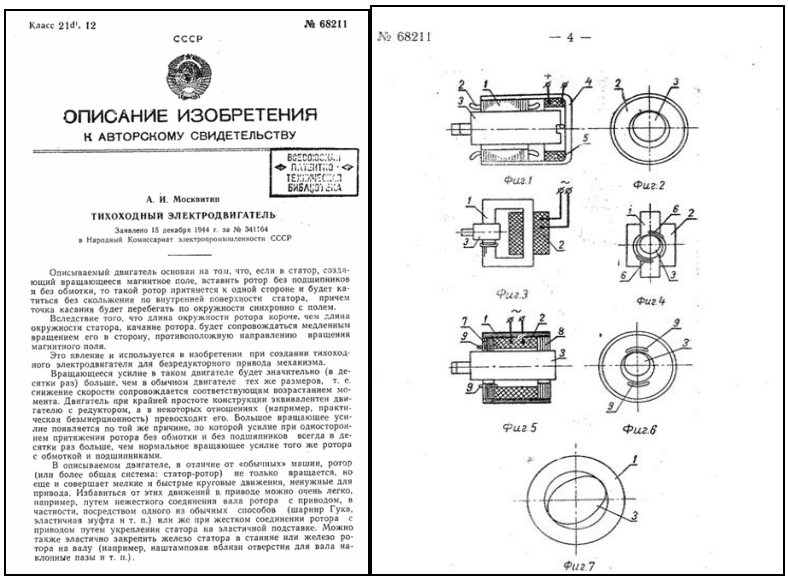
Остальные параметры и исполнительные размеры элементов волновой передачи рассчитывают так же, как зубчатой передачи внутреннего эвольвентного зацепления.

5. Тихоходный электродвигатель с гибким ротором

Известно, что задолго до публикации Массером своего патента на волновую зубчатую передачу, а именно 15 декабря 1944 года, советский инженер Анатолий Иванович Москвитин получил авторское свидетельство с № 68211 на свое изобретение (рис. 5), под названием «Тихоходный электродвигатель», которое по существу является разновидностью волновой передачи с электромагнитным генератором волн [9].

Москвитин предложил в статор электродвигателя вставить тонкостенный гибкий металлический цилиндр, а к обмоткам двух диаметрально противоположных полюсов электромагнитов статора подвести напряжение. Возникшее магнитное поле растягивает круглое сечение цилиндра, превращает его в овал, упирающийся своими вершинами во внутреннюю расточку статора. Если теперь заставить магнитное поле вращаться (наподобие вращающегося поля в статоре асинхронного электродвигателя), то овал будет вращаться с той же скоростью, что и поле. А сам цилиндр будет медленно поворачиваться в противоположную (относительно вращающегося поля) сторону.В изобретении советского инженера совершенно ясно проглядывают все основные элементы теперь уже известных волновых передач: генератор, гибкий и жесткий элементы. Только в его передаче гиб-

кий элемент деформируется не механическим путем (кулачком), а в результате взаимодействия электромагнитного поля статора с гибким ротором.Отсутствие вращающегося генератора придало изобретению Москвитина еще одно уникальное свойство: малую инерционность и, как следствие, высокое быстродействие, то есть способность мгновенно откликаться на полученную команду, начинать вращаться практически одновременно с полученным сигналом.



Класс 21d¹, 12 № 68211

СССР

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ
К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

А. И. Москвитин

ТИХОХОДНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Заявлено 15 декабря 1944 г. за № 341164
в Народный Комиссариат электропромышленности СССР

Описываемый двигатель основан на том, что, если в статор, создающий вращающееся магнитное поле, вставить ротор без подшипников и без обмотки, то такой ротор притянется к одной стороне и будет катиться без скольжение по внутренней поверхности статора, причем точка касания будет перебегать по окружности синхронно с полем.

Вследствие того, что длина окружности ротора короче, чем длина окружности статора, качание ротора будет сопровождаться медленным вращением его в сторону, противоположную направлению вращения магнитного поля.

Это явление и используется в изобретении при создании тихоходного электродвигателя для безредукторного привода механизма.

Вращающееся усилие в таком двигателе будет значительно (в десятки раз) больше, чем в обычном двигателе тех же размеров, т. е. снижение скорости сопровождается соответствующим возрастанием момента. Двигатель при крайней простоте конструкции эквивалентен двигателю с редуктором, а в некоторых отношениях (например, практическая безынерционность) превосходит его. Большое вращающее усилие появляется по той же причине, по которой усилие при одностороннем притяжении ротора без обмотки и без подшипников всегда в десятки раз больше, чем нормальное вращающее усилие того же ротора с обмоткой и подшипниками.

В описываемом двигателе, в отличие от «обычных» машин, ротор (или более общая система: статор-ротор) не только вращается, но еще и совершает мелкие и быстрые круговые движения, ненужные для привода. Избавиться от этих движений в приводе можно очень легко, например, путем нежесткого соединения вала ротора с приводом, в частности, посредством одного из обычных способов (шарнир Гука, эластичная муфта и т. п.) или же при жестком соединении ротора с приводом путем укрепления статора на эластичной подставке. Можно также эластично закрепить железо статора в станине или железо ротора на валу (например, наштамповав вблизи отверстия для вала наклонные пазы и т. п.).

№ 68211 — 4 —

Фиг.1 Фиг.2 Фиг.3 Фиг.4 Фиг.5 Фиг.6 Фиг.7

Рис. 5. Авторское свидетельство № 68211 А.И. Москвитина

Свое изобретение А.И. Москвитин «Тихоходный электродвигатель с гибким ротором для безредукторного привода» предлагал использовать и как генератор для производства электроэнергии. Ему было выдано авторское свидетельство за № 68211, а об изобретении… забыли.

6. Респонсин

Спустя десяток лет предложенный А.И. Москвитиным механизм «изобрели вторично», но уже в Америке. Правда, теперь передача была «вооружена зубьями» - на статоре и роторе имелись зубчатые венцы – и носила она другое имя: «Зубчатая волновая передача с электромагнитным генератором».

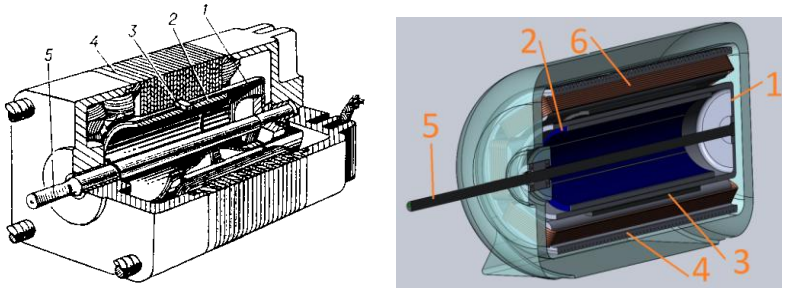


Рис. 6. Респонсин - а) иллюстрация из Большой советской энциклопедии [10]; б) воссозданная 3D модель [11]: гибкое колесо (1), гибкий магнитопровод (2), жёсткое колесо (3), статор (4), выходной вал (5), электромагниты (6)

Второе рождение оказалось более счастливым: передача быстро нашла промышленное применение. Ее назвали респонсин – «мгновенно откликающийся» (от английского respond – откликаться и греческого chronismos – одновременно, мгновенно). В соответствии с определением, данным в Большой советской энциклопедии [10], респонсин – это волновая передача с электромагнитным возбуждением волн деформации (рис.6, а). Вращающееся магнитное поле, возбуждаемое обмотками статора и замыкаемое через расположенный внутри гибкого колеса гибкий магнитопровод, играет в респонсине роль генератора волн деформации. Обмотки диаметрально противоположно расположенных полюсов питаются попарно, что вызывает заданную деформацию гибкого колеса (рис.6, б). При обычной для волновых передач кинематике взаимодействия гибкого и жёсткого колёс выходной вал получает частоту вращения примерно в 100-200 раз меньше частоты вращения магнитного поля. Применение магнитного поля для непосредственного деформирования гибкого колеса позволяет исключить быстровращающиеся элементы передачи, что обеспечивает безынерционность, быстродействие и высокую кинематическую точность. Отсутствие неуравновешенных вращающихся масс полностью исключает вибрацию механизма при работе. КПД респонсина составляет 10-20%, но по быстродействию респонсин превосходит все известные до сих пор механизмы: за секунду он успевает включиться и выключиться около 1500 раз.

7. Области применения ВЗП

Отмеченные достоинства волновой передачи определяют наиболее рациональные области ее применения: силовые и кинематические приводы общего назначения с большим передаточным отношением, задающие и исполнительные механизмы повышенной кинематической точности, быстродействующие приводы систем автоматического управления и регулирования, электромеханические приводы промышленных роботов, приводы для передачи движения в герметизированное пространство в химической, атомной и космической технике [8,11-13]. Волновые передачи применяются при больших передаточных отношениях, когда требуется повышенная кинематическая точность и низкий уровень шума. Оптимальное передаточное отношение, которое зависит от материала гибкого элемента, составляет 75...320 при очень высоком коэффициенте полезного действия (при передаточном отношении 100 КПД составляет 0,9).

Заключение

С момента появления первых волновых передач прошло немногим более 50 лет. Несмотря на то, что идея волновой передачи лежала буквально «перед носом», ее изготовление стало возможным только в XX веке, когда были созданы станки для нарезания мелкомодульных зубчатых колес; были разработаны новые материалы, обладающие высокой прочно-

стью при небольшой твердости. XX век не только дал волновым передачам возможность появиться на свет, он сам вызвал их к жизни, создав высокооборотные источники вращения, потребовавшие для себя редукторов с большими передаточными отношениями; космические ракеты и спутники, которым нужны предельно легкие механизмы; многочисленные агрегаты, для которых главное – это высокая точность, быстродействие; ядерные установки, для которых необходимо передавать движения через герметичную стенку.

Словом, волновые передачи родились вовремя, как раз тогда, когда достижения науки и техники позволили им дерзко вторгнуться в области, традиционно считавшиеся безраздельной вотчиной «жестких» передач: транспортные и грузоподъемные механизмы, устройства особо точных станков и приборов, исполнительные механизмы ракет и спутников, привод химических агрегатов – там, где в первую очередь требуется получение большого передаточного отношения в сочетании с высокой точностью, надежностью, легкостью и компактностью.

У волновых передач, конечно, есть и свои недостатки, ограничивающие области их применения. Прежде всего, это невозможность получения малых передаточных отношений (менее 30). Кроме того, у волновых передач относительно большие потери холостого хода; они весьма чувствительны к способу и виду смазки; имеют высокую напряженность основных элементов - гибкого колеса и генератора волн, переменную крутильную жесткость.

Но бесспорно, что новые и старые зубчатые передачи не противники, а союзники, органически увеличиваюшие возможности конструирования механизмов и машин. Интерес к волновым передачам растет год от года. Теорией и конструированием их занимаются инженеры, ученые, изобретатели многих стран и университетов, крупных промышленных компаний и научных центров. Область применения волновых передач непрерывно расширяется. И, несомненно, новую главу об их успешном будущем уже пишет время, время стремительного прогресса техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Masser C. W. Patent USA, № 2,906,143, 29.09.1959
2. Массер К. Уолтон. Патент США № 3128641, кл. 74-640, 1964
3. Musser, W. Breakthrough in mechanical design: The Harmonic Drive, Machine Design, April 14, 1960, сс. 160-173
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/Волновая_передача
5. Цейтлин Н.И., Цукерман Э.И. Волновые передачи и их применение. Сб. «Вопросы ракетной техники», №2, 1965, сс. 25-28
6. Тимофеев Г.А. Разработка методов расчета и проектирования волновых зубчатых передач для приводов следящих систем: Дисс. док. техн. наук (05.02.18) М.: 1997 – 352 с.
7. А.С. 541067 СССР МКИ F16H 1/100 «Волновая передача», В.Б. Тара-

барин, Г.А. Тимофеев, Б.И., № 48, 1976
8. Костиков Ю.В., Тимофеев Г.А., Фурсяк Ф.И. Новое в проектировании волновых зубчатых передач, Известие вузов. Машиностроение, № 12, 2012, сс. 3-6
9. Москвитин А.И. Тихоходный электродвигатель. Авторское свидетельство № 68211. Бюллетень изобретений № 4, 1947
10. http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/127263/Респонсин
1. 11.Тимофеев Г.А., Егорова О.В., Самойлова М.В., Harmonic Drive. Evolution of Gear Design Harmonic Drive **ISBN for the Proceedings:** 978-986-04-6098/ **os7-001,** 2015 IFToMM 14th World Congress, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015
11. Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Сравнительный анализ схемных решений приводов с волновыми зубчатыми передачами для следящих систем, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение", №4 (103), 2015
12. Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Силовой расчет комбинированного планетарно-волнового механизма с генератором волн внешнего демпфирования, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, №4 (81), 2010

G.A. Timofeev[1], O.V. Egorova[2], M.B. Samoylova[3], I.I. Grigoriev[4]

KINEMATICS AND DESIGN FEATURES OF WAVE TOOTH GEARING

all: Bauman Moscow State Technical Univesity, Russia

Abstract

The paper presents the researches connected with design and kinematics of the wave tooth gearing (WTG). The invention of the American engineer Walton Masser in 1955 under the name "Strain Wave Gearing" (SWG) that in Russian means “gearing, which uses a wave deformation” or "wave tooth gearing", became a significant event in development of mechanical transmissions. The main idea and a driving force of his invention is a flexibility of one of gear wheels. The SWG theory is based on elastic dynamics and utilizes the flexibility of metal. That is the main feature that defines all of unique properties of the transmission: high reduction ratios, high efficiency, compact size and light weight. For the next years the conducted researches in Russia and in the world have led to creation of a large number of the new drives with wave tooth gearings having high quality indicators on the accuracy, efficiency, speed and dimensional indicators. Owing to their advantages wave mechanisms have found broad application in space and military equipment in our country and in USA.

Key words: wave tooth gearing (SWG), tortional rigidity, accuracy, efficiency, high performance characteristics

REFERENCES

[1] Masser C. W. Patent USA, № 2,906,143, 29.09.1959
[2] Masser C. W. US3128641 A, 1964
[3] Musser, W. Breakthrough in mechanical design: The Harmonic Drive, Machine Design, April 14, 1960, pp. 160-173
[4] en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_drive
[5] Zeitlin N.I., Zuckerman A.I. Harmonic drives and practical applications. «Issues of Rocket science» digest, №2, 1965, pp. 25-28
[6] Timofeev G.A. Designing of methods of calculation and design of wave gears for driving servo systems: Dissertation for D.Sc (05.02.18) M.: 1997 – 352 p.
[7] Patent of the USSR № 541067 «Harmonic drive», Tarabarin V.B., Timofeev G.A., Bulletin of inv. № 48, 1976
[8] Kostikov Y.V., Timofeev G.A., Fursyak F.I. New aspects of harmonic drives designs, High School Digest. Engineering № 12, 2012, pp. 3-6
[9] Moskvitin A.I. Low-electric motor. Patent of the USSR № 68211, Bulletin of inv. № 4, 1947
[10] dic.academic.ru/dic.nsf/bse/127263/Респонсин
[11] Timofeev G.A., Egorova O.V., Samoylova M.V., Harmonic Drive. Evolution of Gear Design Harmonic Drive **ISBN for the Proceedings:** 978-986-04-6098/ **os7-001,** 2015 IFToMM 14th World Congress, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015
[12] Timofeev G.A., Samoylova M.V. Comparative analysis of complex solutions of harmonic drives for servo systems. BMSTU Digest. Engineering Part, №4 (103), 2015
[13] Timofeev G.A., Samoylova M.V. The force calculation of the combined epicyclic-wave generator mechanism with external damping waves BMSTU Digest. Engineering Part, №4 (81), 2010

УДК 62-231; DOI 10.1872/MMF-2016-26

В.М. Третьяков

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВИЖНОСТЕЙ СЛОЖНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР

Владимир Михайлович Третьяков, д.т.н., профессор
Ковровская государственная технологическая академия
им. В.А. Дегтярева Россия, г. Ковров
Тел.: (49232) 4-20-33, E-mail: tretykov.kovrov@list.ru.

Аннотация

В работе показано, использование матричного метода для определения подвижностей сложных кинематических пар.

Ключевые слова: кинематические пары, матричный метод, развернутая матрица подвижностей, векторизация.

В последнее время вопросам теории кинематических пар уделяется много внимания в работах, прежде всего, отечественных авторов [1 - 13]. Наиболее детально эта теория, разработана в работе [1] Л.Т. Дворникова и докторской диссертации [2] Э.Я. Живаго. В том числе внимание уделяется и многоконтактным кинематическим парам [2]. Далее они называются сложными. Одноконтактные пары считаются простыми. Матричный подход к анализу подвижностей механизмов [8, 9, 10] применим и для анализа подвижностей сложных кинематических пар. Для этого можно использовать матричное уравнение, позволяющее определить подвижности и избыточные связи механизмов [10]:

$$W_O + Q = H_O - W_M - kF\,. \qquad (1)$$

Здесь W_O и Q - матрицы общих подвижностей и избыточных связей механизма; $H_O = \sum_{i=1}^{p} H_i$ – суммарная матрица подвижностей, допускаемых, кинематическими парами; H_i – матрица подвижностей i-ой кинематической пары; p - число кинематических пар в механизме; $W_M = \sum_{j=1}^{n} W_{Mj}$ – суммарная матрица местных подвижностей звеньев; W_{ij} - матрица местных подвижностей j-го звена; n - число подвижных звеньев в механизме; F – единичная матрица свободного замыкания контура; $k = p - n$ – число независимых контуров в механизме.

Состав матриц, входящих в уравнение (1), приведен ниже:

$$H_i=\begin{pmatrix} t_x & r_x \\ t_y & r_y \\ t_z & r_z \end{pmatrix};W_O=\begin{pmatrix} w_o^{tx} & w_o^{rx} \\ w_o^{ty} & w_o^{ry} \\ w_o^{tz} & w_o^{rz} \end{pmatrix};W_{Mj}=\begin{pmatrix} w_M^{tx} & w_M^{rx} \\ w_M^{ty} & w_M^{ry} \\ w_M^{tz} & w_M^{rz} \end{pmatrix};Q=\begin{pmatrix} q^{tx} & q^{rx} \\ q^{ty} & q^{ry} \\ q^{tz} & q^{rz} \end{pmatrix};F=\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Здесь: t_x, t_y, t_z – переменные, показывающие число поступательных движений (подвижностей) вдоль осей X, Y, Z; r_x, r_y, r_z – переменные, показывающие число вращательных движений вокруг осей X, Y, Z. Остальные обозначения раскрыты в [13].

Число простых кинематических пар, входящих в состав сложной, определяется числом отдельных элементов контакта, образованных звеньями. Обозначим a - общее число простых кинематических пар сложной кинематической пары. Подвижным считаем одно из двух соединяемых звеньев, поэтому $n=1$. Число независимых контуров k, создаваемых простыми кинематическими парами, $k=a-1$. Общие подвижности отсутствуют $W_O=0$. Полученная из (1) матрица местной подвижности одного из звеньев, образующих кинематическую пару, и будет ее матрицей подвижности $H=W_M$:

$$H+Q=H_O-(a-1)F\,. \quad (3)$$

С помощью этой формулы можно провести последовательный анализ всех независимых замкнутых контуров кинематической пары также как и для механизма [10]. При исследовании одного независимого контура $a=2$. Подвижности, использованные в формуле (3), должны быть заданы в системе координат сложной кинематической пары (общей системе координат). Несовпадение направлений осей местных систем координат простых кинематических пар с осями общей системы учтем матрицами преобразования координат T_x, T_y, T_z.

$$T_x=\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix},\ T_y=\begin{vmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{vmatrix},\ T_z=\begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

здесь φ, ψ, θ – обозначения углов поворота общей системы координат относительно осей местной системы простой кинематической пары до их совмещения. Положительными считаются углы поворота направленные против часовой стрелки.

Обычный состав компонентов матрицы подвижностей H_i, приведенный в (2), не позволяет учесть разные направления осей систем координат с помощью матриц преобразования (4). Для этого предлагается использовать *развернутую матрицу подвижностей* H^{xyz}. Каждый единичный элемент (а значит и соответствующую ему подвижность)

матрицы вида (2) будем считать единичным вектором, направленным вдоль положительного направления соответствующей оси координат. В развернутой матрице каждому такому единичному вектору отводится отдельный столбец, в строках которого располагаются три его проекции на оси координат системы $OXYZ$, в которой рассматривается кинематическая пара. *Развернутая матрица подвижностей* имеет вид: $H^{xyz} = \begin{pmatrix} t_x\ t_{yx}\ t_{zx}\ r_x\ r_{yx}\ r_{zx} \\ t_{xy}\ t_y\ t_{zy}\ r_{xy}\ r_y\ r_{zy} \\ t_{xz}\ t_{yz}\ t_z\ r_{xz}\ r_{yz}\ r_z \end{pmatrix}$, где $t_x = t_{xx}$, t_{xy}, t_{xz} – проекции поступательной подвижности вдоль оси X на оси X, Y, Z; $r_x = r_{xx}$, r_{xy}, r_{xz} – проекции вращательной подвижности вокруг оси X на оси X, Y, Z; t_{yx}, $t_y = t_{yy}$, t_{yz} – проекции поступательной подвижности вдоль оси Y на оси X, Y, Z; r_{yx}, $r_y = r_{yy}$, r_{yz} – проекции вращательной подвижности вокруг оси Y на оси X, Y, Z; t_{zx}, t_{zy}, $t_z = t_{zz}$ – проекции поступательной подвижности вдоль оси Z на оси X, Y, Z; r_{zx}, r_{zy}, $r_z = r_{zz}$ – проекции вращательной подвижности вокруг оси Z, на оси X, Y, Z.

Если элементы развернутой матрицы заданы в одной и той же системе координат, то при ее сворачивании первый столбец обычной матрицы будет равен сумме первых трех столбцов развернутой, а второй – сумме трех последних:

$$H^{xyz} = \begin{pmatrix} t_x\ t_{yx}\ t_{zx}\ r_x\ r_{yx}\ r_{zx} \\ t_{xy}\ t_y\ t_{zy}\ r_{xy}\ r_y\ r_{zy} \\ t_{xz}\ t_{yz}\ t_z\ r_{xz}\ r_{yz}\ r_z \end{pmatrix} \rightarrow H = \begin{pmatrix} t_x + t_{yx} + t_{zx} & r_x + r_{yx} + r_{zx} \\ t_{xy} + t_y + t_{yz} & r_{xy} + r_y + r_{zy} \\ t_{xz} + t_{yz} + t_z & r_{xz} + r_{yz} + r_z \end{pmatrix}.$$

При работе с развернутыми матрицами допускается замена отсутствующих поступательных подвижностей вращательными. Дополнительно используется взаимозаменяемость поступательных (вращательных) подвижностей, имеющих проекции на одну и ту же ось. Например, вместо t_{yx} можно использовать t_{zx} и наоборот. В таблице стрелками показаны возможные замены поступательных подвижностей вращательными, а единицами взаимозаменяемость подвижностей одного вида.

Рассмотрим возможный вариант использования развернутых матриц подвижностей для анализа относительных движений звеньев в сложных кинематических парах.

В общей системе координат $OX_0Y_0Z_0$ сложной кинематической пары развернутая матрица подвижности H_{i0}^{xyz} $i-$ой простой кинематической пары определяется по формуле:

$$H_{i0}^{xyz} = T_x^{-1} T_y^{-1} T_z^{-1} H_i^{xyz}. \qquad (5)$$

Здесь H_i^{xyz} развернутая матрица подвижности простой кинематической пары, заданная в ее местной системе координат.

Таблица замены и взаимозаменяемости подвижностей

	t_{xx}	t_{xy}	t_{xz}	t_{yx}	t_{yy}	t_{yz}	t_{zx}	t_{zy}	t_{zz}	r_{xx}	r_{xy}	r_{xz}	r_{yx}	r_{yy}	r_{yz}	r_{zx}	r_{zy}	r_{zz}
t_{xx}	1			1			1											
t_{xy}		1			1			1										
t_{xz}			1			1			1									
t_{yx}	1			1			1											
t_{yy}		1			1			1										
t_{yz}			1			1			1									
t_{zx}	1			1			1											
t_{zy}		1			1			1										
t_{zz}			1			1			1									
r_{xx}		↑	↑		↑	↑		↑	↑	1			1			1		
r_{xy}	↑		↑	↑		↑	↑		↑		1			1			1	
r_{xz}	↑	↑		↑	↑		↑	↑				1			1			1
r_{yx}		↑	↑		↑	↑		↑	↑	1			1			1		
r_{yy}	↑		↑	↑		↑	↑		↑		1			1			1	
r_{yz}	↑	↑		↑	↑		↑	↑				1			1			1
r_{zx}		↑	↑		↑	↑		↑	↑	1			1			1		
r_{zy}	↑		↑	↑		↑	↑		↑		1			1			1	
r_{zz}	↑	↑		↑	↑		↑	↑				1			1			1

Полученная по формуле (5) матрица подвижности не может напрямую использоваться для определения подвижностей сложной кинематической пары. Это связано с тем, что в новой системе координат сумма элементов одного столбца развернутой матрицы подвижностей простой кинематической пары не будет равна единице. Возможно появление отрицательных элементов, которые при матричном анализе подвижностей показывают наличие избыточных связей.

Для преодоления указанных трудностей в матрице, полученной с помощью выражения (5), в качестве элементов используются не просто проекции подвижностей на оси координат, а квадраты этих проекций. В результате исчезают отрицательные элементы, а сумма элементов любого столбца матрицы будет равна единице или нулю. Осуществить данное преобразование удобно с помощью оператора векторизации массива [14]:

$$H_{i0}^{xyz} = \overrightarrow{(T_x^{-1}T_y^{-1}T_z^{-1}H_i^{xyz})(T_x^{-1}T_y^{-1}T_z^{-1}H_i^{xyz})}. \qquad (6)$$

Осуществленная замена не скажется на определении относительных подвижностей звеньев, так как при этом учитывается не величина проекции подвижности на какую-либо ось, а лишь ее наличие или отсутствие.

Рассмотрим двухконтактную кинематическую пару (рис. 1). Ее образуют две простые кинематические пары первого класса.

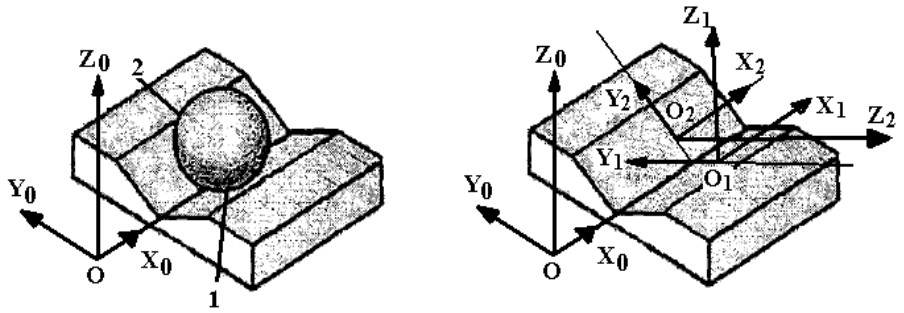


Рис. 1. Двухконтактная кинематическая пара

Их матрицы подвижностей будут иметь вид.

Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$	Система координат $O_2X_2Y_2Z_2$
Обычные и развернутые матрицы подвижностей 1-ой простой кинематической пары $H_1=\begin{pmatrix}1&1\\1&1\\0&1\end{pmatrix}\rightarrow H_1^{xyz}=\begin{pmatrix}100100\\010010\\000001\end{pmatrix}.$	Обычные и развернутые матрицы подвижностей 2-ой простой кинематической пары $H_2=\begin{pmatrix}1&1\\1&1\\0&1\end{pmatrix}\rightarrow H_2^{xyz}=\begin{pmatrix}100100\\010010\\000001\end{pmatrix}.$

Углы поворота общей системы координат $OX_0Y_0Z_0$, переводящие ее в первую систему $O_1X_1Y_1Z_1$, равны $\varphi_1=320^\circ$, $\psi_1=0$, $\theta_1=0$, во вторую - $\varphi_2=55^\circ$, $\psi_2=0$, $\theta_2=0$. По формуле (6) получаем векторизованные развернутые матрицы подвижностей простых кинематических пар.

Общая система координат $OX_0Y_0Z_0$		
Векторизованная развернутая матрица подвижностей 1-ой простой кинематической пары $H_{10}^{xyz}=\begin{pmatrix}1&0&0&1&0&0\\0&0{,}587&0&0&0{,}587&0{,}413\\0&0{,}413&0&0&0{,}413&0{,}587\end{pmatrix}.$	Векторизованная развернутая матрица подвижностей 2-ой простой кинематической пары $H_{20}^{xyz}=\begin{pmatrix}1&0&0&1&0&0\\0&0{,}329&0&0&0{,}329&0{,}671\\0&0{,}671&0&0&0{,}671&0{,}329\end{pmatrix}.$	(7)

Использовав (3), получим формулу для определения матрицы подвижностей сложной кинематической пары:

$$H+Q=H_{10}^{xyz}+H_{20}^{xyz}-F_0, \qquad (8)$$

где $F_0 = \begin{pmatrix} 100100 \\ 010010 \\ 001001 \end{pmatrix}$ развернутая единичная матрица свободного замыкания контура, заданная в общей системе координат.

Для определения матрицы подвижностей сложной кинематической пары сначала найдем суммарную матрицу подвижностей простых кинематических пар $H_{10}^{xyz} + H_{20}^{xyz}$, которую представим в виде таблицы. В ней одному столбцу матрицы соответствуют два смежных столбца одного цвета. С учетом данных, приведенных в (7), таблица будет иметь вид:

t_{xx10}	$+t_{xx20}$	t_{yx10}	$+t_{yx20}$	t_{zx10}	$+t_{zx20}$	r_{xx10}	$+r_{xx20}$	r_{yx10}	$+r_{yx20}$	r_{zx10}	$+r_{zx20}$
1	+1	0	+0	0	+0	1	+1	0	+0	0	+0
t_{xy10}	$+t_{xy20}$	t_{yy10}	$+t_{yy20}$	t_{zy10}	$+t_{zy20}$	r_{xy10}	$+r_{xy20}$	r_{yy10}	$+r_{yy20}$	r_{zy10}	$+r_{zy20}$
0	+0	0,587	+0,329	0	+0	0	+0	0,587	+0,329	0,413	+0,671
t_{xz10}	$+t_{xz20}$	t_{yz10}	$+t_{yz20}$	t_{zz10}	$+t_{zz20}$	r_{xz10}	$+r_{xz20}$	r_{yz10}	$+r_{yz20}$	r_{zz10}	$+r_{zz20}$
0	+0	0,413	+0,671	0	+0	0	+0	0,413	+0,671	0,587	+0,329

Вычтем из нее единичную матрицу F_0, что добавит еще шесть столбцов в полученную таблицу:

t_{xx10}	$+t_{xx20}$	f_{tx}	t_{yx10}	$+t_{yx20}$	f_{ty}	t_{zx10}	$+t_{zx20}$	f_{tz}	r_{xx10}	$+r_{xx20}$	f_{rx}	r_{yx10}	$+r_{yx20}$	f_{ry}	r_{zx10}	$+r_{zx20}$	f_{rz}
1	+1	- 1	0	+0	- 0	0	+0	- 0	1	+1	- 1	0	+0	- 0	0	+0	- 0
t_{xy10}	$+t_{xy20}$		t_{yy10}	$+t_{yy20}$		t_{zy10}	$+t_{zy20}$		r_{xy10}	$+r_{xy20}$		r_{yy10}	$+r_{yy20}$		r_{zy10}	$+r_{zy20}$	
0	+0	- 0	0,587	+0,329	- 1	0	+0	- 0	0	+0	- 0	0,587	+0,329	- 1	0,413	+0,671	- 0
t_{xz10}	$+t_{xz20}$		t_{yz10}	$+t_{yz20}$		t_{zz10}	$+t_{zz20}$		r_{xz10}	$+r_{xz20}$		r_{yz10}	$+r_{yz20}$		r_{zz10}	$+r_{zz20}$	
0	+0	- 0	0,413	+0,671	- 0	0	+0	- 1	0	+0	- 0	0,413	+0,671	- 0	0,587	+0,329	- 1

Далее используем взаимозаменяемость подвижностей для обеспечения свободного замыкания контура. Отсутствует поступательное движение вдоль оси Z. Об этом говорят нули в седьмом и восьмом столбцах с элементами t_{zi}. Для свободного замыкания контура вдоль оси Z ($f_{tz} = -1$) используем подвижность t_{yz}. Применим компонент t_{yz20}, который больше чем t_{yz10}. При этой замене необходимо обнулить в пятом столбце таблицы все компоненты t_{yx20}, t_{yy20}, t_{yz20}, которые являются проекциями на оси координат использованной подвижности второй простой кинематической пары. Из ячеек второй строки второго и одиннадцатого столбцов вычитаем единицы правых ячеек третьего и двенадцатого столбцов, что дает нули. Требуемое для свободного замыкания контура поступательное движение вдоль оси Y ($f_{ty} = -1$) получим, использовав подвижность t_{yy10}. Эта замена также приводит к обнулению компонентов t_{yx10}, t_{yy10}, t_{yz10} четвертого столбца. Необходимое для замыкания контура вращательное движение вокруг оси Y ($f_{ry} = -1$) получим за счет подвижности r_{yy10}, которая больше чем r_{yy20}. Соответственно обнуляются

компоненты r_{yx10}, r_{yy10}, r_{yz10} тринадцатого столбца. Для обеспечения вращательного движения вокруг оси Z ($f_{rz}=-1$) используем подвижность r_{zz10}. Все компонентов r_{zx10}, r_{zy10}, r_{zz10} шестнадцатого столбца обнуляются. В результате проведенных преобразований и отбрасывания столбцов, относящихся к единичной матрице F_0, таблица будет иметь вид.

t_{xx10}	$+t_{xx20}$	t_{yx10}	$+t_{yx20}$	t_{zx10}	$+t_{zx20}$	r_{xx10}	$+r_{xx20}$	r_{yx10}	$+r_{yx20}$	r_{zx10}	$+r_{zx20}$
1	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	1	+ 0	0	+ 0	0	+ 0
t_{xy10}	$+t_{xy20}$	t_{yy10}	$+t_{yy20}$	t_{zy10}	$+t_{zy20}$	r_{xy10}	$+r_{xy20}$	r_{yy10}	$+r_{yy20}$	r_{zy10}	$+r_{zy20}$
0	+ 0	0	+0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0,329	0	+ 0,671
t_{xz10}	$+t_{xz20}$	t_{yz10}	$+t_{yz20}$	t_{zz10}	$+t_{zz20}$	r_{xz10}	$+r_{xz20}$	r_{yz10}	$+r_{yz20}$	r_{zz10}	$+r_{zz20}$
0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0,671	0	+ 0,329

В столбцах, содержащих несколько ненулевых компонентов, заменяем бóльшие значения на единицу, обнуляя остальные ячейки. Получаем таблицу, содержащую нули и единицы. Если в одной строке получается несколько единиц (несколько подвижностей одного вида, например, вращательных), а в других строках нули, то необходимо в одном из столбцов, содержащих несколько ненулевых элементов, заменить единицей другой ненулевой элемент. В матрице кинематической пары не должно быть элементов больших единицы. В итоге получаем таблицу.

t_{xx10}	$+t_{xx20}$	t_{yx10}	$+t_{yx20}$	t_{zx10}	$+t_{zx20}$	r_{xx10}	$+r_{xx20}$	r_{yx10}	$+r_{yx20}$	r_{zx10}	$+r_{zx20}$
1	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	1	+ 0	0	+ 0	0	+ 0
t_{xy10}	$+t_{xy20}$	t_{yy10}	$+t_{yy20}$	t_{zy10}	$+t_{zy20}$	r_{xy10}	$+r_{xy20}$	r_{yy10}	$+r_{yy20}$	r_{zy10}	$+r_{zy20}$
0	+ 0	0	+0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 1
t_{xz10}	$+t_{xz20}$	t_{yz10}	$+t_{yz20}$	t_{zz10}	$+t_{zz20}$	r_{xz10}	$+r_{xz20}$	r_{yz10}	$+r_{yz20}$	r_{zz10}	$+r_{zz20}$
0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 0	0	+ 1	0	+ 0

Суммируя смежные столбцы одного цвета, получаем развернутую матрицу: $H+Q=\begin{pmatrix}1&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&1\\0&0&0&0&1&0\end{pmatrix}$. Свернув ее, найдем искомую матрицу подвижностей сложной кинематической пары $H=\begin{pmatrix}1&1\\0&1\\0&1\end{pmatrix}$.

При формировании матрицы сложной кинематической пары использовались следующие правила:

1. Одна подвижность простой кинематической пары используется только один раз: на замыкание контура или как подвижность сложной пары.

2. Единицей заменяется тот элемент столбца, который имеет значение отличное от нуля, причем желательно наибольшее.

3. Для сложной кинематической пары число ее подвижностей каждого вида не должно превышать единицу.

4. Для замены каких-либо недостающих подвижностей, прежде всего, используются подвижности того же вида, а также возможна замена поступательных подвижностей вращательными.

В качестве второго примера рассмотрим двухконтактную кинематическую пару (рис. 2), включающую два звена – плоскость 1 и параллелепипед 2. Каждое из них снабжено конусообразными выступами 3 и 4. Контакт звеньев происходит по образующим конусообразных выступов, причем конусообразные выступы выполнены с различными углами конусности (Патент RU 2137964).

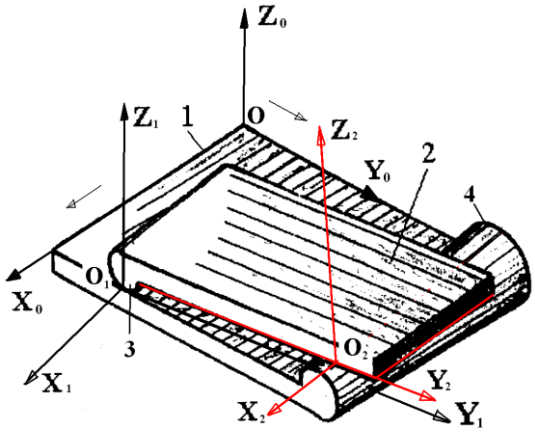


Рис. 2. Двухконтактная сложная кинематическая пара

Выберем для каждой простой кинематической пары свою местную систему координат. Для первой ось X_1 идет вдоль узла сопряжения звена 1 (он представляет собой отрезок прямой), возникшего при контакте выступа 3 и плоскости звена 1, на которой также расположена ось Y_1. Ось Z_1 перпендикулярна осям X_1 и Y_1. Для второй простой кинематической пары оси X_2 и Y_2 лежат на плоскости параллелепипеда 2, которой он взаимодействует с выступом 4 звена 1. Ось X_2 идет вдоль узла сопряжения (он представляет собой отрезок прямой), возникшего при контакте выступа 4 звена 1 и нижней плоскости звена 2. Подвижности кинематических пар одинаковы и в своих местных системах координат описываются одинаковыми матрицами.

Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$	Система координат $O_2X_2Y_2Z_2$
Обычные и развернутые матрицы подвижностей 1-ой простой кинематической пары $H_1=\begin{pmatrix}1&1\\1&0\\0&1\end{pmatrix}\rightarrow H_1^{xyz}=\begin{pmatrix}100100\\010000\\000001\end{pmatrix}.$	Обычные и развернутые матрицы подвижностей 2-ой простой кинематической пары $H_2=\begin{pmatrix}1&1\\1&0\\0&1\end{pmatrix}\rightarrow H_2^{xyz}=\begin{pmatrix}100100\\010000\\000001\end{pmatrix}.$

В качестве общей системы координат примем систему $OX_0Y_0Z_0$. Оси X_0 и Y_0 лежат в одной плоскости с осями X_1 и Y_1, а плоскость OX_0Z_0 параллельна оси O_2X_2. Углы поворота общей системы координат $OX_0Y_0Z_0$ относительно первой системы $\varphi_1 = 0°$, $\psi_1 = 0°$, $\theta_1 = 50°$, второй - $\varphi_2 = 0°$, $\psi_2 = 20°$, $\theta_2 = 40°$. В общей системе координат векторизованные развернутые матрицы простых кинематических пар будут иметь вид:

Общая система координат $OX_0Y_0Z_0$	
Векторизованная развернутая матрица подвижностей 1-ой простой кинематической пары	Векторизованная развернутая матрица подвижностей 2-ой простой кинематической пары
$H_{10}^{xyz} = \begin{pmatrix} 0{,}413 & 0{,}587 & 0 & 0{,}413 & 0 & 0 \\ 0{,}587 & 0{,}413 & 0 & 0{,}587 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.	$H_{20}^{xyz} = \begin{pmatrix} 0{,}518 & 0{,}365 & 0 & 0{,}518 & 0 & 0{,}117 \\ 0{,}413 & 0{,}518 & 0 & 0{,}413 & 0 & 0 \\ 0{,}069 & 0{,}048 & 0 & 0{,}069 & 0 & 0{,}883 \end{pmatrix}$.

Найдем матрицу подвижностей сложной пары по формуле (8):

$$H + Q = (H_{10}^{xyz} + H_{20}^{xyz}) - F_0 = \begin{pmatrix} 0{,}931 & 0{,}952 & 0 & 0{,}931 & 0 & 0{,}117 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0{,}069 & 0{,}048 & 0 & 0{,}069 & 0 & 1{,}883 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$H + Q = \begin{pmatrix} 0 & 0{,}952 & 0 & 0 & 0 & 0{,}117 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0{,}048 & -1 & 0 & 0 & 0{,}883 \end{pmatrix}.$$

При сворачивании развернутой матрицы сложной кинематической пары возможны два варианта обычной матрицы подвижностей. Первый вариант:

$$H + Q = \begin{pmatrix} 0 & 0{,}952 & 0 & 0 & 0 & 0{,}117 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0{,}048 & -1 & 0 & 0 & 0{,}883 \end{pmatrix} \to H = \begin{pmatrix} 1 & 0{,}117 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0{,}883 \end{pmatrix} \to H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Отрицательный элемент в третьей строке первого столбца свернутой матрицы показывает, что не хватает поступательной подвижности вдоль оси Z_0. Имеющаяся проекция на ось X_0 вращательного движения вокруг оси Z_2 позволяет заменить отсутствующую поступательную подвижность вращением вокруг оси X_0. Откуда следует, что сформированная сложная кинематическая пара избыточных связей не имеет и допускает две поступательные подвижности вдоль осей X_0 и Y_0. Замена отсутствующего поступательного перемещения вдоль оси Z_0 вращательным означает, что одновременно с поступательным движением будет происходить и вращение. Это движение будет зависимым от поступательных движений.

При втором варианте используется замена отсутствующей подвижности $t_{zz} = -1$ на $t_{yz} = 0{,}048$ (9). В итоге получим $H = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Реально вращение звена 2 будет происходить вокруг оси не совпадающей с осью Z_0.

Вывод.

Матричный метод анализа подвижностей и избыточных связей механизмов позволяет определить относительные подвижности звеньев, допускаемые сложными кинематическими парами. Для этого используются развернутые матрицы подвижностей и поэлементный анализ подвижностей простых кинематических пар при отборе движений для свободного замыкания контуров в процессе определения матрицы подвижностей сложной кинематической пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. – Новокузнецк: Изд-во СибГГМА, 1994. – 102 с.
2. Живаго Э.Я. Теория и систематизация кинематических пар механических систем: дисс. … докт. техн. наук. / Живаго Э.Я. – Новосибирск, 2000. – 261 с.
3. Дворников Л.Т. Основы теории геометрических связей (кинематических пар) механических систем // Теория Механизмов и Машин. - 2014. - Том 12. - №2(24). - С. 25-49
4. Артоболевский И.И. Теория механизмов: Учеб. для втузов. – М.: Наука, 1965.-776 с.
5. Kandikjan T., Dukovski V. Assembly model with integrated kinematic context // Proceedings of the 9th World Congress on the IFToMM, Milano, 1995. P. 2976-2980.
6. Shigley J.E., Uicker J.J. Theory of machines and mechanisms. Second Edition. McGraw-HILL BOOK COMPANY. 1995. p. 719.
7. Арутюнов С.С. О структуре и классификации кинематических пар // Тр. Груз. политех. ин-та. 1959. № 2. С.43-62.
8. Соломин В.В. Новый метод выбора рациональных структурных схем механизмов // Известия вузов. Машиностроение. – 1967. - №8.
9. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник - М.: Машиностроение, 1979. -343 с., ил. – (Б-ка конструктора).
10. Третьяков В.М. Матричный метод определения избыточных связей и подвижностей в механизмах // Известия вузов. Машиностроение. – 1996. - №10-12. - С.3-8.
11. Третьяков В.М. Конструирование семейств изделий машиностроения. Монография: [в 2 ч]. / В.М. Третьяков; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное

учреждение высшего проф. образования «Ковровская гос. Технологическая акад. им. В. А. Дегтярева». Ковров, 2009.
12. Теория механизмов и машин: методические указания к выполнению лабораторных работ / сост. В.М. Третьяков; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования «Ковровская гос. Технологическая акад. им. В. А. Дегтярева». Ковров, 2010. – 68 с.
13. Третьяков В.М. Формирование простых кинематических пар на основе узла сопряжения «точка» // Теория механизмов и машин. - 2015. - Т. 13. - № 26. - С. 46-61.
14. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. - Спб.: БХВ – Петербург, 2007. – 704 с.: ил.

V.M. Tretyakov

APPLICATION OF A MATRIX METHOD FOR DETERMINING OF DEGREES OF FREEDOM OF COMPLEX KINEMATIC PAIRS

V. A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy, Russia.

Abstract

The paper is devoted to the use of a matrix method for determining of relative motions of links and redundant constraints of complex kinematic pairs. Extended mobilities matrices have been used for this purpose.

Key words: kinematic pairs, matrix method, extended mobilities matrice, vectorize operator.

REFERENCES

[1] Dvornikov L.T. The beginning of the theory of structures mechanisms. Novokuznetsk: Pub. SibSIU, 1994. 102 p. (rus.)
[2] Zhivago E.Ya. Theory and systematization of kinematic pairs of mechanical systems: Diss. ... doct. of techn. of sciences. Zhivago Eduard Yakovlevich. Novosibirsk, 2000. 261 p. (rus.)
[3] Dvornikov L.T. Fundamentals of the theory of geometric relations (kinematic pairs) mechanical systems // Theory of Mechanisms and Machines. - 2014. - Tom 12. - № 2(24). - p. 25-49. (rus.)
[4] Artobolevskii I.I. Theory of mechanisms. The science, Moscow, 1965. (rus.)
[5] Kandikjan T., Dukovski V. Assembly model with integrated kinematic context // Proceedings of the 9th World Congress on the IFToMM, Milano, 1995. P. 2976-2980.
[6] Shigley J.E., Uicker J.J. Theory of machines and mechanisms. Second edition. McGraw-HILL BOOK COMPANY. 1995. p.717.

[7] Arutiynov S.S. About structure and classification of kinematic pairs. - Works. Georg. polytech. Institute, 1959, № 2, p. 43-62. (rus.)
[8] Solomin V.V. A new method of selection of rational structural diagrams mechanisms // Proceedings of the higher educational institutions. Engineering. – 1967. - №8.(rus.)
[9] Reshetov L.N. Aligning mechanisms . Directory - M.: Engineering, 1979. - 343 P., il. – (Design Library). (rus.)
[10] Tretyakov V.M. Matrix method of definition of redundant constraints and mobility in mechanisms // Proceedings of the higher educational institutions. Engineering. - 1996. - №10-12. - p.3-8. (rus.)
[11] Tretyakov V.M. Designing of families of products of mechanical engineering. Monography [in 2 parts] / V.M. Tretyakov. Kovrov. FAE SEI HE «V. A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy», 2009. (rus.)
[12] Mechanisms and machines theory: Methodical instructions to performance of laboratory works / composer. V.M. Tretyakov. Kovrov. FAE SEI HE «V. A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy», 2010 –68 p. (rus.)
[13] Tretyakov V.M. Formation of simple kinematic pairs on the basis of an interface node “point” // Theory of Mechanisms and Machines. - 2015. - Vol. 13. - №2. - P. 46-61. (rus.)
[14] Kiriynov D.V. Mathcad 14. - Spb.: BHV – Peterburg, 2007. – p.704. (rus.)

УДК 539.3:534.1 ; DOI 10.1872/MMF-2016-27

Г.В. Филиппенко

ЭНЕРГИЯ ВОЛН ИЗГИБНОГО ТИПА В БЕСКОНЕЧНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ, ЗАПОЛНЕННОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Георгий Викторович Филиппенко, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Институт проблем машиноведения РАН,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)3214763, E-mail: g.filippenko@gmail.com
Санкт-Петербургский государственный университет, 7-9,
Университетская наб., 199034, E-mail: g.filippenko@spbu.ru

Аннотация

В работе рассмотрены совместные колебания бесконечной тонкой пустой цилиндрической оболочки и идеальной акустической жидкости полностью ее заполняющей. Рассматривается задача о свободных колебаниях оболочки. Находятся распространяющиеся волны и потоки энергии в системе оболочка-жидкость. Проведено сравнение вкладов в общий поток энергии различных механизмов передачи энергии по оболочке, а также вклада энергии, распространяющейся по жидкости.

Ключевые слова: распространение волн, цилиндрическая оболочка, поверхностная волна, колебания оболочек, локальные и интегральные потоки энергии

Введение и постановка задачи

Цилиндрические оболочки в жидкости давно исследуются в связи с богатыми приложениями в технике и строительстве. Это один из важнейших элементов при моделировании акустических волноводов, различных трубопроводов, опор морских буровых установок и других гидротехнических сооружений. Жидкость вносит существенные изменения в поведение оболочки. Поэтому большое внимание уделяется анализу взаимодействия в системе оболочка – жидкость [1] – [13].

В данной работе описываются волны как распространяющиеся по оболочке, так и волны в жидкости. Рассматриваются совокупные волновые процессы (в жидкости и оболочке) изгибного типа. Эти колебания возбуждаются при неосесимметричном возбуждении [12], зачастую в первую очередь, и поэтому представляют особый интерес. В этом случае вращательные движения оболочки связываются с продольными и изгибными колебаниями. Это приводит к значительному усложнению

взаимодействия между дисперсионными ветками. Анализ возникающих эффектов ведется как в терминах кинематических и динамических переменных, так и в терминах потоков энергии.

Рассматривается стационарный процесс совместных свободных колебаний бесконечно протяженной пустой цилиндрической оболочки и полностью заполняющей её жидкости. Введем цилиндрическую систему координат (r,φ,z), где ось z совпадает с осью цилиндра, и локальную систему координат $(\mathbf{t},\mathbf{n},\mathbf{k})$, где вектора $\mathbf{t},\mathbf{n}$ соответственно касательный и нормальный единичные вектора к оболочке, а вектор $\mathbf{k}$ – единичный вектор вдоль оси z (рис. 1). В качестве переменных, описывающих акустическое и вибрационное поля в системе, выберем акустическое давление в жидкости P и вектор смещений оболочки $\mathbf{u}=(u_t,u_z,u_n)^{\mathrm{T}}$ (T — знак операции транспонирования). Акустическое давление P в жидком пространстве, окружающем оболочку, подчиняется уравнению Гельмгольца

$$(\Delta+k^2)P(r,\varphi,z)=0;\quad k=\frac{\omega}{c},\quad 0<r<R,\quad 0\le\varphi<2\pi.$$

где $k=\omega/c$ — волновое число в жидкости; c — скорость распространения звука в жидкости; ω — частота; R — радиус цилиндрической оболочки. Зависимость всех процессов от времени предполагаем гармонической, а временной фактор $\exp\{-i\omega t\}$ условимся всюду опускать. На границе оболочка – жидкость имеют место безотрывность движения жидкости и цилиндра

$$u_n(\varphi,z)=\frac{1}{\rho_w\omega^2}\frac{\partial P(r,\varphi,z)}{\partial r}\bigg|_{r=R+0};\qquad 0\le\varphi<2\pi,\qquad -\infty<z<+\infty,$$

и баланс сил, действующих на цилиндр [10]

$$\mathbf{Lu}=\frac{R^2}{\rho c_s^2}\left(0,0,P\big|_{r=R+0}\right)^{\mathrm{T}};\qquad 0\le\varphi<2\pi,\qquad -\infty<z<+\infty \tag{1}$$

Граничные условия дополняются условием на бесконечности $z=\pm\infty$ [14]. Рассматриваются однородные волны в системе, бегущие из $z=-\infty$ в $z=+\infty$.

Введем следующие обозначения: ρ_w — плотность жидкости, $c_s=\sqrt{Eh\Big/\left(\left(1-\nu^2\right)\rho\right)}$ — скорость распространения волн деформации срединной поверхности цилиндрической оболочки, E, ν и ρ_s — модуль

Юнга, коэффициент Пуассона и объемная плотность материала оболочки соответственно, h — толщина оболочки, $\rho = \rho_s h$ — её поверхностная плотность. Дополнительно установим безразмерные параметры: толщину цилиндрической оболочки $h^* = h/R$; скорость распространения волн в оболочке $c^* = c_s/c$; частоту $w = \omega R/c_s$; параметр, характеризующий относительную толщину оболочки $\alpha^2 = (1/12)(h/R)^2$. В этих терминах линейный матричный дифференциальный оператор $\mathbf{L}$, фигурирующий в (1), можно записать в виде [11]

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} w^2 + \alpha_1[\nu_- \partial_z{}^2 + \partial_\varphi^2] & \nu_+ \partial_\varphi \partial_z & \partial_\varphi(1 + 2\alpha^2[1 - \partial_\varphi^2 - \partial_z{}^2]) \\ L_{21} & w^2 + \partial_z{}^2 + \nu_- \partial_\varphi^2 & \nu \partial_z \\ L_{31} & L_{32} & w^2 + \alpha^2(2\partial_\varphi^2 - 1 + 2\nu \partial_z{}^2 - [\partial_\varphi^2 + \partial_z{}^2]^2) - 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

где

$$\alpha_1 = 1 + 4\alpha^2, \quad \partial_z = R\partial_z, \quad L_{21} = L_{12}, \quad L_{31} = -L_{13}, \quad L_{32} = -L_{23}, \quad \nu_+ = (1+\nu)/2, \quad \nu_- = (1-\nu)/2$$

Заметим, что в работе используется модель оболочки из [15].

Получение представления для акустического и вибрационного полей

Вибрационные и акустические поля в системе полностью описываются парой $\{\mathbf{u}, P\}$. Учтем, что в соответствии с уравнением неразрывности нормальные смещения u_n оболочки выражаются через давление P. Поэтому независимыми являются только переменные u_t, u_z и P. Тогда уравнение (1) можно представить в виде [8]

$$\mathbf{S}\begin{pmatrix} u_t \\ u_z \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \equiv \mathbf{0}; \quad \mathbf{S} = \mathbf{LM} - \mathbf{N}; \quad \mathbf{N} = \frac{w^2}{\rho\omega^2}\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{\rho_w \omega^2}\dfrac{\partial}{\partial r}\Big|_{r=R+0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) будем искать в виде

$$\begin{pmatrix} u_t \\ u_z \\ P \end{pmatrix} = Ae^{i\lambda z}\begin{pmatrix} \varsigma \sin m\varphi \\ \xi \cos m\varphi \\ \gamma J_m\left(r\sqrt{k^2 - \lambda^2}\right)\cos m\varphi \end{pmatrix} \quad (4)$$

полагая $|\varsigma|^2+|\xi|^2+|\gamma|^2=1$, а $m=1,2,3,\ldots$. Здесь: J_m — функция Бесселя с индексом m; A,ς,ξ,γ — произвольные константы; λ — искомое волновое число. Подставляя (4) в (3), получаем однородную алгебраическую систему вида

$$\mathbf{Sx}=\mathbf{0}, \tag{5}$$

где вектор $\mathbf{x}\equiv(\varsigma,\xi,\gamma)^{\mathrm{T}}$, а матрица $\mathbf{S}$ есть образ Фурье оператора $\mathbf{S}$. Условие существования нетривиального решения этой системы приводит к дисперсионному уравнению $\det\mathbf{S}=0$. В статье рассматривается свободный стационарный режим распространения волн в жидкости и оболочке, поэтому далее для заданной частоты w находятся только вещественные положительные корни λ этого уравнения. Заметим, что при $\lambda>k$ функции Бесселя переходят в модифицированные функции Бесселя $I_m\left(r\sqrt{\lambda^2-k^2}\right)$. После подстановки такого корня в систему (5) находим собственный вектор $\mathbf{x}$ и, следовательно, вид акустического и вибрационного полей в системе.

После этого можно найти потоки энергии в системе оболочка – жидкость [11]. Воспользуемся выражением для интегрального вектора потока энергии в жидкости. В случае вещественного λ он имеет единственную ненулевую компоненту, направленную вдоль оси z и вычисляемую по формуле

$$\Upsilon_{liq}=\frac{\omega}{2}\frac{1}{\rho_w\omega^2}\int_0^{2\pi}d\varphi\int_R^{+\infty}\mathrm{Im}\left(\overline{P}\frac{\partial P}{\partial z}\right)rdr\,. \tag{6}$$

Рассмотрим также интегральный поток в оболочке — поток через сечение цилиндрической оболочки плоскостью, перпендикулярной образующей [8]. Единственная его ненулевая компонента (именно эту компоненту будем, для краткости изложения, называть далее потоком энергии в оболочке) имеет вид

$$\Upsilon_{cyl}=\frac{\omega}{2}\int_0^{2\pi}\mathrm{Im}\left(\mathbf{f}^4,\mathbf{u}^4\right)_{\square^4}Rd\varphi;\quad \mathbf{u}^4=\left(u_t,u_z,u_n,-\partial_z u_n\right)^{\mathrm{T}},\quad \mathbf{f}^4=\mathbf{F}\mathbf{u}^4=\left(f_t,f_z,f_n,f_p\right)^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\mathbf{F}=\frac{\rho c^2}{R}\begin{pmatrix} -\nu_\alpha_1\partial_z & -\nu_\partial_\varphi & 0 & -2\alpha^2(1-\nu)\partial_\varphi \\ -\nu\partial_\varphi & -\partial_z & -\nu & 0 \\ -2\alpha^2\partial_\varphi\partial_z & 0 & 0 & -\alpha^2[(2-\nu)\partial_\varphi^2-\nu+\partial_z{}^2] \\ -2\alpha^2\nu\partial_\varphi & 0 & \alpha^2\nu(\partial_\varphi^2-1) & -\alpha^2\partial_z \end{pmatrix}.$$

Эту компоненту удобно представить в виде суммы, слагаемым которой отвечают вклады составляющих потока энергии. Слагаемым с индексами $j=1,2,3,4$ отвечают составляющие, порождаемые обобщенными силами: тангенциальной (индекс t), продольной (индекс z), нормальной (индекс n) и связанной с обобщенным моментом (индекс m). Преобразуем формулу (7) с учетом сказанного:

$$\Upsilon_{cyl}=\Upsilon_t+\Upsilon_z+\Upsilon_n+\Upsilon_m; \tag{8}$$

$$\begin{Bmatrix}\Upsilon_t\\ \Upsilon_z\\ \Upsilon_n\\ \Upsilon_m\end{Bmatrix}=-\pi R\omega\,\mathrm{Im}\begin{Bmatrix}\left(-\alpha_1\nu_\partial_z u_t-\nu_\partial_\varphi u_z+2\alpha^2(1-\nu)\partial_\varphi\partial_z u_n\right)\overline{u_t}\\ \left(-\nu\partial_\varphi u_t-\partial_z u_z-\nu u_n\right)\overline{u_z}\\ \overline{u_n}\left(-2\alpha^2\partial_\varphi\partial_z u_t+\alpha^2[(2-\nu)\partial_\varphi^2-\nu+\partial_z{}^2]\partial_z u_n\right)\\ \left(-2\alpha^2\nu\partial_\varphi u_t+\alpha^2\nu(\partial_\varphi^2-1)u_z+\alpha^2\partial_z{}^2 u_n\right)(-\partial_z\overline{u_n})\end{Bmatrix}.$$

Формулы (6) - (8) используются для получения относительного потока энергии по оболочке и компонент этого потока $\Pi=\Upsilon_{cyl}/(\Upsilon_{cyl}+\Upsilon_{liq})$, $\Pi^{t,z,n,m}=\Upsilon_{cyl}^{t,z,n,m}/(\Upsilon_{cyl}+\Upsilon_{liq})$. На рисунках соответствующие кривые помечены буквами S,T,Z,N,M. Компоненты векторов обобщенных сил $\mathbf{f}^4$ и смещений $\mathbf{u}^4$ также нормируются на длину соответствующих векторов с сохранением своих обозначений.

Численные результаты

Характер волновых процессов в системе оболочка - жидкость определяется взаимодействием двух волноводов: упругой цилиндрической оболочки как таковой и жидкого волновода, ограниченного стенками оболочки. Взаимодействие между ними определяется преимущественно за счет изгибных колебаний оболочки, поэтому важным обстоятельством является соотношение фазовой скорости волн в волноводе и фазовой скорости изгибных волн в сухой оболочке. Работает известный физический принцип: волна стремится уйти из области с большей скоростью распространения в область с меньшей скоростью, что будет продемонстрировано далее.

При расчете представленных графических зависимостей значения характеристик элементов системы оболочка – жидкость взяты следующие: $\rho = 7800\,\text{кг/м}^3$, $E = 2{,}1\cdot 10^{11}\,\text{Н/м}^2$, $\nu = 0{,}28$, $\rho_w = 1000\,\text{кг/м}^3$, $h^* = 0{,}05$.

На рисунке 2 представлены зависимость безразмерных волновых чисел $\lambda = \lambda R$ от w (в дальнейшем волну над λ будем опускать, т.е. $\lambda := \lambda$). А на рисунке 3, в большем масштабе представлена зависимость $\Lambda = \Lambda(w)$ - отклонение волнового числа λ от безразмерного волнового числа kR для бесконечного жидкого пространства ($\Lambda = \lambda - kR$).

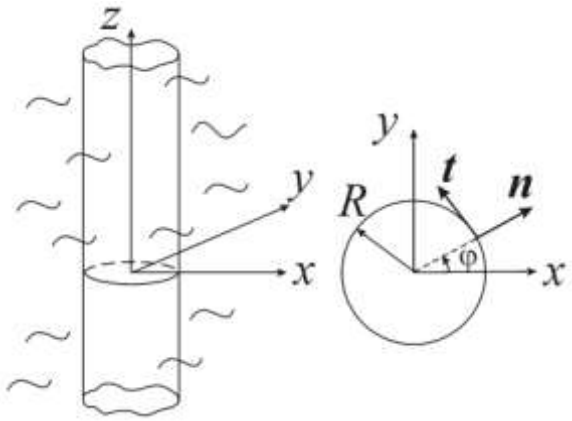


Рис. 1. Физическая модель

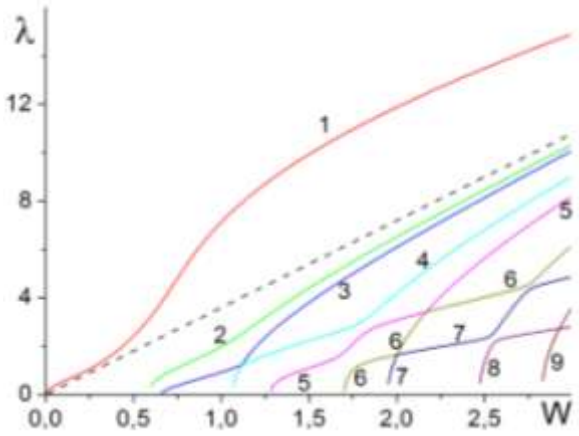


Рис. 2. Дисперсионные кривые: (1-9) для оболочки с жидкостью, штрихом -- для жидкого безграничного пространства.

На обоих рисунках дисперсионные кривые, отвечающие веткам $w_1(\lambda)$, $w_2(\lambda)$, $w_3(\lambda)$, … маркируются цифрами *1,2,3,…* соответственно, а волны, отвечающие этим веткам, так и будем называть «первыми», «вторыми» и т.д. Характерным является наличие точек квазипересечения этих кривых, что соответствует обмену характером колебаний между волнами из соответствующих дисперсионных кривых в окрестности этих точек, что является обычным явлением для случая взаимодействия подсистем одной системы. Заметим, что потоки энергии лучше отслеживают этот эффект, чем кинематические или силовые характеристики, так как учитываются как сами эти величины, так и сдвиги фазы между ними.

Для иллюстрации потоков энергии в системе будут рассмотрены графики двух типов: зависимость нормированного потока энергии по оболочке как функции частоты w (рис. 4), а также компонент этого потока (рис. 5) и компонент векторов обобщенных сил и смещений как функций частоты w (рис. 6).

Вычисления показывают, что в ряде случаев кинематические и силовые факторы «не чувствуют» точек квазипересечения, как, например, в окрестности пересечения штрих-пунктирной кривой (соответствующей дисперсионной ветке изгибной волны сухой оболочки) и веток 2-7 системы

оболочка-жидкость (рис.3). В других случаях эти величины могут давать неточный и противоречивый результат (перестройка силовых и кинематических переменных происходит на различных частотах, причем не соответствующих точке квазипересечения) (рис.6).

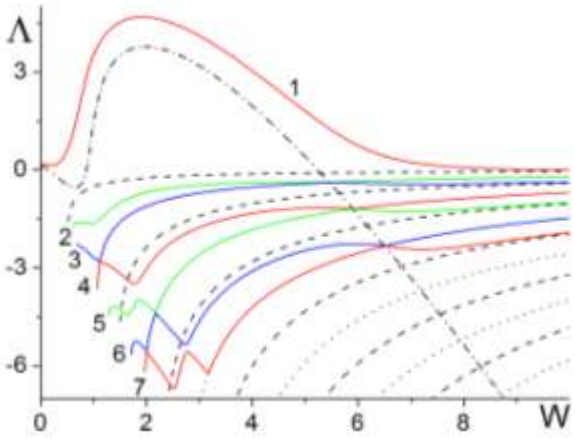


Рис.3 Модифицированные дисперсионные кривые.

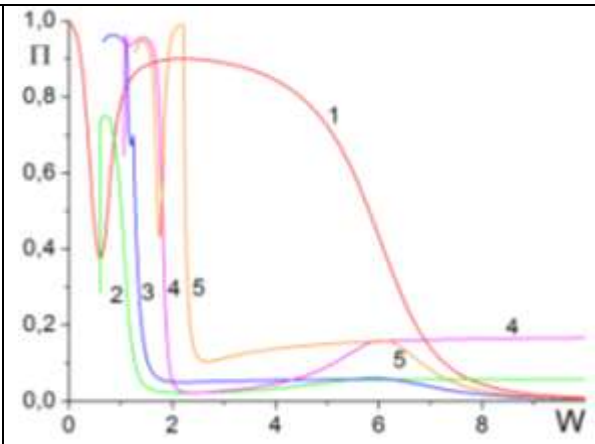


Рис.4 Потоки энергии из дисперсионных кривых 1-5

Упругая стенка является промежуточной между абсолютно жесткой ($u_n(R)=0$) и мягкой ($P(R)=0$) и, в зависимости от соотношения параметров, становится то «жестче», то «мягче». На рисунке 3 штрихом выделены кривые, отвечающие абсолютно жестким граничным условиям, а пунктиром – абсолютно мягким граничным условиям. Они чередуются, что вызвано свойствами нулей функций Бесселя, фигурирующими в соответствующих дисперсионных уравнениях. Дисперсионные же кривые для упругой системы тяготеют (с ростом частоты), то к одним, то к другим, после прохода точек квазипересечения, причем случай «мягкой стенки» реализуется с большей точностью. Это видно из фактического наложения дисперсионных кривых для упругой системы на соответствующие пунктирные кривые. Вызвано это, по-видимому, тем, что для упругой стенки реализовать «мягкий» вариант можно за счет согласованности колебаний поверхностного слоя жидкости и самой оболочки, в то время как случай абсолютно «жесткой» стенки менее физичен.

Если у первой волны в основном диапазоне доминирует изгибная компонента (рис. 5), то у всех волн, начиная со второй, в основном диапазоне доминирует продольная и крутильная компоненты. С ростом частоты, по мере выхода за основной диапазон частот, у всех волн, начиная со второй, меняется характер поля и начинает доминировать изгибная компонента в потоке энергии. А сам поток либо уменьшается до нуля, для варианта стремления к «жесткой стенке», либо (для случая «мягкой стенки») поток несколько растет (после первоначального спада) и затем практически стабилизируется (отмечается незначительный рост) на

больших частотах, причем он становится там тем больше, чем больше номер волны (рис. 4).

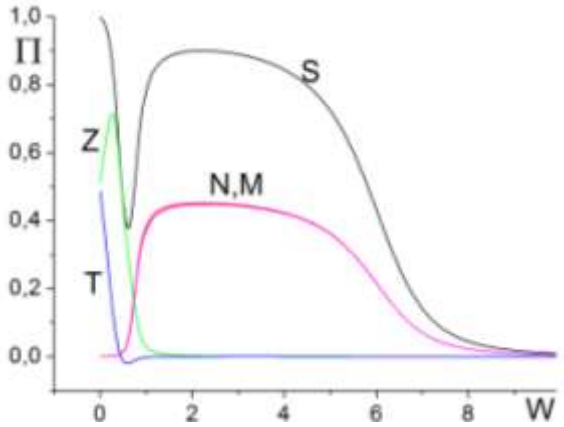


Рис. 5. Компоненты потока энергии в первой волне

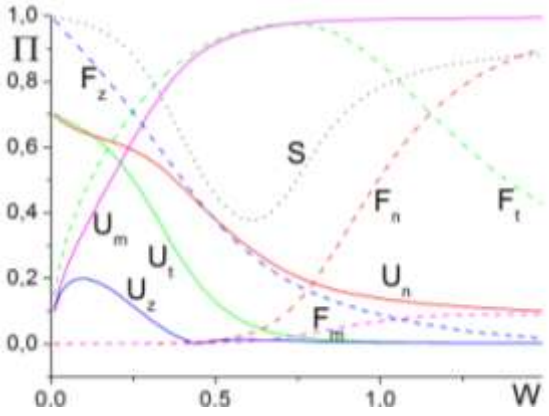


Рис. 6. Поток энергии *S* и компоненты обобщенных векторов смещений и сил в первой волне

Критической частотой, для начала стабилизации является частота, когда фазовая скорость волн становится меньше, чем скорость изгибных волн в сухой оболочке (жидкий волновод постепенно получает все больше преимуществ в плане переноса энергии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. V. Filippenko The vibrations of reservoirs and cylindrical supports of hydro technical constructions partially submerged into the liquid. // Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2014, Editor Alexander Evgrafov, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, ISSN 2195-4356 ISSN 2195-4364 (electronic), Lecture Notes in Mechanical Engineering, ISBN 978-3-319-29578-7 ISBN 978-3-319-29579-4 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-29579-4, Library of Congress Control Number: 2016931213
2. Филиппенко Г.В. Колебания трубопроводов и тонкостенных опор гидротехнических сооружений, погруженных в жидкость // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 769-778. http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2012/769-778.pdf
3. Зиновьева Т. В. Вычислительная механика упругих оболочек вращения в машиностроительных расчетах. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 335-343.
4. Елисеев В.В , Зиновьева Т.В. Нелинейно-упругая деформация подводного трубопровода в процессе укладки // Вычисл. мех. сплош

сред. – 2012. – Т. 5, №1. – С. 70-78
5. Тер-Акопянц Г.Л. Дисперсионные кривые и модальные коэффициенты при распространении волн в оболочке с жидкостью // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6(84). С.77-81
6. Тер-Акопянц Г.Л. Осесимметричные волновые процессы в цилиндрических оболочках, заполненных жидкостью // Естественные и технические науки. – 2015. – № 7 (85) . – С. 10-14.
7. Г.В.Филиппенко. Энергетические аспекты осесимметричного распространения волн в бесконечной цилиндрической оболочке, полностью погруженной в жидкость. // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 2. – С. 187-197.
8. Филиппенко Г.В. Энергетические аспекты распространения волн в бесконечной цилиндрической оболочке, полностью погруженной в жидкость// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 295-305.
9. S.V. Sorokin, J.B. Nielsen, N. Olhoff, Green's matrix and the boundary integral equations method for analysis of vibrations and energy flows in cylindrical shells with and without internal fluid loading, Journal of Sound and Vibration 271 (3–5) (2004) 815–847.
10. Filippenko G.V. Statement of the boundary-contact problems for the shells in acoustics // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2010", St.-Petersburg, Russia, June 8-10, 2010. – P. 57-626.
11. Filippenko G.V. The energy analysis of shell-fluid interaction // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2011", St.-Petersburg, Russia, May 30-June 3, 2011. – P. 63-66.
12. Filippenko G.V. The forced oscillations of the cylindrical shell partially submerged into a layer of liquid // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2012", St.-Petersburg, Russia, May 28-June 1, 2012. – P. 70-75.
13. Cremer, L., Heckl, M., Petersson, Björn A.T. Structure-Borne Sound. Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. 3rd ed. 2005, XII, 607 p. 215 illus.
14. Свешников А. В. Принцип предельного поглощения для волновода. //Доклады Академии Наук СССР 1951, 80, 345–347
15. Елисеев В.В. Механика упругих тел. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.

George V. Filippenko

ENERGY OF BANDING TYPE WAVES IN THE INFINITE CYLINDRICAL SHELL FILLED WITH COMPRESSIBLE LIQUID

Institute of Mechanical Engineering, Vasilievsky Ostrov,
Bolshoy Prospect 61, 199178, St.-Petersburg, Russia
Phone: (812)3214763, e-mail: g.filippenko@gmail.com
Saint Petersburg State University, 7-9, Universitetskaya nab.,
199034, g.filippenko@spbu.ru

Abstract

The problem of joint oscillations of infinite thin cylindrical shell with ideal acoustical fluid entirely filled it is considered. The free vibrations of the system are considered. The propagating waves and energy flux are analyzed in the system shell-liquid. The comparison of different mechanisms of energy transmission in the shell and input of the energy flux in the water is fulfilled.

Key words: propagation of the waves, cylindrical shell, surface wave, vibrations of the shells, local and integral energy fluxes.

REFERENCES

[1] G. V. Filippenko The vibrations of reservoirs and cylindrical supports of hydro technical constructions partially submerged into the liquid. // Selected Contributions from the Conference "Modern Engineering: Science and Education", Saint Petersburg, Russia, June 2014, Editor Alexander Evgrafov, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, ISSN 2195-4356 ISSN 2195-4364 (electronic), Lecture Notes in Mechanical Engineering, ISBN 978-3-319-29578-7 ISBN 978-3-319-29579-4 (eBook), DOI 10.1007/978-3-319-29579-4, Library of Congress Control Number: 2016931213

[2] G.V. Filippenko. The vibrations of pipelines and thin walled supports of hydro technical constructions partially submerged into the liquid. // Modern Engineering: Science and Education. Proceedings of Second International scientific and practical conference – SPb.: Published by State Polytechnic University, 2012. – P. 769-778.

[3] T.V. Zinovieva. Computational mechanics of elastic shells of revolution in mechanical engineering calculations. //Modern Engineering: Science and Education. Proceedings of Second International scientific and practical conference – SPb.: Published by State Polytechnic University, 2012. – P. 335-343.

[4] V.V. Yeliseyev and T.V. Zinovieva. Nonlinear-elastic strain of underwater pipeline in laying process. // Vycisl. meh. splos. sred. - Computational Continuum Mechanics – 2012. – V. 5, №1. – P. 70-78.

[5] Ter-Akopyants G.L. Dispersion curves and modal patterns of the wave propagation in elastic cylindrical shell filled with fluid. // Estestvennye-i-tehnicheskie-nauki-2015. – № 6(84). p.77-81. ISSN: 1684-2626

[6] Ter-Akopyants G.L. Axisymmetrical wave processes in cylindrical shell filled with fluid. // Estestvennye-i-tehnicheskie-nauki-2015. – № 7 (85) . – p. 10-14. ISSN: 1684-2626/ Естественные и технические науки. – 2015. – № 7 (85) . – P. 10-14

[7] G. V. Filippenko. Energy aspects of axisymmetrical waves propagation in the infinite cylindrical shell fully submerged in to the liquid // Vycisl. meh. splos. sred. - Computational Continuum Mechanics – 2013. – V. 6, № 2. – P. 187-197.

[8] G. V. Filippenko. Energy aspects of waves propagation in the infinite cylindrical shell fully submerged in to the liquid // Vycisl. meh. splos. sred. - Computational Continuum Mechanics – 2014. – V. 7, № 3. – P. 295-305.
[9] S.V. Sorokin, J.B. Nielsen, N. Olhoff, Green's matrix and the boundary integral equations method for analysis of vibrations and energy flows in cylindrical shells with and without internal fluid loading, Journal of Sound and Vibration 271 (3–5) (2004) 815–847.
[10] Filippenko G.V. Statement of the boundary-contact problems for the shells in acoustics // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2010", St.-Petersburg, Russia, June 8-10, 2010. – P. 57-626.
[11] Filippenko G.V. The energy analysis of shell-fluid interaction // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2011", St.-Petersburg, Russia, May 30-June 3, 2011. – P. 63-66.
[12] Filippenko G.V. The forced oscillations of the cylindrical shell partially submerged into a layer of liquid // Proc. of the Int. Conf. "Days on Diffraction 2012", St.-Petersburg, Russia, May 28-June 1, 2012. – P. 70-75.
[13] Cremer, L., Heckl, M., Petersson, Björn A.T. Structure-Borne Sound. Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. 3rd ed. 2005, XII, 607 p. 215 illus.
[14] Sveshnikov, A. V. The limit absorption principle for a wave guide //Doklady Akademiji Nauk SSSR 1951, 80, 345–347 (In Russian)
[15] Yeliseev V.V., 2003, *Mechanics of elastic bodies*. SPb.: SPbSPU. 336 p. (in Russian).

УДК 621.01/.03 ; DOI 10.1872/MMF-2016-28

М. Г. Яруллин[1], И.А.Галиуллин[2]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ВЕДУЩЕМ ЗВЕНЕ ШЕСТИЗВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

[1]Мунир Гумерович Яруллин, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
Россия, Казань, Yarullinmg@yahoo.com

[2]Ильнар Айратович Галиуллин, аспирант кафедры «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
Россия, Казань, TGaliullin@gmail.com

Аннотация

В работе показан метод определения крутящего момента на ведущем звене 6R механизмов. Применение рассматриваемого метода к механизму Брикара показало, что нагрузка на вал двигателя, приводящего в движение ведущее звено, изменяется неравномерно, имеет локальный минимум и достигает максимального значения при плоском положении механизма. Результаты проверены с помощью системы компьютерного моделирования и динамического анализа механизмов. Полученные результаты и методы расчёта могут быть использованы при проектировании новых устройств на базе 6R механизмов.

Ключевые слова: 6R механизмы, механизм Брикара, сверхограниченные механизмы, матрицы преобразований, крутящий момент

Известно, что теоретическая подвижность пространственного механизма может быть рассчитана по формуле Сомова-Малышева [1]. Согласно формуле, пространственный шестизвенный механизм, содержащий только вращательные кинематические пары (6R механизм), должен быть неподвижен. Действительно, такие механизмы, как правило, оказываются неподвижным. Однако существуют и подвижные шестизвенные шарнирные механизмы. Один из таких механизмов был предложен Р. Брикаром в 1927 году в работе [2]. Также новые подвижные 6R механизмы показаны в работах [3-10]. Особые свойства 6R механизмов позволяют найти им практическое применение [11-15]. В связи с этим задача исследования 6R механизмов является актуальной. В данной работе

показан способ определения крутящего момента на ведущем звене 6R механизмов.

В работах [16] и [17] использование матричных преобразований и алгоритмов компьютерной графики позволило исследовать кинематику механизма Брикара и его модификаций. В данной работе предлагается также использовать эти методы для определения крутящего момента на ведущем звене механизма Брикара.

На рисунке 1 показана схема механизма Брикара, используемая для расчётов. Звено AB механизма зафиксировано и является стойкой. Звено BC является ведущим. В точке T, расположенной в середине звена DE, закреплён груз массой m. Массы звеньев механизма составляют менее 0,1% массы груза, поэтому их в расчётах можно не учитывать. Все звенья механизма имеют одинаковую длину. Обозначим через φ угол поворота ведущего звена BC. В работе [17] показано, что углы поворотов других звеньев могут быть определены через φ. Выберем неподвижную мировую систему координат $X_A Y_A Z_A$, связанную с шарниром A.

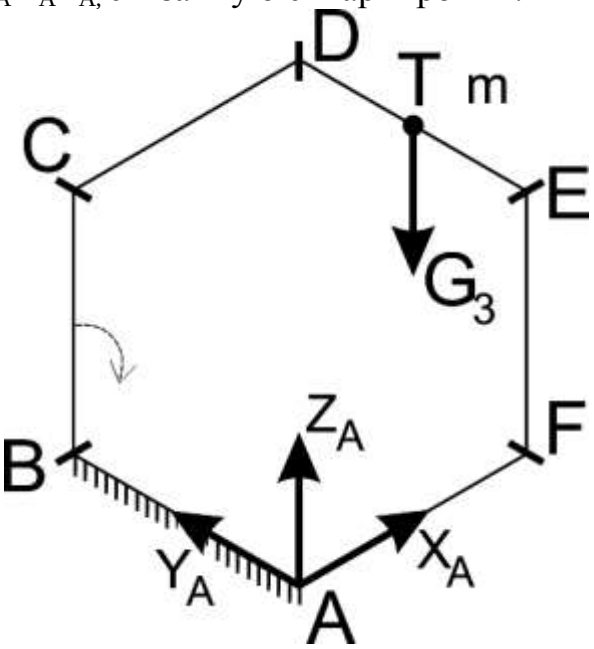


Рис. 1. Схема исследуемого механизма

Согласно [16], матрицы перехода от центра масс T звена DE к мировой системе координат может быть определена как:

$$(M_{DE}^{T} \to M_{AB}^{A}) = (M_{DE}^{D} \to M_{DE}^{T}) \times (M_{CD}^{D} \to M_{DE}^{D}) \times (M_{CD}^{C} \to M_{CD}^{D}) \times \\ \times (M_{BC}^{C} \to M_{CD}^{C}) \times (M_{BC}^{B} \to M_{BC}^{C}) \times (M_{AB}^{B} \to M_{BC}^{B}) \times (M_{AB}^{A} \to M_{AB}^{B}) \quad (1)$$

Полученная матрица позволяет определить координаты точки T при любом значении угла поворота ведущего звена:

$$\begin{cases} S_X^T = (1+0.5\cdot\cos(\varphi))\sqrt{\dfrac{1+2\cdot\cos(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2}} \\ S_Y^T = \dfrac{0.75+1.5\cdot\cos(\varphi)+0.25\cdot\cos^2(\varphi)-0.25\cdot\sin^2(\varphi)}{1+\cos(\varphi)} \\ S_Z^T = \dfrac{(-1-0.5\cdot\cos(\varphi))\cdot\sin(\varphi)}{1+\cos(\varphi)} \end{cases}. \quad (2)$$

Дифференцируя (2), получим выражения для определения проекций линейной скорости точки T в зависимости от угла поворота ведущего звена:

$$\begin{cases} V_X^T = \dfrac{-(0.5\cdot(1+\cos(\varphi)+\cos^2(\varphi))\cdot\sin(\varphi))}{(1+\cos(\varphi))^3\sqrt{\dfrac{1+2\cos(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2}}} \\ V_Y^T = \dfrac{((-1-\cos(\varphi)-0.5\cdot\cos^2(\varphi))\cdot\sin(\varphi))}{(1+\cos(\varphi))^2} \\ V_Z^T = \dfrac{(-\cos(\varphi)-1.5\cdot\cos^2(\varphi)-0.5\cdot\cos^3(\varphi)-0.5\cdot\sin^2(\varphi))}{(1+\cos(\varphi))^2} \end{cases}. \quad (3)$$

Вторая производная от (2) позволяет получить выражения для нахождения проекций линейных ускорений точки T:

$$\begin{cases} a_X^T = \dfrac{-\left(40\cdot\cos^{10}(\frac{\varphi}{2})\cdot(0.475+\cos(\varphi)+0.1\cdot\cos(2\varphi)+0.2\cdot\cos(3\varphi)+0.025\cdot\cos(4\varphi))\right)}{\left((1+\cos(\varphi))^8(0.5+\cos(\varphi))\sqrt{\dfrac{1+2\cos(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2}}\right)} \\ a_Y^T = \dfrac{(-\cos(\varphi)-2\cdot\cos^2(\varphi)-1.5\cdot\cos^3(\varphi)-0.5\cdot\cos^4(\varphi)-\sin^2(\varphi))}{(1+\cos(\varphi))^3} \\ a_Z^T = \dfrac{(\sin(\varphi)\cdot(-1-\cos(\varphi)-0.5\cdot\cos^2(\varphi)-0.5\cdot\cos^3(\varphi)+\sin^2(\varphi)))}{(1+\cos(\varphi))^3} \end{cases}. \quad (4)$$

В [17] было доказано, что угол поворота звена DE относительно звена CD всегда равен углу φ поворота ведущего звена BC. Для нахождения угловой скорости точки T относительно звена CD достаточно найти производную от угла поворота звена DE по времени:

$$\omega_{CD}^{DE} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (5)$$

Проецируя вектор угловой скорости на координатные оси, получим:

$$\begin{cases} \omega_{(x)CD}^{DE} = 0 \\ \omega_{(Y)CD}^{DE} = 0 \\ \omega_{(Z)CD}^{DE} = \dfrac{\Delta\varphi}{\Delta t} \end{cases}. \tag{6}$$

При этом, для перехода к мировой системе координат по [18]:

$$\begin{cases} \omega_{(x)AB}^{DE} = \omega_{(x)CD}^{DE} \cdot K_{X(A)}^{X(D)} + \omega_{(Y)CD}^{DE} \cdot K_{X(A)}^{Y(D)} + \omega_{(Z)CD}^{DE} \cdot K_{X(A)}^{Z(D)} \\ \omega_{(Y)AB}^{DE} = \omega_{(x)CD}^{DE} \cdot K_{Y(A)}^{X(D)} + \omega_{(Y)CD}^{DE} \cdot K_{Y(A)}^{Y(D)} + \omega_{(Z)CD}^{DE} \cdot K_{Y(A)}^{Z(D)} \\ \omega_{(Z)AB}^{DE} = \omega_{(x)CD}^{DE} \cdot K_{Z(A)}^{X(D)} + \omega_{(Y)CD}^{DE} \cdot K_{Z(A)}^{Y(D)} + \omega_{(Z)CD}^{DE} \cdot K_{Z(A)}^{Z(D)} \end{cases}, \tag{7}$$

где направляющие косинусы определяются по матрице (1), определяющей положение точки T в пространстве:

$$\begin{cases} K_{X(A)}^{X(D)} = -\sin(\varphi)\sqrt{1 - \dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \\ K_{Y(A)}^{X(D)} = -\sin(\varphi)\cdot\cos(\varphi) + \dfrac{\sin(\varphi)\cdot\cos^2(\varphi)}{\cos(\varphi)+1} \\ K_{Z(A)}^{X(D)} = \dfrac{\sin^2(\varphi)\cdot\cos(\varphi)}{\cos(\varphi)+1} - \cos^2(\varphi) \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} K_{X(A)}^{Y(D)} = -\cos(\varphi)\sqrt{1 - \dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \\ K_{Y(A)}^{Y(D)} = \dfrac{\cos^3(\varphi)}{\cos(\varphi)+1} - \sin^2(\varphi) \\ K_{Z(A)}^{Y(D)} = \dfrac{\sin(\varphi)\cdot\cos^2(\varphi)}{\cos(\varphi)+1} + \sin(\varphi)\cdot\cos(\varphi) \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} K_{X(A)}^{Z(D)} = \dfrac{\cos(\varphi)}{\cos(\varphi)+1} \\ K_{Y(A)}^{Z(D)} = \cos(\varphi)\sqrt{1 - \dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \\ K_{Z(A)}^{Z(D)} = \sin(\varphi)\sqrt{1 - \dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \end{cases} \tag{10}$$

Подставив (8)-(9) в (7), получим:

$$\begin{cases} \omega_{(x)AB}^{DE} = \dfrac{\cos(\varphi)}{1+\cos(\varphi)} \\ \omega_{(Y)AB}^{DE} = \cos(\varphi)\sqrt{1-\dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \\ \omega_{(Z)AB}^{DE} = \sin(\varphi)\sqrt{1-\dfrac{\cos^2(\varphi)}{(\cos(\varphi)+1)^2}} \end{cases}. \quad (11)$$

С помощью первой производной от (11) найдём проекции углового ускорения звена DE:

$$\begin{cases} \varepsilon_{(x)AB}^{DE} = -\dfrac{\sin(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2} \\ \varepsilon_{(Y)AB}^{DE} = -\dfrac{(1+3\cdot\cos(\varphi)+\cos^2(\varphi))\cdot\sin(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^3\sqrt{\dfrac{1+2\cdot\cos(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2}}} \\ \varepsilon_{(Z)AB}^{DE} = \dfrac{2\cdot\cos^2(\dfrac{\varphi}{2})\cdot\cos(\varphi)\cdot(2+\cos(\varphi))}{(1+\cos(\varphi))^3\sqrt{\dfrac{1+2\cdot\cos(\varphi)}{(1+\cos(\varphi))^2}}} \end{cases}. \quad (12)$$

Величину момента на ведущем звене механизма Брикара можно определить из условия уравновешивания элементарных работ всех внешних сил и моментов, приложенных к механизму [19]:

$$\delta A(M_{1пр}) + \delta A(G_3) + \delta A(R_{3ин}) + \delta A(M_{R3ин}) = 0, \quad (13)$$

Или, переходя на мощности:

$$N(M_{1пр}) + N(G_3) + N(R_{3ин}) + N(M_{R3ин}) = 0. \quad (14)$$

Слагаемые (14) могут быть определены как:

$$N(M_{1пр}) = M_{1пр}\cdot\omega\cdot\cos(M_{1пр}\omega) = M_{1пр}\cdot\omega; \quad (15)$$

$$N(G_3) = \overline{G_3}\cdot\overline{V^T} = -G_3\cdot V_Z^T; \quad (16)$$

$$N(R_{3ин}) = \overline{R_{3ин}}\cdot\overline{V^T} = R_{3ин}^X\cdot V_X^T + R_{3ин}^Y\cdot V_Y^T + R_{3ин}^Z\cdot V_Z^T = \\ = m_3\cdot a_X^T\cdot V_X^T + m_3\cdot a_Y^T\cdot V_Y^T + m_3\cdot a_Z^T\cdot V_Z^T; \quad (17)$$

$$N(M_{R3ин}) = M_{R3ин}^X\cdot\omega_{(x)AB}^{DE} + M_{R3ин}^Y\cdot\omega_{(Y)AB}^{DE} + M_{R3ин}^Z\cdot\omega_{(Z)AB}^{DE}. \quad (18)$$

Требуемые проекции, согласно [19], могут быть определены как:

$$\begin{cases} M^{X}_{R3ин} = \varepsilon^{DE}_{(x)AB} \cdot I^{X} + \omega^{DE}_{(Y)AB} \cdot \omega^{DE}_{(Z)AB} (I^{Z} - I^{Y}) \\ M^{Y}_{R3ин} = \varepsilon^{DE}_{(Y)AB} \cdot I^{Y} + \omega^{DE}_{(Z)AB} \cdot \omega^{DE}_{(X)AB} (I^{X} - I^{Z}) \\ M^{Z}_{R3ин} = \varepsilon^{DE}_{(Z)AB} \cdot I^{Z} + \omega^{DE}_{(X)AB} \cdot \omega^{DE}_{(Y)AB} (I^{Y} - I^{X}) \end{cases}. \quad (19)$$

Учитывая, что значения линейных и угловых скоростей и ускорений получены выше (3)-(4) и (11)-(12), а масса звена и его конструктивные параметры являются известной величиной, формула (14) позволит определить искомую величину уравновешивающего момента $M_{1пр}$.

Системы компьютерной алгебры позволяют значительно упростить расчёты. В данной работе все расчёты произведены с использованием системы символьных вычислений Mathematica и системы компьютерной алгебры Maple [20]. Итоговые результаты расчётов в данной работе приводятся в формате компьютерных систем в виду громоздкости их классического описания. В связи с ограничениями используемых символов, в расчётах, производимых в системах компьютерной алгебры, символ φ, рад обозначен как $b_$.

Рассчитав все слагаемые выражения (14), получим искомую формулу (рисунок 2) для определения крутящего момента на ведущем звене механизма в зависимости от угла поворота ведущего звена:

```
M1prsimpl = Simplify[M1pr]

(59346.6 + 111126. Cos[b_] + 91143.6 Cos[2 b_] + 65368.7 Cos[3 b_] +
   40868.2 Cos[4 b_] + 22169.3 Cos[5 b_] + 10366.9 Cos[6 b_] + 4142.03 Cos[7 b_] +
   1396.89 Cos[8 b_] + 390.942 Cos[9 b_] + 88.5948 Cos[10 b_] + 15.6618 Cos[11 b_] +
   2.0313 Cos[12 b_] + 0.172266 Cos[13 b_] + 0.00717773 Cos[14 b_] - 549.11 Sin[b_] -
   (877.389 - 6.36646 × 10^-12 i) Sin[2 b_] - 904.533 Sin[3 b_] - 712.282 Sin[4 b_] -
   451.235 Sin[5 b_] - 235.109 Sin[6 b_] - 101.794 Sin[7 b_] - 36.7306 Sin[8 b_] -
   10.9856 Sin[9 b_] - 2.67409 Sin[10 b_] - 0.509717 Sin[11 b_] - 0.070874 Sin[12 b_] -
   0.00629883 Sin[13 b_] - 0.000262451 Sin[14 b_] - 1.89735 × 10^-19 Sin[15 b_]) /
 ((1. + Cos[b_])^11 (0.5 + 1. Cos[b_])^2)
```

Рис. 2. Результат расчёта в Mathematica

Для проверки предложенного метода и анализа полученных значений воспользуемся системой компьютерного моделирования, которая позволяет получить график изменения крутящего момента на ведущем звене в зависимости от угла поворота ведущего звена. Построим график функции (тонкая линия на рисунке 3) и совместим с результатом, выдаваемым системой компьютерного моделирования (прерывистая линия на рисунке 3). Данные, полученные двумя разными способами, совпали с достаточной точностью (максимальная погрешность 0.5%).

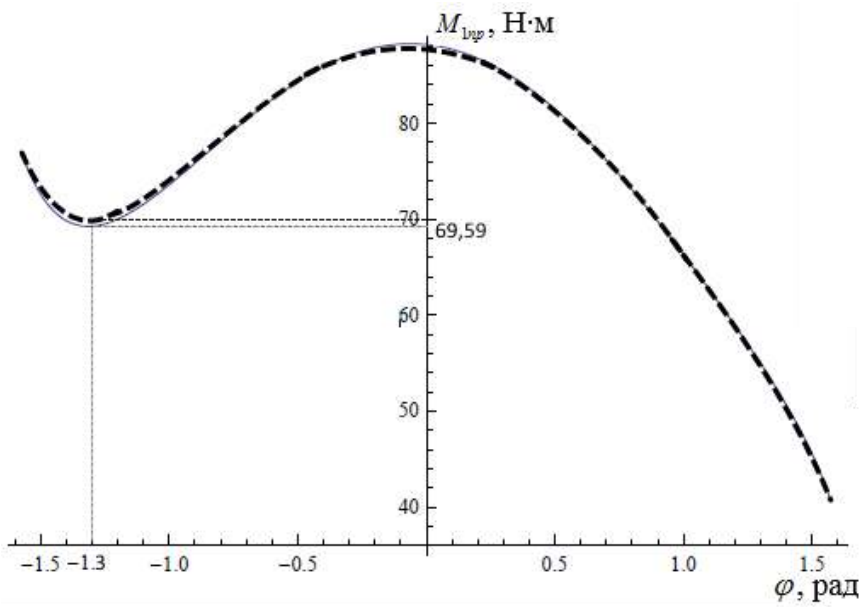


Рис. 3. Совмещённые графики результатов,
полученных двумя способами

При использовании механизма для перемещения груза, закреплённого на звене DE, двигатель будет испытывать максимальные нагрузки при плоском положении механизма. График функции также показывает, что нагрузка на двигатель изменяется не равномерно и имеет локальный минимум. Преимуществом использования метода матричного задания положения объектов является его универсальность, а именно применимость для нахождения кинематических параметров любых точек 6R механизма. Кроме того, предлагаемый метод может быть полностью формализован и быть использован для составления компьютерной программы кинематического и динамического анализа механизма Брикара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / М.З.Коловский, А.Н.Евграфов, Ю.А.Семенов, А.В.Слоущ. – 3-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 560 с.
2. *R. Bricard. Lecons decinematique //* Gauthier-Villars, Paris. – Vol. 2. – 1927.
3. *P. Dietmaier. Simply overconstrained mechanisms with rotational joints* // Habilitation thesis, Graz University of Technology. – 1995.
4. J.*E. Baker A generalization of Altmann's linkage //* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 2011. – Part C. – N 205. – P. 2649-2660.
5. *Schatz P*. Rhythmusforschung und Technik. – Verlag Freies Geistesleben, 1975. – 164 p.

6. *M. Pfurner*. A New Family of Overconstrained 6R-Mechanisms // Proceedings of EUCOMES08, Italy. – 2008. – P. 117-124.
7. *Song C. Y., Chen Y. A 6R Linkage Reconfigurable between the Line-symmetric Bricard Linkage and the Bennett Linkage //* Mechanism and Machine Theory. – 2013. – N 70. – P. 278–292.
8. *Viquerat A.D., Hutt T, Guest S.D. A plane symmetric 6R foldable ring* // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – N 63. – P. 73-89.
9. *M. G. Yarullin, I. A. Galiullin. Assemblability and Mobility of Bricard's Linkage Modifications* // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 698. – P. 552-556.
10. *Song C.Y., Chen Y. A Special Wohlhart's Double-Goldberg 6R Linkage and its Multiple Operation Forms among 4R and 6R Linkages* // Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots, Springer, Germany. – 2012. – Vol. 1. – P. 45-52.
11. *Racila L., Dahan M. Bricard Mechanism Used as Translator* // 12th IFToMM World Congress, Besançon. – 2007. – P. 337-341.
12. *Racila L., Dahan M. 6R Parallel Translational Device* // 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México. – 2011. – P. 85-93.
13. *Yaozhi L., Ying Y., Jingjing L. A retractable structure based on Bricard linkages and rotating rings of tetrahedral* // International Journal of Solids and Structures. – 2008. – Vol. 45. – P. 620-630.
14. *М.Г.Яруллин, И.А.Галиуллин. Синтез складывающихся многозвенных пространственных механизмов на базе механизма Брикарда* // XIX Туполевские чтения, Казань. – 2012. – Т. 3. – С. 212-215.
15. *Галиуллин И.А. О применении механизма Брикарда и его модификаций* // Проблемы механики современных машин. Материалы V Международной конференции, Улан-Удэ. – 2012. – С.11-14.
16. *М.Г.Яруллин, И.А.Галиуллин. Исследование механизма Брикарда с помощью алгоритмов компьютерной графики* // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18 – № 21. – С. 137-141.
17. *M. G. Yarullin, I. A. Galiullin. Kinematic Research of Bricard Linkage Modifications* // Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions. – 2016. – P. 17-29.
18. *Мудров П.Г.* Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского ун-та. 1976. – 264 с.
19. *Яруллин М. Г.* Трехмерная гидродинамическая очистка изделий. – Казань : Изд-во Казанского ун-та. 2001. – 172 с.
20. *Char B., Fee G., Geddes K. A tutorial introduction to Maple* // Journal of Symbolic Computation. – 1986 – Vol. 2. –N. 1. – P. 179-200.

M.G. Yarullin[1], I.A. Galiullin[1]

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

[1]KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY
named after A.N.TUPOLEV, Russia;

Abstract

The paper shows a method for determining the torque on the driving link of 6R mechanisms. Applying this method to the Bricard linkage showed that the motor shaft load varies irregularly, has a local minimum and reaches its maximum value at the flat position of the mechanism. Results verified by computer modeling of Bricard linkage. The results and methods of determining torque can be used for design new devices based on the 6R mechanisms.

Key words: 6R linkages, Bricard linkage, overconstrained linkage, transformation matrix, torque

REFERENCES

[1] Teoriya mehanizmov i mashin: Ucheb. posobie dlya studentov vyissh. ucheb. Zavedeniy /M.Z.Kolovskiy, A.N.Evgrafov, Yu.A.Semenov, A.V.Slousch. – 3-e izd., ispr. – M.: Izd. tsentr «Akademiya», 2008. – 560 p. (rus.)

[2] *R. Bricard. Lecons decinematique //* Gauthier-Villars, Paris. – Vol. 2. – 1927

[3] *P. Dietmaier. Simply overconstrained mechanisms with rotational joints* // Habilitation thesis, Graz University of Technology. – 1995

[4] J.*E. Baker A generalization of Altmann's linkage //* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 2011. – Part C. – N 205. – P. 2649-2660

[5] *Schatz P*. Rhythmusforschung und Technik. – Verlag Freies Geistesleben, 1975. – 164 p

[6] *M. Pfurner*. A New Family of Overconstrained 6R-Mechanisms // Proceedings of EUCOMES08, Italy. – 2008. – P. 117-124

[7] *Song C. Y., Chen Y. A 6R Linkage Reconfigurable between the Line-symmetric Bricard Linkage and the Bennett Linkage //* Mechanism and Machine Theory. – 2013. – N 70. – P. 278–292

[8] *Viquerat A.D., Hutt T, Guest S.D. A plane symmetric 6R foldable ring* // Mechanism and Machine Theory. – 2013. – N 63. – P. 73-89

[9] *M. G. Yarullin, I. A. Galiullin. Assemblability and Mobility of Bricard's Linkage Modifications* // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 698. – P. 552-556

[10] *Song C.Y., Chen Y. A Special Wohlhart's Double-Goldberg 6R Linkage and its Multiple Operation Forms among 4R and 6R Linkages* // Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots, Springer, Germany. – 2012. – Vol. 1. – P. 45-52
[11] *Racila L., Dahan M. Bricard Mechanism Used as Translator* // 12th IFToMM World Congress, Besançon. – 2007. – P. 337-341
[12] *Racila L., Dahan M. 6R Parallel Translational Device* // 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México. – 2011. – P. 85-93
[13] *Yaozhi L., Ying Y., Jingjing L. A retractable structure based on Bricard linkages and rotating rings of tetrahedral* // International Journal of Solids and Structures. – 2008. – Vol. 45. – P. 620-630.
[14] *M.G.Yarullin, I.A.Galiullin. Sintez skladivayuchihsja mnogozvennih prostranstvennih mechanizmov na baze mechanizma Bricarda* // XIX Tupolevskie chtenija, Kazan. – 2012. – Vol. 3. – P. 212-215. (rus.)
[15] *I.A.Galiullin. O primenenii mechanizma Bricarda I ego modifikacij* // Problemi mechaniki sovremennih machin. Materiali V Mezhdunarodnoj konferencii, Ulan-Ude. – 2012. – P. 11-14. (rus.)
[16] *M.G.Yarullin, I.A.Galiullin. Issledovanie mechanizma Bricarda s pomochju algoritmov kompjuternoj grafiki* // Vestnik technologicheskogo universiteta. – 2015. – Vol. 18 – N 21. – P. 137-141. (rus.)
[17] *M. G. Yarullin, I. A. Galiullin. Kinematic Research of Bricard Linkage Modifications* // Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions. – 2016. – P. 17-29.
[18] *Mudrov P.G.* Prostranstvennie mechanizmi s vrachatelnimi parami. – Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta. 1976. – 264 p. (rus.)
[19] *Yarullin M.* G. Trekhmernaya gidrodinamicheskaya ochistka izdelij. – Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta. 2001. – 172 p. (rus.)
[20] *Char B., Fee G., Geddes K. A tutorial introduction to Maple* // Journal of Symbolic Computation. – 1986 – Vol. 2. –N. 1. – P. 179-200.

УДК 621.01.01 ; DOI 10.1872/MMF-2016-29

М. Г. Яруллин[1], И. Р. Исянов[2], А.П. Мудров[3]

КИНЕМАТИКА ПЛОСКОГО ДВУХПОДВИЖНОГО ПЯТИЗВЕННОГО РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

[1]Мунир Гумерович Яруллин, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
Россия, Казань, Yarullinmg@yahoo.com

[2]Илнур Рафаилевич Исянов, аспирант кафедры «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
Россия, Казань, isyanov1993@mail.ru

[3]Александр Петрович Мудров, к. т. н., доцент кафедры «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева
Россия, Казань, mig@kai.ru

Аннотация

Разработана структурная схема двухподвижного рычажного пятизвенного механизма на основе четырехзвенника путем образования соосных двух вращательных пар вместо одной и превращения в стойку вал этих пар. Исследована кинематика характерной точки, совершающей наиболее сложное движение. Кинематический анализ проведен двумя независимыми способами: аналитическим в системе символьных вычислений Maple 17 и использованием CAD/CAE анализа в системе SolidWorks.

Ключевые слова: пятизвенные рычажные механизмы, двухподвижность, кинематика, вращательные пары.

Использование плоских двухподвижных рычажных механизмов в качестве базового механизма различных мехатронных устройств технологических процессов является весьма перспективным. Они могут быть успешно использованы в галтователях, смесителях, дезинтеграторах и в других устройствах. [1-5]

Рассмотрим структурную схему двухподвижного рычажного пятизвенного механизма (рис.1, а). Он образован на основе известного шарнирного четырехзвенника путем образования в точке ***A*** соосных двух

вращательных пар вместо одной и превращения в стойку вал этих кинематических пар [6]. Таким образом, в новом механизме по сравнению одноподвижным четырёхзвенником имеем: первое звено остается ведущим кривошипом, шатун 2 остается шатуном, звено 3 – балансир становится шатуном, звено 4 со стойки превращается во второй ведущий кривошип, а вал соосных вращательных кинематических пар в точке А является стойкой [7].

Степень свободы, полученного механизма определяется по формуле Чебышева [8] и будет равна:

$$W = 3(m-1) - 2p_1 - p_2, \quad (1)$$

где: m – число звеньев;

p_1 – число высших (одноподвижных) кинематических пар;

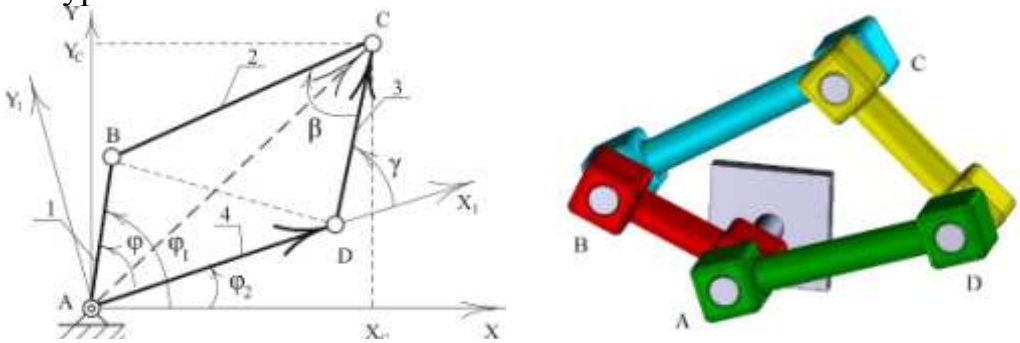
p_2 – число низших пар.

Тогда имеем:

$$W = 3(5-1) - 2 \times 5 = 2.$$

Поскольку механизм имеет два ведущих звена, его кинематика весьма сложна и интересна, поэтому использование его свойств в мехатронных устройствах является перспективным. Для практического использования этого механизма наиболее интересным является самый отдаленный шарнир - ***C***. Поскольку двухподвижный пятизвенный рычажный механизм образован замкнутой кинематической цепью и имеет два входных звена: входными звеньями его являются ведущий кривошип 1 и ведущий стержень 4. Функции положения звеньев и характерных точек механизма определяются от входных координат φ_1 и φ_2, которые представлены как функции от времени $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$.

Из рисунка 1, а видно, что положение, например, характерной точки С может быть получено через контур A-B-C, а также может быть получено через контур A-D-C.



а) б)

Рис. 1. Плоский двухподвижный пятизвенный рычажный механизм:
а) структурная схема; б) 3D модель

Составим тригонометрические уравнения для кинематического анализа. Рассмотрим контур A-D-C и спроецируем его на координатную ось OXY. Положение характерной точки ***C*** будет определятся

координатами X_C и Y_C. Тогда векторный контур рассматривается как сумма векторов:

$$\overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DC} = \overrightarrow{AC}. \quad (2)$$

В проекциях на оси неподвижной системы координат OXY, учитывая, что $AC_X = X_C$ и $AC_Y = Y_c$ имеем:

$$\begin{cases} X_C = AD_{X_1} K_X^{X_1} + AD_{Y_1} K_X^{Y_1} + CD_{X_1} K_X^{X_1} + CD_{Y_1} K_X^{Y_1} \\ X_C = AD_{X_1} K_Y^{X_1} + AD_{Y_1} K_Y^{Y_1} + CD_{X_1} K_Y^{X_1} + CD_{Y_1} K_Y^{Y_1} \end{cases}, \quad (3)$$

где: $AD_{X_1} = l_4$; $AD_{Y_1} = 0$; $CD_{X_1} = l_3 \cos\gamma$; $CD_{Y_1} = l_3 \cos\gamma$,

$K_X^{X_1}$, $K_X^{Y_1}$, $K_Y^{X_1}$, $K_Y^{X_1}$ – направляющие косинусы.

Положение характерной точки $\boldsymbol{C}$ в системе координат $O_1X_1Y_1$ относительно OXY определяется матрицей направляющих косинусов [8]:

$$\begin{vmatrix} K_X^{X_1} & K_Y^{X_1} \\ K_Y^{X_1} & K_Y^{X_1} \end{vmatrix} \leftrightarrow \begin{vmatrix} \cos\varphi_2 & \sin\varphi_2 \\ -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Поставив матрицу направляющих косинусов (4) в выражение (3) получаем:

$$\begin{cases} X_C = l_4 \cos\varphi_2 + l_3 \cos\gamma \cos\varphi_2 - l_3 \sin\gamma \sin\varphi_2 \\ Y_C = l_4 \sin\varphi_2 + l_3 \cos\gamma \sin\varphi_2 + l_3 \sin\gamma \cos\varphi_2 \end{cases}. \quad (5)$$

Из уравнения видно, что угол φ_2 (входная координата ведущего звена AD) зависит от времени: $\varphi_2 = \omega_2 \times t$, $\omega_2 = const$. Угол γ имеет зависимость от входной координат φ_1 и φ_2 и вычисляется выражением [9]:

$$\gamma = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - l_4^2 - l_1^2 + 2l_4 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{2l_3 \sqrt{l_4^2 + l_1^2 - 2l_4 l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}} + \operatorname{arctg} \frac{-l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{-l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + l_4}. \quad (6)$$

Уравнения для определения значения скорости точки С получим, дифференцировав систему уравнений (5) по времени:

$$\begin{cases} V_C^X = X_C' = l_4 (-\sin\varphi_2)\varphi_2' + l_3(-\sin\gamma \cos\varphi_2 \gamma' + \cos\gamma\ (-\sin\varphi_2)\varphi_2') - \\ \qquad -l_3(\cos\gamma \sin\varphi_2\, \gamma' - \sin\gamma \cos\varphi_2\, \varphi_2'), \\ V_C^Y = Y_C' = l_4 \cos\varphi_2\, \varphi_2' + l_3(-\sin\gamma \sin\varphi_2\, \gamma' + \cos\gamma\ \cos\varphi_2 \varphi_2') + \\ \qquad +l_3(\cos\gamma \cos\varphi_2\, \gamma' - \sin\gamma \sin\varphi_2 \varphi_2'). \end{cases} \quad (7)$$

Уравнения для определения ускорения точки $\boldsymbol{C}$ с последующим дифференцированием уравнений (7):

$$\begin{cases} a_C^X = (V_C^X)' = (X_C')' \\ a_C^Y = (V_C^Y)' = (Y_C')' \end{cases}. \quad (8)$$

Проведение кинематического анализа характерной точки С исследуемого двухподвижного пятизвенного механизма по уравнениям (5), (7) и (8) весьма трудоемко. Кроме-того формула (6) для нахождения угла поворота гамма (γ), заимствованное из источника [9] вызывает некоторое сомнение. Поэтому с целью получения объективных данных для кинематического анализа, движение точки С проведем несколькими различными независимыми друг от друга способами.

Первый способ – аналитический:

Суть этого способа заключается в том, что строиться векторный контур для исследования движения характерной точки ***C*** (рис. 1, а). Спроектировав уравнение (2) на координатные оси получены уравнения перемещения (5). Последовательным дифференцированием этих уравнений получаем формулы для нахождения скоростей (7) и ускорений точки (8). В уравнениях (5) неизвестным является угол γ, который зависит от входных координат $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$. Из векторного контура ABCD (рис.1а) определяется угол γ следующими уравнениями [10]:

$$BD = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos\varphi}, \tag{9}$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{l_2^2 - BD^2 + l_3^2}{2l_2 l_3}\right), \tag{10}$$

$$\gamma = 2\arctan\left(\frac{l_1 \sin\varphi - l_2 \sin\beta}{l_1 \cos\varphi + l_3 - l_4 - l_2 \cos\beta}\right), \tag{11}$$

где: l_1, l_2, l_3, l_4 – длины звеньев пятизвенного механизма;

φ- угол < BAD, который определяется как разница входных координат $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$.

После постановки (9) и (10) в уравнение (11) получим:

$$\gamma = 2\arctan\left(\frac{l_1 \sin\varphi - \frac{1}{2} l_2 \sqrt{4 - \frac{k^2}{p^2}}}{l_1 \cos\varphi + l_3 - l_4 - \frac{k}{2l_3}}\right), \tag{12}$$

где: k= $l_2^2 - l_1^2 - l_4^2 + 2l_1 l_4 \cos\varphi + l_3^2$;

p= $l_2 l_3$.

Поскольку дифференцирование выше указанных уравнений (5) и (12) является достаточно трудоемким, ниже покажем решение их в системе символьных вычислений Maple 17 [11]. В связи с ограничениями используемых символов, в расчётах, производимых в системах компьютерной алгебры, длины звеньев механизма l_1, l_2, l_3 и l_4 обозначим, как AB, BC, CD и AD. Угол φ определяется, как разница между входными

координатами ведущих звеньев механизма и вводиться в программу $\varphi = at - bt$, где t время:

$$f := 2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right).$$

Уравнение вычисления проекции скорости V_C^X в системе символьных вычислений Maple 17 имеет вид:

$$Diff((AD\cdot\cos(t\cdot b) + CD\cdot\cos(f)\cdot\cos(t\cdot b) - CD\cdot\sin(f)\cdot\sin(t\cdot b), t)) = diff((AD\cdot\cos(t\cdot b) + CD\cdot\cos(f)\cdot\cos(t\cdot b) - CD\cdot\sin(f)\cdot\sin(t\cdot b), t))$$

Результаты дифференцирования в системе символьных вычислений Maple имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(AD\cos(bt) + CD\cos\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\cos(bt) - CD\sin\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\sin(bt)\right) =$$

$$-AD\sin(bt)\,b - \left(2\,CD\sin\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\right)\Bigg(1\Big/$$

$$\left(AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}\right)(AB\cos(at-bt)\,(a-b)) + \frac{\left(AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}\right)AB\sin(at-bt)\,(a-b)}{\left(AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}\right)^2}\Bigg)\cos(bt)\Bigg)$$

$$\Big/\left(1 + \frac{\left(AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}\right)^2}{\left(AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}\right)^2}\right) - CD\cos\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\sin(bt)\,b$$

$$- \left(2\,CD\cos\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\right)\Bigg(\frac{AB\cos(a}{AB\cos(at-bt)} + \frac{\left(AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}\right)^2}{\left(AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}\right)^2}\Bigg) - CD\sin\left(2\arctan\left(\frac{AB\sin(at-bt) - \frac{1}{2}BC\sqrt{4-\frac{k^2}{p^2}}}{AB\cos(at-bt) + CD - AD - \frac{1}{2}\frac{k}{CD}}\right)\right)\cos(bt)\,b$$

Поставив все известные значения продифференцированную формулу, вычисляется числовое значение проекции скорости V_C^X. Аналогичным путем вычисляется проекция скорости V_C^Y характерной точки С на координатную ось OY. Модуль скорости характерной точки С определяется формулой:

$$V_C = \sqrt{(V_C^X)^2 + (V_C^Y)^2}. \quad (13)$$

Решив уравнения (5), (12) и определив модуль скорости (13) в системе символьных вычислений Maple 17, построен график скорости характерной точки ***C*** по времени t промежутке от 0 до 6,5 сек (рис.2,а).

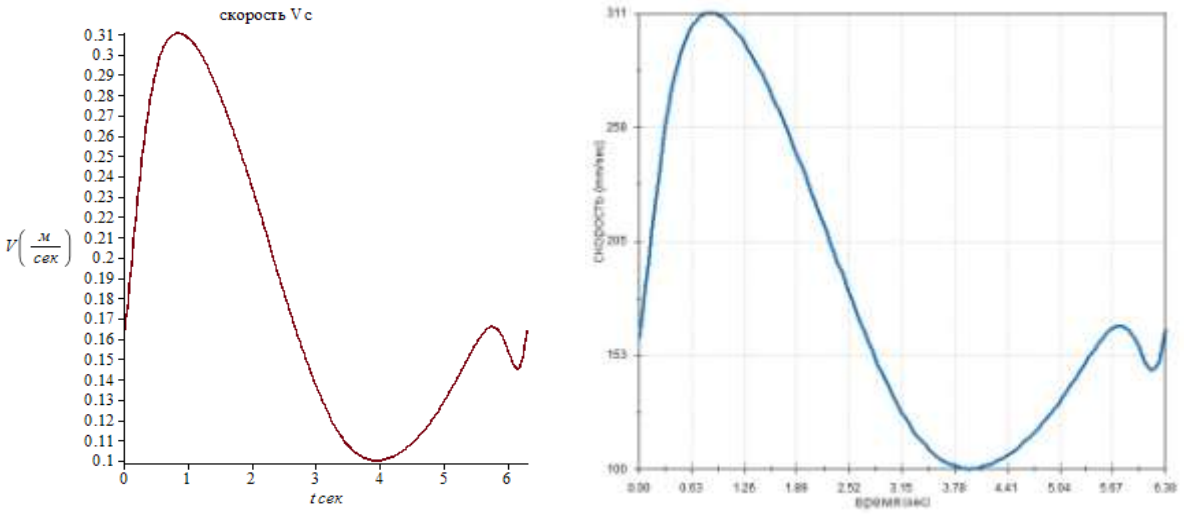
График, полученный в системе символьных вычислений Maple 17, является периодической, на рисунке 6а показан только один цикл.

Второй способ – CAD/CAE способ в системе SolidWorks.

Суть этого способа заключается в том, что строится 3D-модель двухподвижного пятизвенного механизма и проводится CAD/CAE анализ в системе SolidWorks [12].

3D модель плоского двухподвижного пятизвенного механизма в системе SolidWorks показана на рисунке 1, б.

Для визуального восприятия полученных результатов [13] применяют анимацию 3D модели используя пакеты программ SolidWorks Simulation и SolidWorks Motion. Система программ позволяет получать графики скорости и ускорения звеньев механизма. Введя входные координаты ведущих звеньев получаем результаты (рис. 2, б), а именно скорость исследуемой характерной точки С.



а) б)

Рис. 2. График скорости характерной точки С:
а) – получен в системе символьных вычислений Maple 17,
б) – получен в системе SolidWorks

Из графиков (рис. 2) видно, что скорость изменения исследуемой точки ***C*** меняется периодично по синусоиде с дополнительным колебанием в промежутке времени от 5,7 до 6,3 секунд.

Сравнивая полученные графики, полученные двумя способами, можно сделать следующие выводы:

1. Характер изменения модуля скорости характерной точки (наиболее отдаленного шарнира от начала системы координат) двухподвижного пятизвенного механизма периодично меняется по синусоиде с дополнительным колебанием в определенном промежутке времени. Это свойство является весьма перспективным при использовании данного механизма в качестве базового механизма различных перемешивающих устройств.
2. Аналитический способ является достаточно трудоемким, кроме того высока вероятность допущения ошибок при практических расчетах кинематических параметров двухподвижных механизмов.
3. Использование CAD/CAE анализа в системе SolidWorks позволяет быстро определять необходимые параметры кинематики звеньев механизма, однако требует четкого определения начала системы отчета.
4. Для получения достоверных данных целесообразно использовать несколько независимых способов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2558593 Российская Федерация, МПК B01F7/30. Рычажно-планетарный смеситель //Яруллин М. Г., Исянов И. Р., Хабибуллин Ф.Ф., Мингазов М.Р., Шамилов Д.Р. Опубл.10.08.2015 Бюл. № 22.
2. Пат. 153259 на полезную модель МПК B24B 31/023. Устройство для галтовки безразмерных деталей // Яруллин М. Г., Исянов И. Р., Хабибуллин Ф.Ф., Мингазов М.Р. Опубл. 10.07.2015 Бюл. № 19.
3. Пат. 149977 на полезную модель МПК B01F 7/30. Рычажно-планетарный смеситель // Яруллин М. Г., Исянов И. Р., Хабибуллин Ф.Ф., Мингазов М.Р., Шамилов Д.Р. Опубл. 27.01.2015 Бюл. № 3.
4. Пат. 154612 на полезную модель МПК F16H 21/10, F16H 21/26. Плоский дифференциальный шарнирно-рычажный механизм // Яруллин М. Г., Мингазов М.Р., Исянов И. Р. Опубл. 27.08.2015 Бюл. № 24.
5. Пат. 2547018 Российская Федерация, МПК B01F7/30. Рычажно-планетарный смеситель // Яруллин М. Г., Мингазов М.Р., Исянов И. Р., Хабибуллин Ф.Ф. Опубл.10.04.2015 Бюл. № 10.
6. Яруллин М.Г., Исянов И.Р. Двухподвижный пятизвенный рычажный механизм // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. - 2015. -№2 - С. 97-102.
7. Яруллин М.Г., Мингазов М.Р. Способ образования двух подвижных 5R-механизмов // Научные труды III-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные

технологии в машиностроении». – М. Издательский дом «Спектр», 2014. – С. 380-382.
8. Коловский М.З, Евграфов А.Н., Семенов Ю.А., Слоущ А.В. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений // 3-е изд., испр. – М.: Изд. центр «Академия» - 2008 – 560 с.
9. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами // Казанский сельскохозяйственный институт имени М.Горького – 1976 – 264 с.
10. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин // М. Наука, 1988 640 с.
11. David H. Myszka (2012) Machines and mechanisms: applied kinematic analysis — 4th ed. TJ175.M97.
12. Яруллин М.Г., Галиуллин И.А. Исследование механизма Брикарда с помощью алгоритмов компьютерной графики // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18 – № 21. – С. 137-141.
13. Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф. Кинематика двухподвижного дезинтегратора с приводом на базе пространственных 4R механизмов // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – 2015 - №1. - С.108-111.
14. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и Mathcad // Теория механизмов и машин. – 2008. – № 1. – Том 6. – С. 71-80.

M.G. Yarullin[1], I.R. Isyanov[2], A.P. Mudrov[3]

KINEMATICS OF THE FLAT 2 DOF FIVE-BAR LINKAGE

[1,2,3]KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY
named after A.N.TUPOLEV, Russia.

Abstract

Developed a block diagram of 2 DOF five-bar lever mechanism on the basis of four-link through the formation of two coaxial rotary pairs instead of one, and the conversion of the rack shaft of these pairs. Investigated the kinematics feature point that engages the most complex motion. Kinematic analysis was performed by two independent methods: the analytical system of symbolic computations Maple 17 and the use of CAD / CAE analysis in SolidWorks system.

Key words: 5R-linkages, 2 DOF mechanisms, kinematics, rotational pair.

REFERENCES

[1] Patent 2558593 Russian Federation, Int. Cl. B01F7/30 /Lever-type planetary mixer. Yarullin MG, Isyanov IR, Khabibullin FF, Mingazov MR, Shamilov DR. publ.10.08.2015 bull. No. 22(rus.).

[2] Utility patent 153259 Int. Cl. B24B 31/023 the Device for the tumbling dimensionless details. Yarullin MG, Isyanov IR, Khabibullin FF, Mingazov MR. publ. 10.07.2015 bull. No. 19 (rus.).
[3] Utility patent 149977 Int. Cl. B01F 7/30 Lever-type planetary mixer. Yarullin MG, Isyanov IR, Khabibullin FF, Mingazov MR, Shamilov DR. publ. 27.01.2015 bull. No. 3 (rus.).
[4] Utility patent 154612 Int. Cl. F16H 21/10, F16H 21/26 Flat differential lever mechanism. Yarullin MG, Mingazov MR, Isyanov IR. publ. 27.08.2015 bull. No. 24. (rus.).
[5] Patent 2547018 Russian Federation, Int. Cl. B01F7/30 / Lever-type planetary mixer. Yarullin MG, Mingazov MR, Isyanov RI, Khabibullin, FF. publ.10.04.2015. bull. No. 10. (rus.).
[6] Yarullin MG, Isyanov IR (2015) Two movable five-link linkage. Vestnik KGTU n. a. A. N. Tupolev. -. No. 2. - p. 97-102 (rus.).
[7] Yarullin MG, Mingazov MR (2014) The method for forming of two moving 5R-mechanisms. Proceedings of III-th International scientific conference "Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering". – M. Publishing house "Spectrum", p. 380-382. (rus.).
[8] Kolovsky MZ, Evgrafov AN, Semenov YA, Slousch AV (2008) Theory of mechanisms and machines: textbook for high school students, 3th revised edn. ispr. Publishing Center, Moscow, Akademia, 560 p. (rus.).
[9] Mudrov P.G. (1976) Spatial mechanisms with rotational pairs. Publishing House of Kazan University, Kazan, – 264 p. (rus.).
[10] Artobolevsky II (1988) Theory of mechanisms and machines. Moscow. Nauka, p. 640 (rus.).
[11] David H. Myszka (2012) Machines and mechanisms: applied kinematic analysis —4th ed. TJ175.M97.
[12] Yarullin MG, Galiullin IA (2015) Research of the mechanism Bricard with the help of computer graphics algorithms. Herald of Kazan Technological University. (18)21: P. 137-141. (rus.).
[13] Yarullin MG, Khabibullin FF (2015) Kinematics two movable disintegrator drive - based 4K spatial mechanisms. Vestnik KGTU n. a. A. N. Tupolev. (1): P. 108-111. (rus.).
[14] Evgrafov AN, Petrov GN (2008) Computer animation of kinematics schemes in Excel and Mathcad. Theor. Mech. Mach. 6(1): P. 71-80. (rus.).

УДК 621.81/85 ; DOI 10.1872/MMF-2016-30

М.Г. Яруллин[1], Ф.Ф. Хабибуллин[2]

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОВОРАЧИВАЕМОСТИ МЕХАНИЗМА БЕННЕТТА

[1]Мунир Гумерович Яруллин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ)
Россия, Казань
E-mail: Yarullinmg@yahoo.com
[2] Фаниль Фаргатович Хабибуллин:
аспирант кафедры «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ)
Россия, Казань
E-mail: fanil_arsk@mail.ru

Аннотация

Исследованы теоретические и практические условия работоспособности механизма. Разработан метод проектирования специфических звеньев, которые позволяют совершать полнооборотное вращение кривошипов механизма, не задевая остальных. Исследованы конструкторские особенности “нулевого” и “ненулевого” звена. Анализированы проворачиваемости исследуемых устройств на базе параллелограмма и антипараллелограмма Беннетта. Сформулированы практические условия проворачиваемости механизма.

Ключевые слова: механизм Беннетта, условия проворачиваемости, “нулевое” звено, “ненулевое” звено.

Конструктивные особенности механизма Беннетта [1] в последние время вызывают большой интерес среди ученых, появилась целая «беннеттиана» из попыток исследовать феномен и объяснить работоспособность механизма.

Механизм содержит всего четыре звена (рис. 1, а), связанных последовательно четырьмя вращательными парами. Его считают «парадоксальным» из-за того, что, согласно известной формуле Сомова-Малышева, механизм имеет подвижность равной минус двум, то есть конструкция должна быть якобы неподвижной:

$$W = 6\cdot(m-1) - 5p_1 = 6(4-1) - 5\cdot 4 = -2. \quad (1)$$

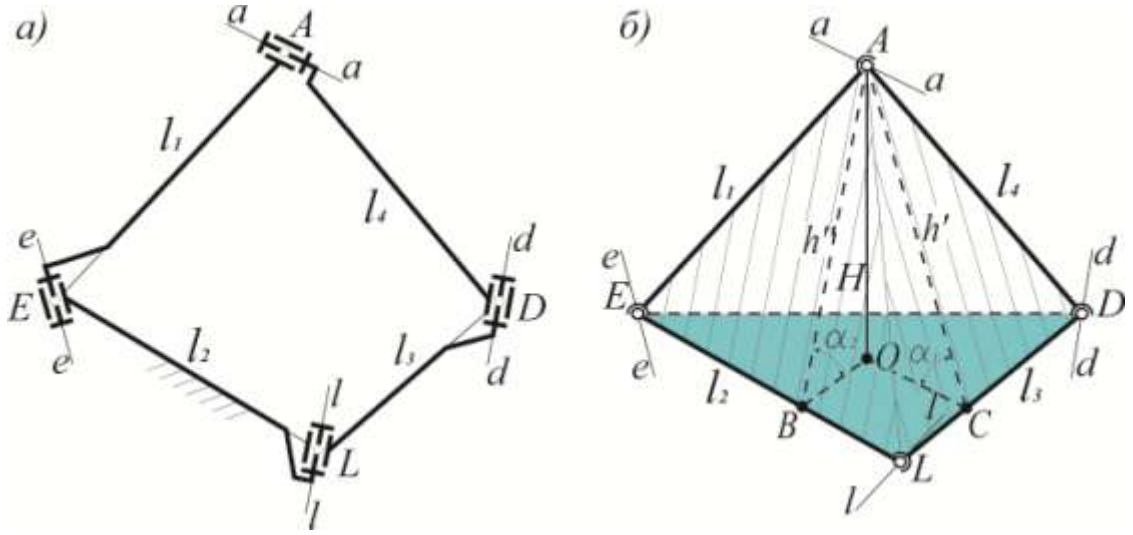


Рис. 1. Структурная схема а) механизма Беннетта,
б) четырехзвенника с шаровыми шарнирами

Однако механизм Беннетта подвижен, и его подвижность обусловлена дополнительными условиями, которые накладываются на механизм.

Сначала рассмотрим простой и гарантированно проворачиваемый пространственный четырехзвенник только с шаровыми шарнирами и с одинаковыми по длине противоположенными звеньями (рис. 1, б). Степень подвижности этого механизма можно определить по формуле Сомова-Малышева [2]:

$$W = 6(n-1) - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 4p_2 - 1p_5, \quad (2)$$

где n- число звеньев,

W- степень подвижности,

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 - число кинематических 1-5 класса.

$$W = 6(4-1) - 5\cdot 0 - 4\cdot 0 - 3\cdot 0 - 2\cdot 0 - 1\cdot 0 = 6. \quad (3)$$

Это означает, что такой механизм имеет 3 местные подвижности (звенья *EA*, *AD* и *DL* вращаются вокруг этих же линий соответственно), две групповые подвижности (звенья *EA* и *AD* вращаются вокруг *ED*, а звенья *AD* и *DL* вокруг *AL*), кроме того механизм имеет общую подвижность при сообщении вращательного движения *EA*. Таким образом, в сумме шесть подвижностей. Такой механизм на практике использовать нельзя. Однако на его основе рассмотрим условия существования кривошипов и синтезируем одноподвижные механизмы с одними вращательными парами.

Проверим теоретические условия существования двух кривошипов. Пусть звенья занимают такое положение в пространстве, что диагонали *DE* и *LA* остаются одинаковыми по длине, равными L_0, тогда $DE=LA=L_0$ (рис.1б). Получаем трехгранную пирамиду *LDAE* с одинаковыми по длине противоположными ребрами, равными l_1, l_2 и ребрами L_0. Поверхность пирамиды состоит из площадей треугольников со сторонами l_1, l_2 и L_0. Пусть площадь каждого из треугольников равна *K*. Опустим из вершины *A*

перпендикуляр на ребро *EL*. Длина этого перпендикуляра $h'' = 2K/l_2$. Если обозначить через α_2 угол наклона этого перпендикуляра к плоскости *LAE*, то высота, опущенная из вершины *A* на эту плоскость:

$$H = h'' \sin\alpha_2 = \frac{1}{l_2} \cdot 2K \sin\alpha_2. \quad (4)$$

Аналогично, пусть h' будет длиной перпендикуляра, опущенного из той же точки на ребро *LD*

$$h' = 2K/l_1$$

Следовательно, и в этом случае, обозначив через α_1 угол наклона перпендикуляра h' к плоскости *LAE*, получим аналогично [3]:

$$H = h' \sin\alpha_1 = \frac{1}{l_1} \cdot 2K \sin\alpha_1. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) получаем зависимость длин и углов поворота шатуна от кривошипа

$$l_1 / \sin\alpha_1 = l_2 / \sin\alpha_2. \quad (6)$$

Заменим трехподвижные шаровые шарниры на одноподвижные вращательные. Причем оси вращательных кинематических пар направим строго следующим образом:

- ось ***e-e*** параллельно *AC*;
- ось ***a-a*** параллельно *OC*;
- ось ***d-d*** параллельно *AB*;
- ось ***l-l*** параллельно *BO*.

Полученный механизм и есть механизм Беннетта, степень подвижности которого согласно уравнению (1) равняется минус двум.

Несмотря на отрицательное значение степени подвижности механизма, при определенных условиях данный механизм проворачивается [4]. Этими теоретическими условиями проворачиваемости механизма Беннетта являются:

1). Противоположенные звенья механизма одинаковые:

а) длины кратчайших расстояний противолежащих звеньев равны, т.е. $l_1 = l_3$ – длины кратчайших расстояний между шарнирами ведущего и ведомого кривошипов и $l_2 = l_4$– длины кратчайших расстояний между осями шарниров шатуна и стойки;

б) геометрические оси шарниров противолежащих звеньев развернуты относительно друг друга на равные углы, т.е. $\alpha_1 = \alpha_3$- углы скрещивания осей шарниров ведущего и ведомого кривошипа, $\alpha_2 = \alpha_4$- углы скрещивания осей шарниров шатуна и стойки.

2). Концы кратчайших расстояний соседних звеньев совпадают.

3). Выполняется условие:

$$\frac{l_1}{l_2} = \pm \frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}. \quad (7)$$

Подвижность механизма Беннетта по этим условиям неоднократно проверялись теоретически на анимационных моделях [5-9]. Однако

практически изготовленных устройств и машин на базе механизмов Беннетта достаточно мало. Исключение составляют устройства, созданные учеными Казанской школы механиков [10-13]. Причиной тому является то, что механизм Беннетта имеет два кривошипа и полнооборотная подвижность этих кривошипов обеспечивается только при изготовлении звеньев механизма особым способом. Суть этого способа заключается в том, чтобы механизм полностью проворачивался, некоторые звенья его должны быть “ненулевыми”. Действующие модели механизма Беннетта, изготовленные другими исследователями, изготовленные без так называемых “ненулевых” звеньев, не имеют полнооборотную подвижность своих кривошипов: звенья механизмов накладываются друг на друга и мешают полнооборотному движению (рис. 4б).

Данная статья посвящена исследованиям по созданию натурных образцов устройств на базе механизма Беннетта путем разработки “ненулевых” звеньев для обеспечения его полнооборотной подвижности.

Конструктивные особенности “нулевых” и “ненулевых” звеньев механизма Беннетта.

1). Рассмотрим метод получения конструкции “ненулевого” шатуна и стойки.

Структурными параметрами шатуна и стойки механизма Беннетта являются:

- $l_2 = l_4$ - кратчайшее расстояние между осями шарниров (рис. 2);
- $a_2 = a_4$- углы скрещивания осей шарниров звеньев (рис. 2).

На рисунке 2, а представлен эскиз “нулевого” шатуна в трех проекциях. Здесь кратчайшее расстояние между осями шарниров этого звена совпадает с осью симметрии самого шатуна. Линия *AD* одновременно является кратчайшим расстоянием звена и его осью симметрии. У этого звена два структурного параметра: первое - указанное межосевое расстояние, второе - угол скрещивания этих осей. На рисунке 2б показано “ненулевое” звено, полученное на основании “нулевого”, смещением центров шарниров “нулевого” шатуна на расстояние $A_0''A''$ и$D_0'D'$ соответственно. Таким образом, полученное “ненулевое” звено не имеет геометрическую ось симметрии, а кратчайшее расстояние между осями шарниров шатуна находится вне тела. Размеры отрезков $A_0''A'' = h''$, $D_0'D' = h'$определяются свободно конструктором, чтобы обеспечить проворачивание механизма в зависимости от габаритных размеров остальных звеньев для исключения наложения звеньев конструкции механизма.

На рисунке 2, б в трех проекциях показана взаимосвязь между “нулевым” и “ненулевым” звеном. Из рисунка видно, что кратчайшее расстояние и угол осей шарниров абсолютно одинаковые, хотя фактические тела звеньев разные.

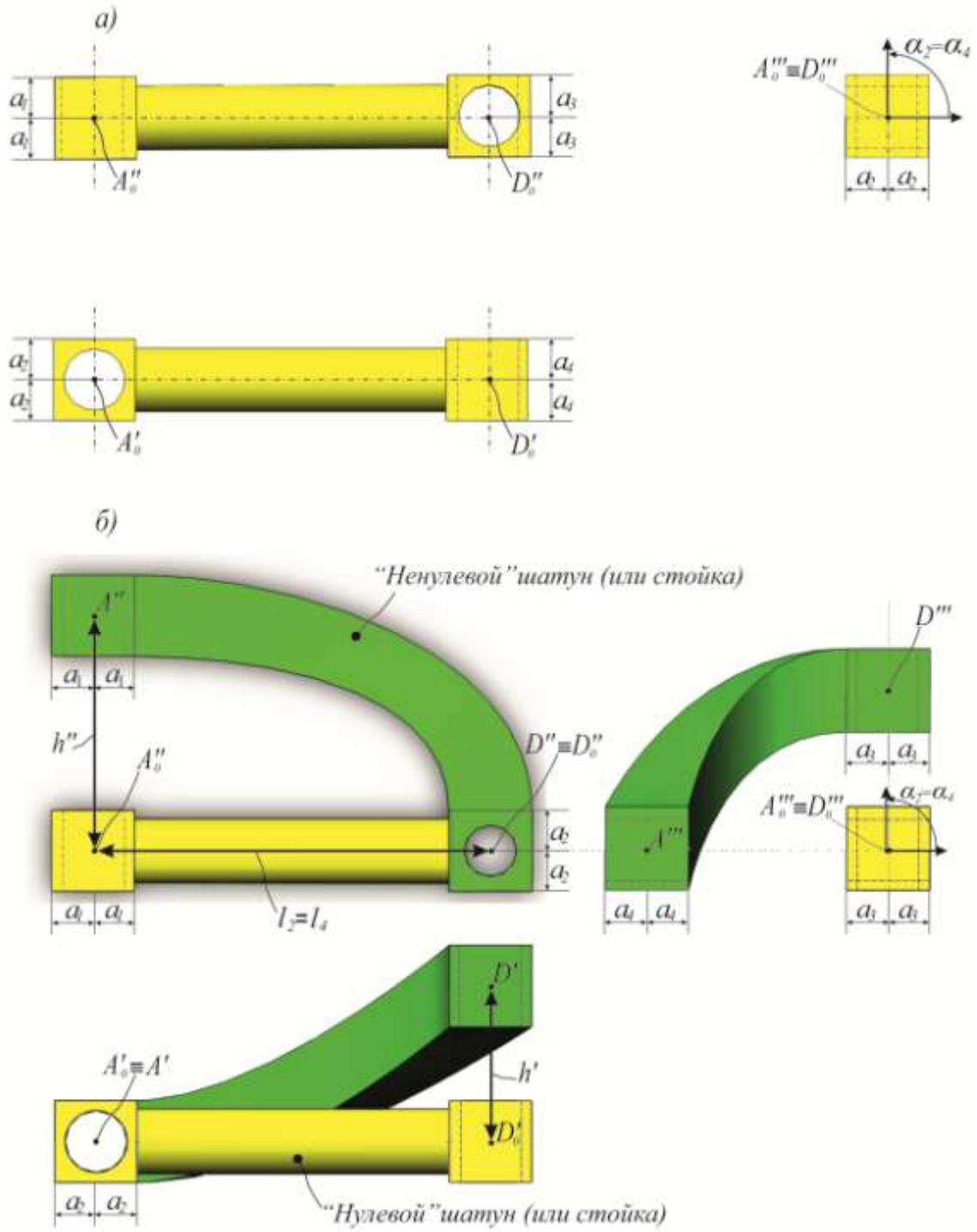


Рис. 2. Звено механизма Беннетта: а) “нулевой” шатун, б) взаимосвязь между “нулевым” и “ненулевым” звеном

Угол скрещивания между осями шарниров шатуна условимся считать положительным, если совмещение оси шарнира, отдаленного от наблюдателя по кратчайшему расстоянию, происходит против направления хода часовых стрелок. В качестве станины механизма Беннетта принимается звено, противолежащее шатуну. Как правило, стойка представляет собой “ненулевое” звено. Для удобства конструкции и

для упрощения технологии изготовления, угол скрещивания осей шарниров шатуна и стойки часто принимают равным 90^0.

2). Рассмотрим метод получения конструкции “ненулевых” кривошипов. Структурные параметры ведущего и ведомого кривошипов одинаковые:

- $l_1=l_3$– кратчайшее расстояние между осями шарниров (рис. 3)
- $\alpha_1=\alpha_3$–углы скрещивания осей шарниров этих звеньев (рис.3)

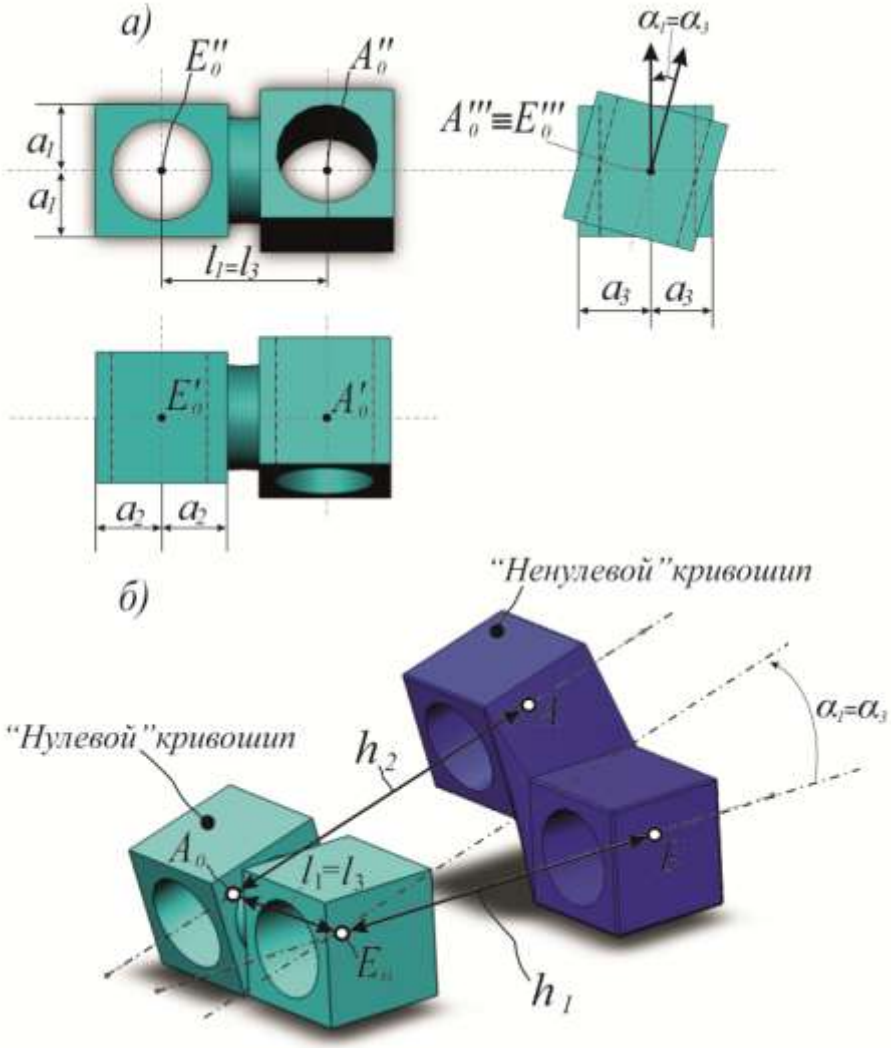


Рис. 3. Звено механизма Беннетта: а) “нулевой” кривошип, б) “ненулевой” кривошип во взаимосвязи с “нулевым”

На рисунке 3а показан “нулевой” кривошип в трех проекциях. На рисунке 3б “ненулевой” кривошип показан в аксонометрии во взаимосвязи с “нулевым” кривошипом: головки шарниров “ненулевого” кривошипа смещен на расстояние h_1 и h_2 соответственно. Таким образом, в полученном “ненулевом” кривошипе кратчайшее расстояние между осями шарниров $l_1 = l_3$ находится вне тела звена.

Примеры действующих устройств на базе механизма Беннетта с “нулевыми” и “ненулевыми звеньями”

На рисунке 4а представлена фотография действующей модели с “нулевыми” ведущим и ведомым кривошипами. Шатун и стойка являются “ненулевыми”($l_2=l_4$, $\alpha_2=\alpha_4=90^0$).

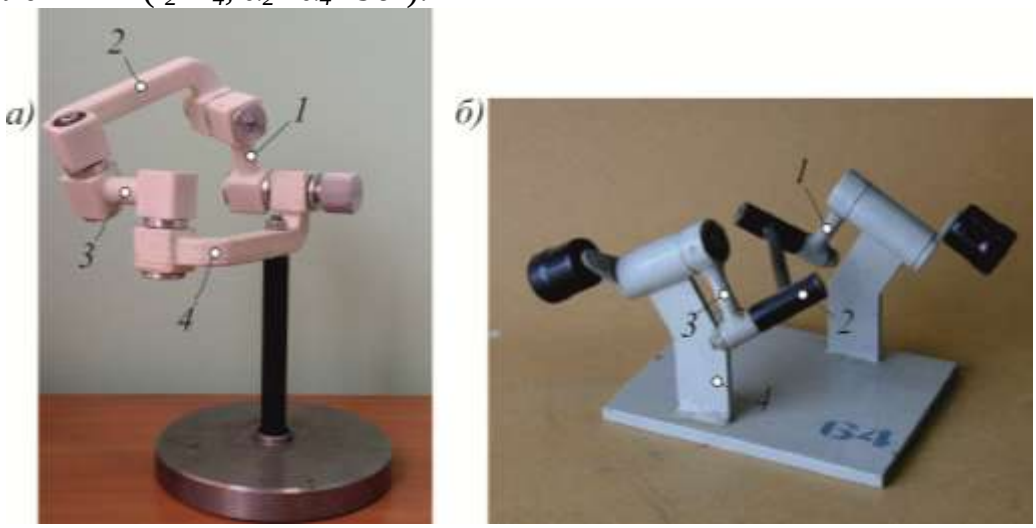


Рис. 4. Фотографии моделей механизма Беннетта:1-ведущий кривошип; 2- шатун; 3- ведомый кривошип; 4- стойка а) механизм с “ненулевыми” звеньями, б) механизм с “нулевыми” звеньями (А.Н.Ермак)

На рисунке 5, а представлена фотография устройства для мойки изделия на базе механизма Беннетта [13]. Здесь ведущий и ведомый звенья являются “ненулевыми”; шатун, использованный в качестве емкости для инерционной мойки, является “нулевым”. Стойка механизма - “ненулевое” звено со структурными параметрами шатуна.

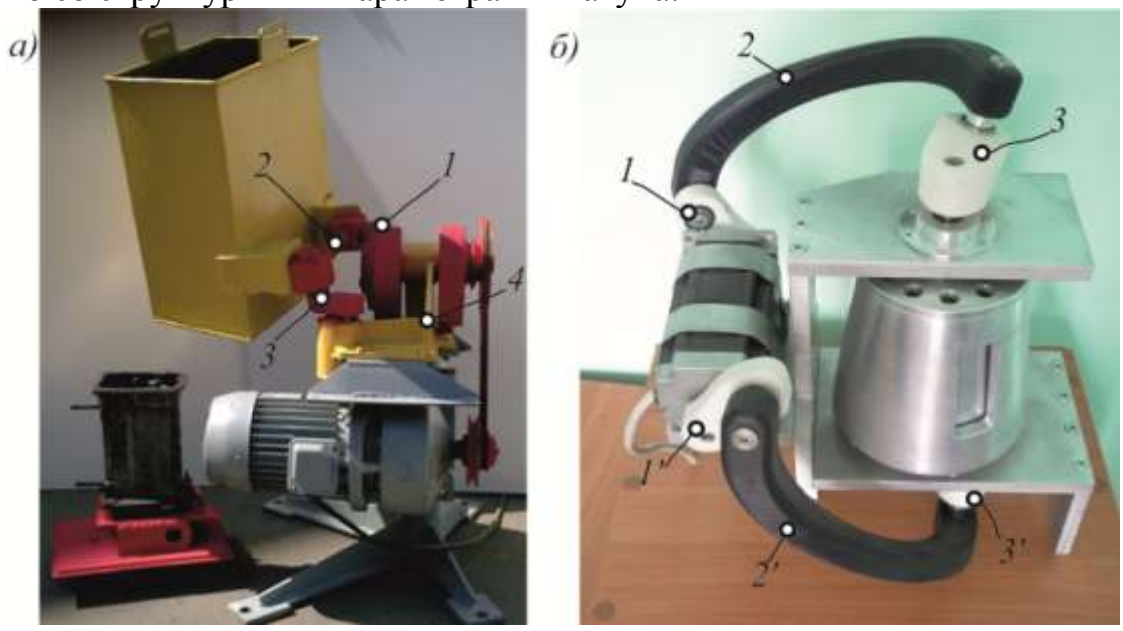


Рис. 5. Устройства на базе механизма Беннетта, 1-ведущий кривошип; 2- шатун; 3- ведомый кривошип; 4- стойка, а) устройство для инерционной мойки изделий, б) дезинтегратор неравномерного дробления

На рисунке 5, б представлена фотография действующей модели [14] двухподвижного дезинтегратора, разработанного на основе патента РФ № 2581487. Приводными механизмами этого устройства являются параллелограмм (верхний привод) и антипараллелограмм (нижний привод) механизма Беннетта.

Здесь в связи с необходимостью обеспечения проворачиваемости приводов все звенья выполнены “ненулевыми”. Такое конструктивное исполнение механизма Беннетта позволяет реальное проворачивание без наложений и заеданий [https://www.youtube.com/watch?v=vTu0r9o81KY].

Заключение

1) Теоретическими условиями проворачиваемости механизма Беннетта являются:

- противоположенные звенья механизма Беннетта одинаковые: $l_1=l_3$, $l_2=l_4$, $\alpha_1=\alpha_3$,$\alpha_2=\alpha_4$;
- концы кратчайших расстояний соседних звеньев совпадают;
- выполняется пропорция:

$$\frac{l_1}{l_2}=\pm\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}.$$

2) Практическими условиями проворачиваемости механизма Беннетта являются то, что как минимум два звена необходимо выполнить “ненулевыми”, например:

а) оба кривошипа (и ведущий и ведомый) выполнены как “ненулевые”, шатун и стойка “нулевые” (рис. 4, а);

б) шатун - “нулевой”, оба кривошипа и стойка “ненулевые” (рис. 5,а);

в) все четыре звена механизма (оба кривошипа, шатун и стойка являются “ненулевыми” (рис. 5, б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bennett G.T. A new mechanism. Engineering, London, 1903, p.777-778.
2. Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф. Кинематика двухподвижного дезинтегратора с приводом на базе пространственных 4R механизмов.//Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. - 2015. №1.- С.108-111.
3. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами, Казанский сельскохозяйственный институт имени М.Горького, 1976 г.
4. М.Г. Яруллин, М.Р. Мингазов. Синтез структурных модификаций механизма Беннетта// Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. № 4. – с. 271-280.

5. Яруллин М.Г., Мингазов М.Р. Кинематика характерных точек рабочих звеньев пространственного 4R-механизма как активатора процессов перемешивания.// Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014, 3 (63), с. 34-38.
6. Хабибуллин Ф.Ф., Яруллин М.Г., Мингазов М.Р. Дезинтегратор с управляемым режимом дробления// Автоматизация и энергосбережение Машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования. Материалы X международной научно-технической конференции, 24-25 марта 2015 г. М-во образ. и науки РФ ; Вол. гос. ун-т. – Вологда, 2015.- с. 209-213.
7. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями / Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 123. С. 170-176.
8. Дворников Л.Т. Нетрадиционные рассуждения о существовании механизма Беннетта/Теория механизмов и машин. 2009. №1(13)с.5-10.
9. Евграфов А.Н. Расчет геометрических и кинематических параметров пространственного рычажного механизма с избыточной связью /А.Н.Евграфов, Г.Н. Петров // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. No3. с.3-8.
10. Galiullin R.R., Sachenkov O.A., Khasanov R.F. and Andreev P.S. Evalution of external fixation device stiffness for rotary osteotomy // International Journal of Applied Engineering Research Vol.10 №24 pp. 44855-44860.
11. Андреев П.С., Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Яшина И.В. Математическое моделирование ротационной флексионной остеотомии // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 18-21.
12. Яруллин М.Г., Исянов И.Р. Двухподвижный пятизвенный рычажный механизм//Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2015. Т. 71. № 2. С. 97-102.
13. Яруллин М.Г. Интенсификация очистки изделий в погружных моечных машинах на базе пространственных механизмов: Автореферат дисс. Докт. Тех. Наук: 05.20.03./ М.Г.Яруллин. – М.: МГАУ. 2002. – 35с.
14. Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф. Разрушающий момент дробления двухподвижного дезинтегратора/ В сборнике: Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2015» Международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации Российский фонд фундаментальных исследований Министерство образования и науки Республики

Татарстан Академия наук Республики Татарстан Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ) Лаборатория МФТП (КНИТУ-КАИ). 2015. С. 180-185.

M.G. Yarullin[1], F.F. Khabibullin[2]

THEORETICAL AND PRACTICAL CONDITIONS UNDERSTEER MECHANISM BENNETT

[1,2]KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY named after A.N.TUPOLEV, Russia;

Abstract

The paper investigates theoretical and practical conditions of mechanisms workability. The specific links design, which allows to make full-reverse no-collision rotation of mechanisms crank is defined. This work shows design features of a "zero" and "nonzero" links. The paper analyzes full-reverse rotation ability of the studied devices based on the parallelogram and the anti-parallelogram modifications of Bennett's linkage. Finally, practical conditions of full-reverse rotation ability of this mechanisms are formulated.

Keywords: mechanism Bennett, conditions understeer, "zero" link, "non-zero" link.

REFERENCES

[1] Bennett GT (1903), A new mechanism. Engineering 76:777-778
[2] Yarullin MG, Khabibullin FF, Kinematics two movable disintegrator drive-based 4K spatial mechanisms. Vestnik KGTU n.a. A. N. Tupolev. -№.1. Pp. 108-111. (rus.).
[3] Mudrov PG (1976) Spatial mechanisms with rotational pairs. Publishing House of Kazan University.Kazan, – 264 p. (rus.).
[4] Yarullin MG, Mingazov MR , (2014) Synthesis of structural modifications Bennett mechanism. The modern machinery. Science and Education: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. In:Scientific and technical news of SPbPU. Publishing of the Polytechnic University, St-Peterburg, No 4. - with. Pp. 271-282.
[5] Yarullin MG, Mingazov MR (2014) Kinematics of the characteristic points of the working parts of the spatial 4R-mechanism as an activator of mixing processes . Herald of Izhevsk State Technical University. Publishing House of the Izhevsk State Technical University named after M. Kalashnikov, 3 (63). Pp. 34-38.
[6] Khabibullin, FF, Yarullin MG, Mingazov MR (2015) Disintegrator with controlled regime crushing. Automation and energy saving engineering and

metallurgical industries, technology and reliability of machines, devices and equipment. Publishing of the Vol. state. Univ. Pp. 209-213.
[7] Hrostitsky AA Evgrafov AN Tereshin VA (2011) The geometry and kinematics of spatial six-bar mechanisms with excess links. In:Scientific and technical news of SPbPU. Publishing of the Polytechnic University, St-Peterburg, vol 2 (123). Pp. 170-176. (rus.)
[8] Dvornikov LT (2013) Non-traditional arguments about the existence of Bennett mechanism. Theor Mach Mech 1 (13):5-10. (rus.).
[9] Evgrafov AN (2013) Calculation of geometric and kinematic parameters of the spatial linkage with redundant links. Problems of mechanical engineering and machine reliability. No3. Pp.3-8.
[10] Galiullin RR, Sachenkov OA, Khasanov RF and Andreev PS (2012) Evalution of external fixation device stiffness for rotary osteotomy. International Journal of Applied Engineering Research Vol.10 №24 Pp. 44855-44860.
[11] Andreev PS, Konoplev YG Sachenkov OA, Hasanov RF, Yashina IV (2014) Mathematical modeling of rotary flexion osteotomy. Scientific and Technical Vestnik Volga № 5. Pp. 18-21. (rus.).
[12] Yarullin MG, Isyanov IR (2015). Two movable five-link. Vestnik KGTU n. a. A. N. Tupolev. No. 2 Pp. 97-102. (rus.)
[13] Yarullin MG (2002) Intensification of cleaning products in the immersion washing machines on the basis of spatial mechanisms: Abstract of the thesis of Doctor of Technical Sciences: 05.20.03./ M.G.Yarullin. - M .: MSAU. – 35 p.
[14] Yarullin MG, Khabibullin FF (2015) Destructive moment crushing two movable disintegrator. In the collection: Problems and Prospects of aviation, Land Transport and Energy "ANTE-2015" International Scientific-Technical Conference. Publishing House of the Kazan National Research Technical University. AN Tupolev-KAI. Pp. 180-185.

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

УДК 62-762.4, 62-762.8, 678 ; DOI 10.1872/MMF-2016-31

А.А.Ашейчик[1], В. Л. Полонский[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ РЕЗИНОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ШКИВОВ ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]Анатолий Анатольевич Ашейчик, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-64-29, E-mail: aseichik52@mail.ru.

[2] Владимир Львович Полонский, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-64-29, E-mail: Vladidir.polonsky@gmail.com.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы выбора составов резин для создания резиновых покрытий на рабочей поверхности тяжелонагруженных шкивов морского оборудования при контакте с полимерным тросом. Для оценки долговечности резиновых покрытий и оптимизации их формы использовался метод конечных элементов. Составы резин оценивались экспериментально по их трибологическим свойствам и нагрузочной способности.

Ключевые слова: резина, трос, шкив, метод конечных элементов интенсивность изнашивания, коэффициент трения, предельное контактное давление.

В современном морском оборудовании для подъема грузов широко применяются полимерные тросы с грузоподъемностью до 60 тонн [1, 3]. Для создания требуемой тяговой способности поверхность стального шкива при контакте с полимерным тросом имеет резиновое покрытие [2, 12,13,14,15]. В данном случае с резиной контактировал трос из высокомодульного полиэтилена (НМРЕ), состоящий из 12×12 прядей. Диаметр шкива был равен 1,9 м.

Целью данной работы являлся выбор из 5 составов резин лучшего состава по критериям наибольшего коэффициента трения (тяговая способность), высокой износостойкости (долговечность по износу), нагрузочной способности (отсутствие катастрофического износа резины) и

долговечности поверхностного слоя резины (отсутствие усталостных трещин за весь срок службы). Исследовались 4 резины российских производителей: марки РМ; Л2-18; Л2-26; 1068 и одна норвежская резина марки 73979 [3, 5, 10,12,14].

Использование метода конечных элементов (МКЭ) [3, 8, 9,] позволило создать конечно-элементную модель контакта троса с поверхностью резинового слоя на шкиве и оптимизировать форму резинового слоя по критериям прочности, износостойкости и долговечности.

Рассматривался резиновый слой, изображенный на рис.1. Вогнутая поверхность позволяет выровнять контактные напряжения по поверхности контакта и понизить максимальные контактные напряжения.

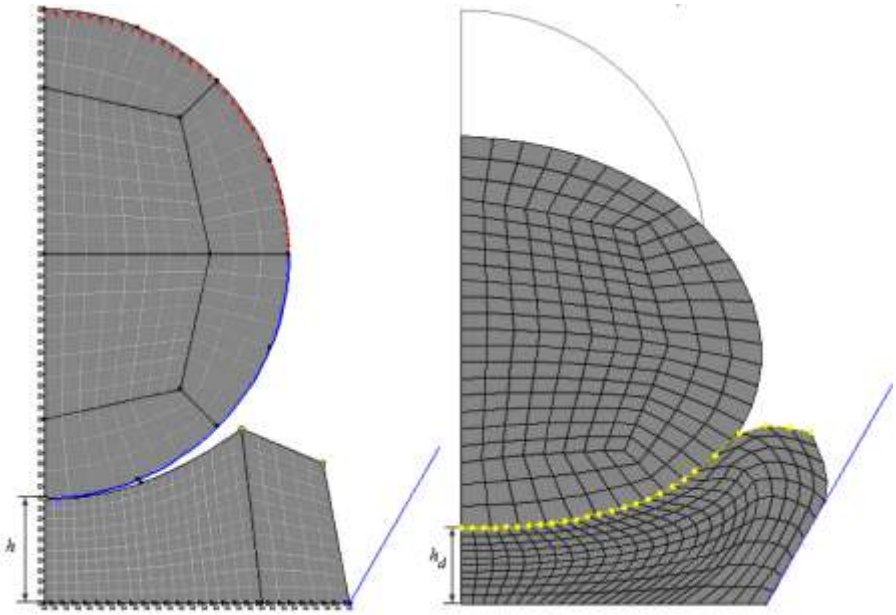


Рис.1. Модель и деформированная модель сжатия тросом резиновой подушки

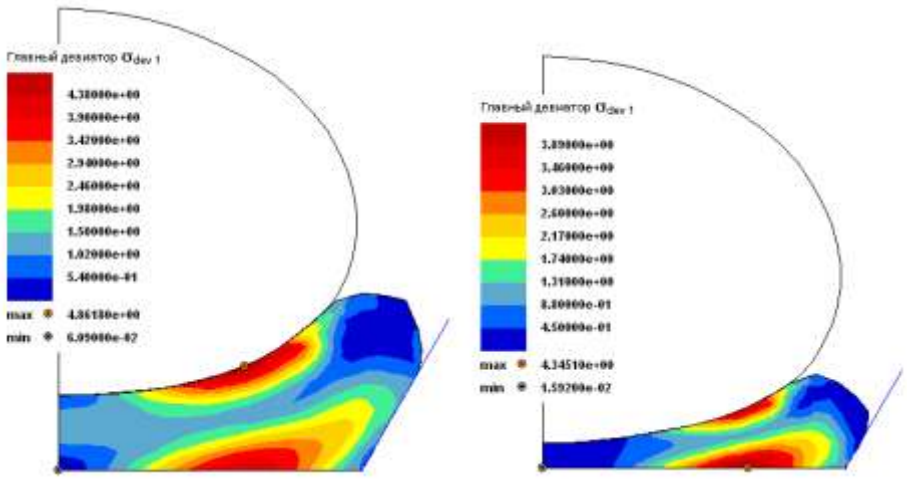


Рис.2. Поле главного девиатора напряжений резиновой подушки

Рассматривались резиновые покрытия разной толщины: h = 3 мм, h = 12 мм, h = 22 мм. Для всех резин определялись максимальные напряжения при пиковой нагрузке и оценивался коэффициент запаса прочности К. На рис.2 показан главный девиатор напряжений (компонента тензора напряжений, ответственная за прочность) для h =12 мм (слева) и h = 3 мм (справа). Одним из важных результатов расчета являются контактные напряжения. На рис.3 показаны контактные напряжения для пиковой нагрузки (слева) и номинальной нагрузки (справа) при h = 12 мм.

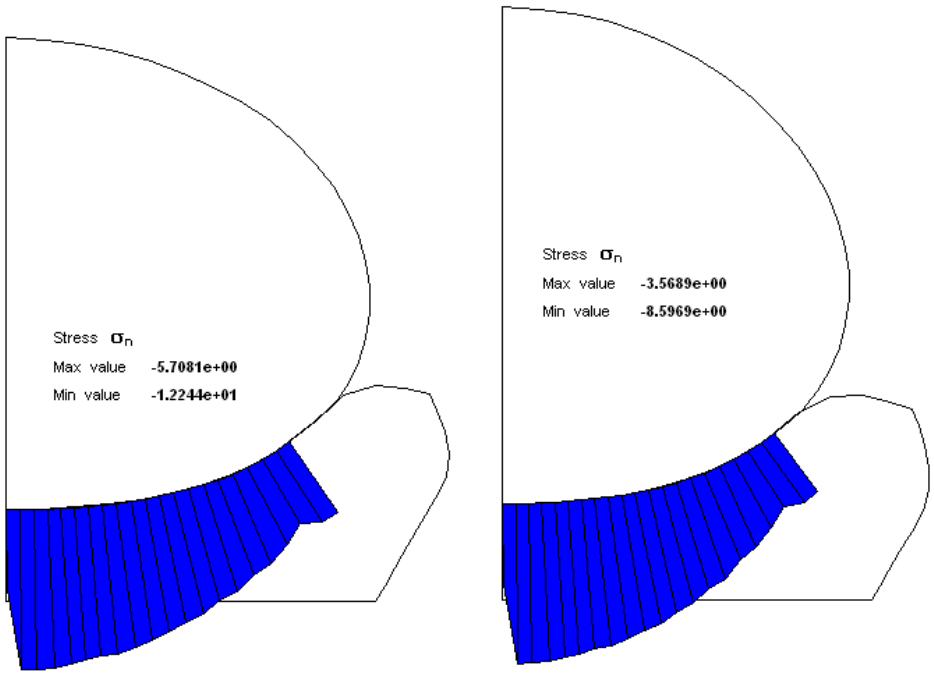


Рис.3. Контактные напряжения между резиной и шкивом

Определялись также сдвиговые напряжения σ_{xy} для продольной секции. Результаты прочностного анализа для резины Л2-26 приведены в табл. 1

Таблица 1

Основные результаты прочностного расчета для резин 73975 и Л2-26

Толщина слоя резины	σ_{dev1}, МПа	σ_{xy}, МПа	σ, МПа	K для 73975	K для 73975
h = 3 мм	4,35	2,87	6,53	16,2	10,1
h = 12 мм	4,86	1,01	7,29	14,5	9,02
h = 22 мм	5,26	1,05	7,89	13,4	8,30

Установлено, что все варианты формы резиновой подушки обладают достаточным запасом прочности. С увеличением толщины слоя возрастают напряжения σ_{dev1} в поперечном сечении. Сдвиговые напряжения σ_{xy} с ростом слоя сначала уменьшаются, потом остаются неизменными. Из этого можно сделать вывод, что по критерию прочности оптимальным является сечение с вогнутой внешней поверхностью при h = 12 мм. Использовать можно резины 73975 и Л2-26, но предпочтительнее первую из-за более высокой прочности.

Для определения долговечности, как времени работы до появления первых трещин, рассматривался процесс нагружения резиновой подушки во времени. Рассматривалось только поперечное сечение. Резина подвергается периодическому нагружению. В течение половины оборота шкива резина разгружена. Вторую половину оборота она сжимается усилием, соответствующим номинальному нагружению. Это соответствует импульсному характеру нагружения с частотой f =0,125 Гц. При этом происходит саморазогрев резины. Таким образом, на долговечность влияет два фактора: напряжения и температура.

Поле температур саморазогрева показано на рис.4 При h = 12 мм (на рис.4, слева) максимальная температура саморазогрева ΔT = 10,3°С. При h = 22 мм (на рис.4 справа) максимальная температура саморазогрева ΔT = 33,.4°С. С увеличением резинового слоя наблюдается значительный рост температуры.

Для определения долговечности используется термофлуктуационная теория прочности. На долговечность, кроме напряжений и температуры саморазогрева влияет температура окружающей среды T_{am}. Расчеты производились для двух значений температур окружающей среды: $T_{am} = 0°C$, $T_{am} = 20°C$. В табл. 2 приведены результаты расчета на долговечность при номинальном нагружении.

Таблица 2

Результаты расчета на долговечность

Толщина слоя резины	ΔT, °C	$T_{am} = 0°C$		$T_{am} = 20°C$	
		lg τ, с	S, км	lg τ, с	S, км
h = 3 мм	2,97	9,60	2990000	8,52	237000
h = 12 мм	10,3	9,15	1060000	8,02	75000
h = 22 мм	33,4	8,50	237170	7,60	29800

Поле долговечности для $T_{am} = 0°C$ и h = 12 мм и h = 22 мм показано на рис.5. По критерию долговечности оптимальным является тонкий резиновый слой h = 3мм. Но и при h = 12 мм долговечность вполне

приемлема. Расчетный пробег троса со шкивом при $T_{am} = 20°C$ составляет $S = 75000$ км (см. табл.2). При $h = 22$ мм и $T_{am} = 20°C$ пробег до разрушения резины составляет $S = 29800$ км. Это в два раза ниже требуемого пробега троса со шкивом [S] = 60000 км.

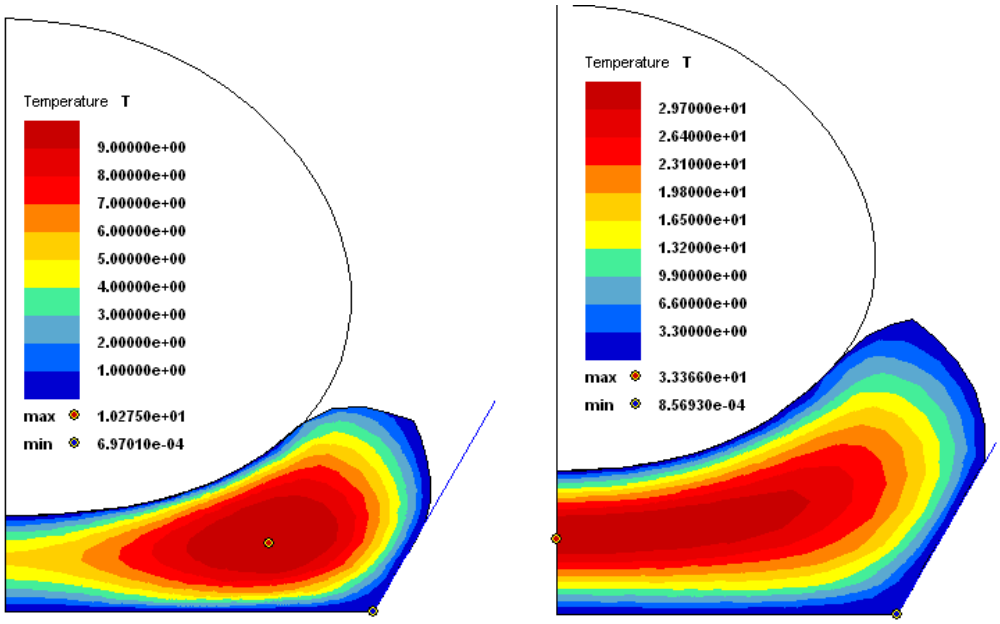


Рис. 4. Поле температур саморазогрева

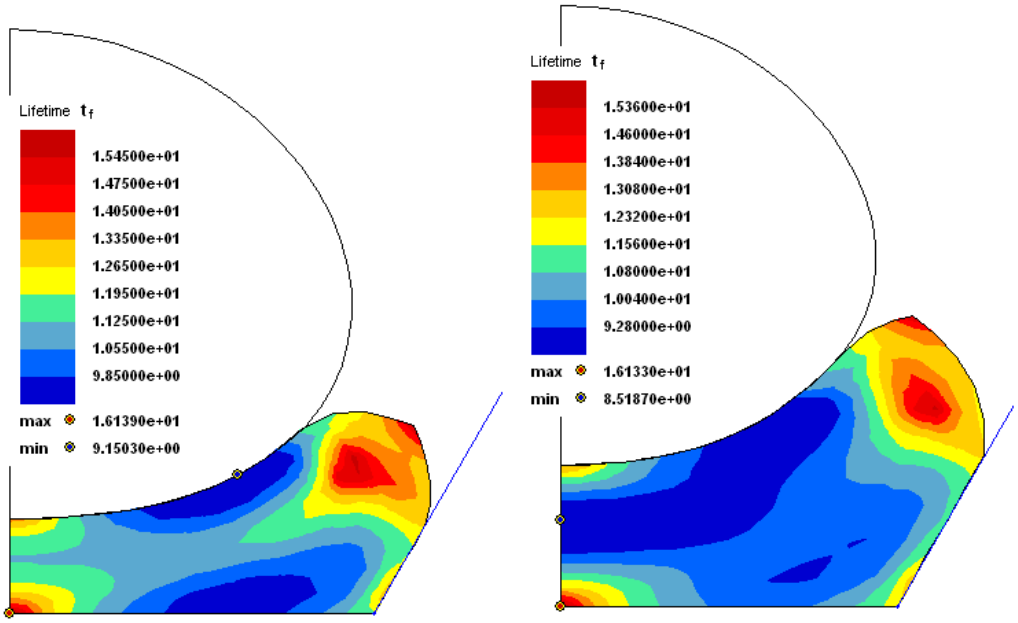


Рис.5. Поле долговечности

Созданные конечно-элементные модели с использованием программы STAR контакта троса с резиной при заходе троса на шкив на внешнем (рис.6) и внутреннем краях шкива и сходе с него позволяют при наличии

экспериментальных данных по коэффициентам трения и интенсивностям изнашивания оценивать износ резины через сдвиговые деформации слоев и рассчитать долговечность резинового покрытия шкива для всех резин с точки зрения износостойкости.

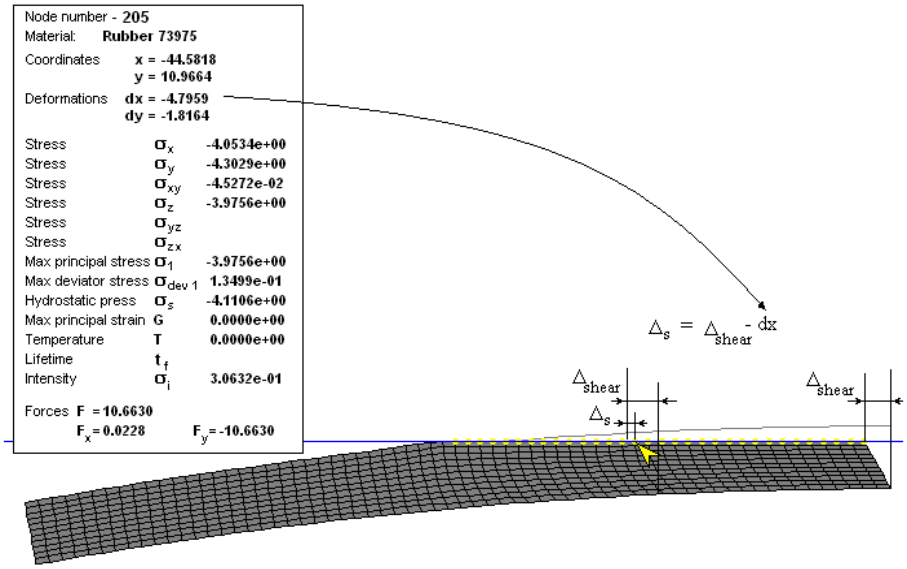


Рис.6. МКЭ модель изнашивания на внешнем краю шкива

Установлено, что скольжения троса в осевом и окружном направлении относительно шкива для всех резин нет. По всему шкиву наблюдается трение покоя. Однако в момент входа троса в контакт со шкивом и выхода из него будет относительное смещение (частичное проскальзывание резины и троса). Именно это и вызовет износ резины. В ходе расчета определялись величина пути скольжения Δ_s.и максимальная величина изнашиваемого слоя Δh. В табл. 3 приведены результаты расчетов пути трения S для норвежской резины 73975 и отечественной резины марки Л2-26 при среднем контактном давлении $\sigma_n = 4{,}3$ МПа.

Таблица 3

Результаты расчетов на износ

Толщина слоя резины	Δ_s, Выход + вход, мм	Δh, мм	S, км 73975	S, км Л2-26
h = 3 мм	1,31	0,5	95	16300
h = 12 мм	0,94	7	1850	317500
h = 22 мм	1,62	17	2640	453000

Из табл. 3 следует, что оптимальным с точки зрения износа является резиновый слой с h =22 мм. При использовании норвежской резины 73975 ни один из рассматриваемых слоев не позволяет достичь требуемого пробега троса [S] = 60000 км. При использовании резины Л2-26 требуемый пробег троса достигается и для случая h =12 мм, и для h = 22 мм. Но при увеличении толщины резинового слоя от 12 мм до 22 мм ресурс растет медленно. Это связано с тем, что растет толщина изнашиваемого слоя Δh, но вместе с тем растет и путь трения Δ_s.

Очевидно, что использование созданных МКЭ моделей изнашивания возможно только при наличии экспериментальных данных по интенсивности изнашивания. Экспериментальное исследование износа и коэффициента трения резин проводилось на стенде возвратно-поступательного трения [4, 6, 7,]. Все результаты исследований приведены в табл.4. Кроме того, экспериментально установлено, что при определенном давлении установившийся режим изнашивания (линейная зависимость) переходит в катастрофический. Величина критического давления для исследованных резин $p_{пред}$, также приведена в табл.4, где за критические давления условно были приняты давления, при которых интенсивность изнашивания достигала $1{,}0 \cdot 10^{-5}$. По нашим наблюдениям это соответствовало началу отделения макрочастиц резины.

Таблица 4

Таблица результатов исследований коэффициентов трения и интенсивности изнашивания резин

Резина	Коэффициент трения, μ		Интенсивность изнашивания, I		Предельное давление $p_{пред}$, МПа
	p = 2,5 МПа	p = 4,4 МПа	p = 2,5 МПа	p = 4,4 МПа	
73975	0,31	0,25	$7{,}8 \cdot 10^{-7}$	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	3,92
РМ	0,39	0,31	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$	$9{,}9 \cdot 10^{-4}$	2,81
Л2-18	0,28	0,22	$4{,}3 \cdot 10^{-7}$	$7{,}8 \cdot 10^{-4}$	4,53
Л2-26	0,24	0,19	$0{,}48 \cdot 10^{-7}$	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$	10,2
1068	0,27	0,23	$2{,}3 \cdot 10^{-7}$	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	5,90

Таким образом, расчеты с использование метода конечных элементов показали, что оптимальным является вогнутый профиль при толщине слоя резины h = 12 мм и использование резины марки Л2-26 российского производителя. Экспериментально-теоретическое исследование износостойкости и нагрузочной способности различных резиновых покрытий на шкивах позволило рекомендовать для наиболее нагруженных шкивов при давлении на поверхности резины 4 - 9 МПа резину Л2-26,

хотя она и имеет не самый высокий коэффициент трения (ниже 0,3). Для менее нагруженных шкивов при давлении на поверхности резины 2,5 – 4 МПа можно использовать резину 1068, которая обеспечит работоспособность с заданным ресурсом по пути трения и при этом даст большую тяговую способность, чем резина Л2-26, благодаря более высокому коэффициенту трения. Резину 73975 можно использовать только для малонагруженных шкивов при давлениях менее 2,5 МПа.

Для обеспечения безопасности в начале эксплуатации новых шкивов с резиной следует или эксплуатировать узел при неполном нагружении или провести специальную приработку перед началом эксплуатации. При этом напряжения по ширине площадки контакта выравниваются и достигнут примерно средних значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашейчик А.А., Чулкин С.Г. Экспериментальная механика: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 107 с.
2. Ашейчик А.А. Основы трибоники. – СПб.: Изд-во Изд-во Политехн. ун-та, 1995. – 116 с.
3. Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Экспериментальное исследование эластомеров и полимеров для нефтяной промышленности. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 236 с.
4. Ашейчик А.А. Детали машин и основы конструирования. Справочные материалы по проектированию: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.– 111 с.
5. Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Прогнозирование изменения физико-механических свойств эластомеров при термическом старении // Современное машиностроение. Наука и образование.– 2013.– №3. – С. 265-272.
6. Ашейчик А.А. Стенд для исследования трибологических свойств материалов//Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах. Материалы XIV Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. Сер.Труды СПбГПУ.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 – С. 139-140.
7. Ашейчик А.А., Бобков А.А. Исследование антифрикционных свойств карбонов // XLIV Неделя науки СПбПУ. Материалы научного форума с международным участием. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 67-69.
8. Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Влияние распределения контактных напряжений на утечки через торцевое уплотнение // Вестник СибГАУ. – 2015. – Т.16. – №3. – С.705-713.
9. Лазарев С.О., Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Вычислительная механика. Ч 2: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 122 с.
10. Чулкин С.Г., Ашейчик А.А., Селин С.Н. Использование композитных

материалов в узлах трения нефтяного оборудования – шаровой запорной арматуры и в кабелях-толкателях // Вопросы материаловедения. – 2012.– №4 (72). – С.240-244.
11. А.с. 923162 СССР, МКИ3 С 08 J 05/16. Антифрикционная полимерная композиция/ В. М. Лебедев, А. А. Ашейчик, А.Я. Башкарев, В.В.Букреев (СССР). – № 3210355/25–08; заявл. 01.12.80.
12. А.с. 10005443 СССР, МКИ(rus.) С 08 L 27/12. Вулканизируемая резиновая смесь/ В.М.Лебедев, Ю.К. Михайлов, А.А.Ашейчик, (СССР). – № 3236214/23–05; заявл. 15.01.81.
13. А.с. 1017002 СССР, МКИ(rus.)С 08 L 77/00. Антифрикционная полимерная композиция/ В. М. Лебедев, А.А. Ашейчик, А.Я. Башкарев, В.В.Букреев, В.П.Жогов (СССР). – № 3345937/23–05; заявл. 06.10.81.
14. А.с. 1246578 СССР, МКИ3 С 08 К 13/02. Резиновая смесь на основе фторкаучука/ В. М. Лебедев, А. А. Ашейчик, В.М. Радченко (СССР). – № 3585740/23–05; заявл. 23.02.83.
15. А.с. 1445162 СССР, МКИ3 С 08 L 27/18. Антифрикционная композиция / В.Г.Нижник, В.М. Лебедев, А.А. Ашейчик (СССР). – № 4052326/23–05; заявл. 08.04.86.

A.A.Asheichik, V.L.Polonsky

RESEARCH OF LOAD ABILITY OF RUBBER COVERINGS FOR SHEAVES OF THE LIFTING EQUIPMENT

St. Petersburg State Polytechnic University, Russia

Abstract

Questions of a choice of compositions of rubbers for creation of rubber coverings on a working surface of heavy duty sheaves of the sea equipment at contact with a polymeric cable are considered in article. For an assessment of lifetime of rubber coverings and optimization of their shape the finite elements method was used. Compositions of rubbers were estimated experimentally on their tribological properties and load ability.

Key words: rubber, rope, sheave, finite elements method, wear intensity, coefficient of friction, limiting contact pressure.

REFERENCES

[1] Asheychik A.A. Chulkin S.G. Experimental Mechanics: Proc. allowance. SPb. Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2008. 107 p. (rus.)

[2] Asheychik A.A. Basics triboniki. SPb. Publishing House of the Publishing House of the Polytechnic. University Press, 1995. 116 p. (rus.)
[3] Asheychik A.A., Polonsky V.L. Experimental study of elastomers and polymers for the oil industry. – SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2015. 236 p. (rus.)
[4] Asheychik A.A. Details of machines and bases of designing. References for the design: Textbook. allowance. SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2014. 111 p. (rus.)
[5] Asheychik A.A., Polonsky VL Predicting changes in the physico-mechanical properties of elastomers with the thermal aging // Modern engineering. Science and obrazovanie. – 2013. – №3. – P. 265-272. (rus.)
[6] Asheychik A.A. Stand for investigation of tribological properties of materials // Basic Research and innovation of national research universities. Proceedings of the XIV All-Russian Conference on Science and Higher Education. Ser.Trudy SPbGPU. – SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2010 – P. 139-140. (rus.)
[7] Asheychik A.A. Bobkov A.A. Study of anti-friction properties of carbonyl // XLIV Week SPbPU science. Materials Science Forum with international participation. - SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2015. – P. 67-69. (rus.)
[8] Asheychik A.A., Polonsky V.L. Influence of contact stress distribution for leakage through mechanical seal // Herald SibSAU. – 2015. – T.16. – No. 3. – P.705-713. (rus.)
[9] Lazarev S.O., Asheychik A.A., Polonsky V.L. Computational Mechanics. Ch 2: Proc. allowance. - SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2007. – 122 p. (rus.)
[10] Chulkin S.G., Asheychik A.A., Celin S.N. The use of composite materials in the friction nodes oil equipment - ball valves and cables-pushers // Problems of Materials Science. – 2012 – №4 (72). – P.240-244. (rus.)
[11] A.s. 923162 USSR MKI3 C 08 J 05/16. Antifriction polymer composition / V.M. Lebedev, A.A. Asheychik, A.J. Bashkarev, V.V.Bukreev (USSR). – № 3210355 / 25-08; appl. 01.12.80. (rus.)
[12] A.s. 10005443 USSR, MKI (rus.) C 08 L 27/12. Vulcanized rubber composition / V.M.Lebedev, J.K. Mikhailov, A.A.Asheychik (USSR). – № 3236214 / 23-05; appl. 01.15.81. (rus.)
[13] A.s. 1017002 USSR MKI (rus.) C 08 L 77/00. Antifriction polymer composition / V.M. Lebedev, A.A. Asheychik, A.J. Bashkarev, V.V.Bukreev, V.P.Zhogov (USSR). – № 3345937 / 23-05; appl. 06.10.81. (rus.)
[14] A.s. 1246578 USSR MKI3 C 08 K 13/02. The rubber compound based on FPM / V.M. Lebedev,, A.A. Asheychik, V.M. Radchenko (USSR). – № 3585740 / 23-05; appl. 02.23.83. (rus.)
[15] A.s. 1445162 USSR MKI3 C 08 L 27/18. Antifriction composition / V.G..Nizhnik, V.M. Lebedev, A.A., Asheychik (USSR). – № 4052326 / 23-05; appl. 8.4.86. (rus.)

УДК 631.85 ; DOI 10.1872/MMF-2016-32

Д.Т.Бабичев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ ОСНОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ УЗЛОВ МАШИН НА ПРИМЕРЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ “РЕМЕННЫЕ ПЕРЕДАЧИ”

Дмитрий Тихонович Бабичев, д.т.н., профессор ТюмГНГУ
Тюменский индустриальный университет (ранее – ТюмГНГУ)
Россия, Тюмень
Тел. раб: (345)2 28 33 54
E-mail: babichevdt@rambler.ru.

Аннотация

На кафедре прикладной механики Тюменского индустриального университета (до 2016 года – нефтегазового университета ТюмГНГУ) автором в течение 25 лет используется система Excel MS Office при создании компьютерных программ, предназначенных для учебного процесса. В работе описана одна из последних программ – «Проектирование и расчет клиноременных передач». Особенности программы: **1.** Основа расчета – ГОСТ 1289.2–89; дополнительный расчет – нахождение долговечности ремней. **2.** Результат расчета – пояснительная записка (6 страниц формата А4), содержащая: краткие пояснения; все использованные нормативные таблицы или выдержки из них; все расчетные формулы и результаты вычислений; изображения нескольких спроектированных передач. Эта записка может использоваться студентами при подготовке к зачетам и экзаменам в качестве: методического пособия или краткого конспекта лекций по расчету ременных передач. **3.** Все диаграммы и таблицы в записке «живые» – в них выделены заливкой выбранные элементы. **4.** Предусматривается два режима работы программы: автоматический и ручной. При автоматическом режиме, все данные из таблиц выбираются программно, и работа пользователя сводится лишь к вводу главных исходных данных и к уточнению параметров передачи, обеспечивающих заданную долговечность ремней. При ручном режиме, все данные из таблиц выбирает пользователь (используя подсказки заливкой). В статье: дан пример пояснительной записки; указаны направления совершенствования программы; обсуждены результаты. В целом, программа оправдывает возлагаемые на неё ожидания.

Ключевые слова: детали машин, прикладная механика, проектирование, клиноременные передачи, преподавание технических дисциплин.

В последние 2-3 десятилетия учебные планы в вузах претерпели серьёзные изменения. Объём часов, отводимых на изучение общетехнических дисциплин, существенно сократился. В разы уменьшились объёмы курсо-

вого проектирования, а расчетно-графических работ. Всё это, а также: новые требования к компетенциям выпускников со стороны работодателей; снижение уровня школьной подготовки и падение интереса к изучению теоретических и общетехнических дисциплин, заставляет преподавателей втузов корректировать содержание традиционных общеинженерных курсов [1, 2], и совершенствовать методики преподавания. В том числе, за счет внедрения компьютерных и информационных технологий [3, 4].

Для внедрения компьютерных технологий при решении типовых инженерных задач необходимо соответствующее программное обеспечение (ПО). Многие вузы создают собственные учебное ПО, используя для этого доступные и недорогие системы: Excel MS Office и MathCAD [5, 6, 7, 8]. Необходимость создания такого ПО объясняется не только дороговизной и недоступностью мощных универсальных пакетов , используемых на предприятиях (ANSYS, ProEngineer, КОМПАС и др.), но и специфическими требованиями к *учебному* ПО. Учебное ПО должно обеспечить не только быстрое получение надёжных и оптимальных решений (что надо и производственникам), но и: **1)** способствовать раскрытию и освоению *физического смысла* выполняемых расчетов; **2)** *знакомить с методиками стандартных расчетов* типовых узлов и механизмов; **3)** помогать в *освоении стандартных и общепринятых методов* анализа, синтеза и проектирования; **4)** *обучать приёмам* компьютерной оптимизации конструкций и др.

В работе описана программа для проектирования и расчета клиноременных передач, созданная и опробованная в 2015 году. Её особенности:

1. Основные расчеты выполняются по методике из **ГОСТ 1284.3**-96 [9] и по нормативам из ГОСТ 1289.1–89 и **ГОСТ 20889**-88 [10–11].
2. Долговечность ремней определяется по методике и формулам из [12].
3. Часть вспомогательных расчетов проводится по формулам из [13–16].
4. Предусматривается два режима работы программы: автоматический и ручной. *При автоматическом режиме*, все данные из таблиц выбираются программно, и работа пользователя сводится лишь к вводу главных исходных данных и к уточнению параметров передачи, обеспечивающих заданную долговечность ремней. *При ручном режиме*, все данные из таблиц выбирает пользователь (используя подсказки заливкой).
5. Результат расчета – пояснительная записка (6 страниц формата А4), содержащая: краткие пояснения; все использованные нормативные таблицы или выдержки из них; все расчетные формулы и результаты вычислений; изображения нескольких спроектированных передач. Диаграммы и таблицы в записке «живые» – в них выделяются жёлтой заливкой выбранные элементы. Эта записка может использоваться студентами при подготовке к зачетам и экзаменам в качестве: методического пособия или краткого конспекта лекций по расчету ременных передач.

На следующих 6-ти страницах приведёна пояснительная записка, как пример расчета клиноременной передачи в *автоматическом* режиме.

Приложение В.1 **ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ КЛИНОРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ**

В	Подразделение ТИУ	Группа	Фамилия	Дата и время
	Головной вуз	СПбзу-14-1	Иванов А.Б.	16.04.2016 7:36

В программе реализована методика проектирования клиноременных передач по ГОСТ 1284.3–96. Долговечность ремней определяется по методике, изложенной в работе: Кудрявцев В.Н. и др. Курсовое проектирование деталей машин, 1984. –400 с.

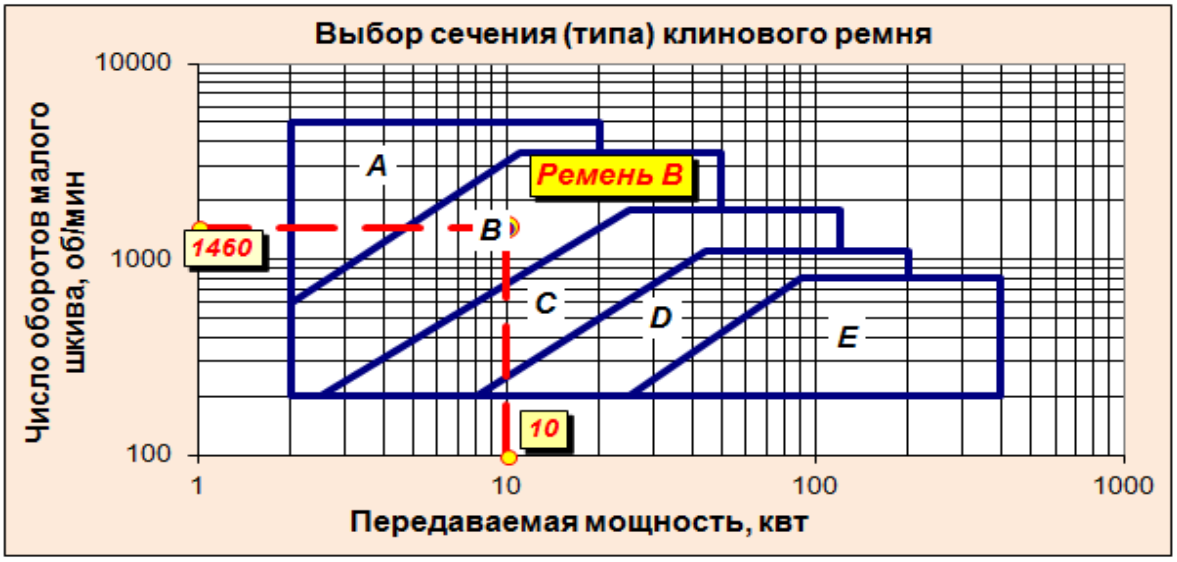
Вызов Пульта

1. Основные исходные данные для расчета передачи

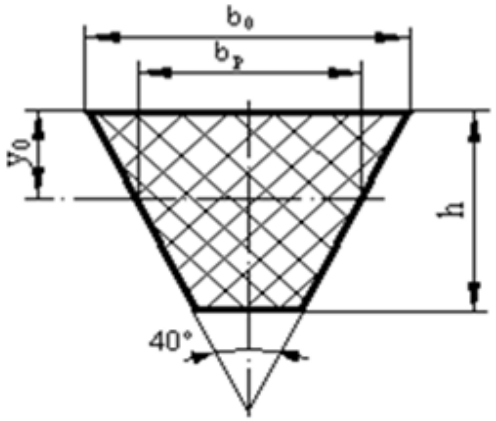
	Параметры и их обозначения			Ввод данных	Размер-ность	По умол-чанию	Принято в расчетах
1	Мощность на малом шкиве		P_1	10,00	квт	8	10
2	Частота вращения малого шкива	оборотов в минуту	n_1	1460	об/мин	975	1460
		радиан в секунду	ω_1		рад/сек	152,89	152,89
3	Передаточное отношение		i	2,8		5	2,8
4	Требуемая долговечность ремней		L_h	4000	часов	5000	4000

2. Последовательность и основные результаты расчета передачи

Шаг 1. По номограмме из ГОСТ 1284.3-96, представленной ниже, находим сечение ремня



Шаг 2. Из таблицы 1, представленной на следующей странице: берём размеры и площадь сечения ремня и назначаем диаметр d_1 малого шкива. Затем вычисляем: диаметр d_2 большого шкива, фактическое передаточное отношние i и его погрешность Δi



Параметры и их обозначения		Ввод данных	По умол-чанию	Принято в расчетах
1. Сечение ремня			B	B
2. Размеры и площадь сечения ремня	b_0, мм		17	17
	h, мм		10,5	10,5
	y_0, мм		4	4
	S, см^2		1,88	1,88
3. Расчетный диаметр малого шкива, мм	d_{1min}		125	125
	d_{1max}		180	180
	d_1		160	160
4. Диаметр большого шкива, мм	$d_2 = i \cdot d_1/1{,}01 =$		443,6	
	d_2		450	450
5. Фактическое передаточное отношение $i_{факт} = 1{,}01 * d_2/d_1$	$i_{факт}$	2,8406	Δi	1,45%

Параметры стандартных клиновых ремней нормальных сечений Таблица 1

Сечение ремня	Размеры и площадь сечения				Стандартные длины ремней		Рекомендуемые расчетные диаметры малого шкива			
	b_0, мм	h, мм	y_0, мм	S, см^2	Min	Max				
Z	10	6	2,1	0,47	400	2500	63	71	80	90
A	13	8	2,8	0,81	560	4000	100	112	125	140
B	**17**	**10,5**	**4**	**1,88**	**800**	**6300**	**125**	**140**	**160**	**180**
C	22	13	4,8	2,3	1800	10000	200	y	250	280
D	32	19	6,9	4,76	3150	14000	315	355	400	450
E	38	23,5	8,6	6,92	4500	18000	500	560	630	710
E0	50	30	11	11,72	6300	18000	800	900	1000	1050

Стандартный ряд расчетных диаметров d_P шкивов Таблица 2

40	45	50	56	63	71	80	90	100	112	125
140	**160**	180	200	225	250	280	315	355	400	**450**
500	560	630	710	800	900	1000	1050	1100	1200	1250
1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2400
2600	2800	3000	3200	3500	3800	4000	4500	5000	5500	6000

Шаг 3. Делаем геометрический расчет передачи: назначаем межосевое расстояние a; вычисляем длину ремня L_p; по таблице 3 выбираем стандартное значение длины ремня L; уточняем межосевое расстояние a; находим угол обхвата α малогого шкива и другое

Параметры и их обозначения				Ввод данных	Размерность	По умолчанию	Принято в расчетах
6	Межосевое расстояние	$a_{min} = 0,55\cdot(d1+d2)+h$ =		346	мм	346	
		$a_{max} = (d1+d2)$ =		610	мм	610	
		предлагаемое и задаваемое	a		мм	478	480
7	Расчетная и заданная длина ремня	$L_p = 2a + 0{,}5\pi(d_1 + d_2) + 0{,}25\,(d_2 - d_1)^2/a$ =				1962	мм
		предлагаемая и задаваемая	L			**2000**	2000
8	Уточненное межосевое расстояние, мм	$c = 2\cdot L - \pi\cdot(d_1 + d_2)$; $a = 0{,}125\cdot\left[c + \sqrt{c^2 - 8\cdot(d_2 - d_1)^2}\right]$			a =	500	мм
9	Минимальное межосевое расстояние (при надевании нового ремня)	$\Delta a = -0{,}01\cdot L$ =		-20	a_{MIN} =	480	мм
10	Максимальное межосевое расстояние (при вытяжении ремня)	$\Delta a = 0{,}025\cdot L$ =		50	a_{MAX} =	550	мм
11	Угол обхвата α малогого шкива	$\alpha = 180^0 - 57{,}3^0\cdot(d_2 - d_1)/a$ =				146,8	градус
		Угол обхвата α получен больше минимально допустимого угла в 120^0.					
12	Скорость ремня	$V = \frac{\pi\cdot d_1\cdot n_1}{60\cdot 1000}$			V =	12,23	м/сек
13	Число пробегов ремня в секунду	$U = \frac{V}{L}$			U =	6,12	1/сек

Стандартный ряд длин L_P ремня по нейтральному слою Таблица 3

400	450	500	560	680	710	800	900	1000	1120	1250
1400	1600	1800	**2000**	2240	2500	2800	3150	3550	4000	5000
5600	6300	7100	8000	9000	10000	11200	12500	14000	16000	18000

Шаг 4. Находим число ремней в передаче: определяем мощность, передаваемую одним ремнём; затем находим и уточняем число Z ремней (их должно быть от 2 до Zmax=4...8; иначе рекомендуется перейти на другое сечение ремней или предусматреть шкивы иного диаметра).

Параметры и пояснения, как они найдены						Обозначение	Найдено	Размерность
14	Номинальные мощности, передаваемые одним ремнём, находятся по табл. 4	при Vремня = 10м/с				Pmin	3,15	квт
		при Vремня = 15м/с				Pmax	4,13	квт
	и интерполированием по формуле	$P_0 = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \cdot \frac{(V - V_{min})}{(V_{max} - V_{min})}$				P_0	3,59	квт
15	Мощность, передаваемая одним ремнём, с учетом условий эксплуатации	$P_p = \frac{P_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L \cdot C_u}{C_p}$				P_p	2,97	
		Где: Коэффициент угла обхвата (см. табл. 5)				C_α	0,89	
		Коэффициент длины ремня (см. табл. 6)				C_L	0,98	
		Коэфф. передаточного отношения (см. табл. 7)				C_u	1,14	
		Коэффициент режима нагрузки (см. табл. 8)				C_p	1,2	
16	Число ремней	$Z = P_1 / P_p =$	3,36	Z	4		4	

Сечение ремня	Z	A	B	C; D	E; E0
ЧИСЛО РЕМНЕЙ Z=	4	5	6	7	8

Рекомендуется Z брать от 2 до Zmax = 6 - см. таблицу слева.

ЧИСЛО РЕМНЕЙ ЛЕЖИТ В РЕКОМЕНДУЕМОМ ИНТЕРВАЛЕ. ПРОДОЛЖИМ РАСЧЕТ ДАЛЬШЕ

Таблица 4

Номинальная мощность P_0 (квт), передаваемая одним клиновым ремнем нормального сечения в зависимости от скорости V ремня и диаметра d_1 шкива

Сеч. рем.		d_1, мм	Скорость V ремня, м/сек						
			3	5	10	15	20	25	30
B	Диаметр малого шкива	125	0,82	1,39	2,26	2,8	3	3	---
		140	1,07	1,61	2,7	3,45	3,83	4	---
		160	1,2	1,83	3,15	4,13	4,74	4,88	4,47
		180	1,3	2,01	3,54	4,66	5,44	5,76	5,53
		200	1,4	2,15	3,77	5,08	6	6,43	6,38
		224	1,47	2,26	4,05	5,45	6,5	7,05	7,15
		250	1,54	2,39	4,29	5,85	7	7,7	7,9
		250	1,57	2,5	4,5	6,15	7,4	8,2	8,5

Значения коэффициента угла обхвата C_α Таблица 5

$\alpha_1{}^0$	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90
C_α	1	0,98	0,95	0,92	0,89	0,86	0,82	0,78	0,73	0,68

Значения коэффициента длины ремня C_L Таблица 6

L, мм	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240
C_L	0,78	0,8	0,82	0,85	0,87	0,9	0,93	0,95	0,98	1
2500	2800	3150	3550	4000	4500	5000	5600	6300	7100	8000
1,02	1,05	1,07	1,1	1,13	1,15	1,17	1,2	1,22	1,25	1,28

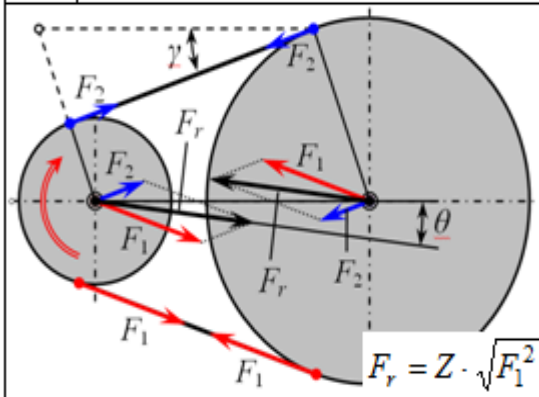
Значения коэффициента передаточного отношения C_u Таблица 7

i	1,0	1,2	1,4	1,8	2,5	3,0	5,0	10,0
C_u	1,00	1,07	1,10	1,12	1,14	1,14	1,14	1,14

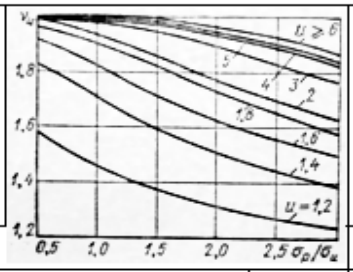
Значения коэффициента режима нагрузки C_P Таблица 8

Нагрузка	Спокойная	Умеренные колебания	Значительные колебания	Ударная и резко переменная
C_P	1,0 – 1,2	1,1 – 1,3	1,3 – 1,5	1,5 – 1,6

Шаг 6. Вычисляем усилия и напряжения в ремнях и силы, действующие на валы

Параметры и пояснения, как они найдены								Обозначение	Найдено	Размерность
17	Находим по нижеприведённой таблице коэффициент числа ремней							Cz	0,9	
Z	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15
Cz	1	0,95	0,95	0,9	0,9	0,9	0,85	0,85	0,85	0,85
18	Натяжение ремня F_v от сил инерции при плотности его материала ρ≈1250…1400 кг/м^3	$F_v = 0{,}0001 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$						ρ	1300	кг/м^3
								F_v	36,56	Н
19	Сила предварительного натяжения одного ремня	$F_0 = \frac{850 \cdot P_1 \cdot C_p \cdot C_L}{Z \cdot V \cdot C_\alpha \cdot C_u} + F_v$						F_0	237,936	Н
20	Полезная нагрузка одного ремня (окружная сила)	$F_t = \frac{2000000 \cdot P_1}{Z \cdot \omega_1 \cdot d_1}$						F_t	204,39	Н
21	Силы натяжения ведущей и ведомой ветвей	$F_1 = F_0 + 0{,}5 \cdot F_t \quad F_2 = F_0 - 0{,}5 \cdot F_t$						F_1	340,1	Н
								F_2	135,7	Н
22	Коэффициент тяги	$\psi = \frac{F_t}{2 \cdot F_0}$						ψ	0,43	
23	Вычисление сил F_r, действующих на валы, и угла θ их наклона									
		Угол наклона ремня $\gamma = \arcsin \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot a}$						γ	16,862	градус
		Угол θ наклона сил F_r $\theta = arctg \frac{(F_1 - F_2) \cdot \sin \gamma}{(F_1 + F_2) \cdot \cos \gamma}$						θ	7,4	градус
		Силы F_r давления на валы $F_r = Z \cdot \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos(2 \cdot \gamma)}$						F_r	1837,0	Н
23	Напряжения в сечениях ведущей и ведомой ветвей ремня от полезной нагрузки	$\sigma_1 = \frac{F_1}{100 \cdot S}$	$\sigma_2 = \frac{F_2}{100 \cdot S}$					σ_1	1,81	Мпа
								σ_2	0,72	Мпа
24	Напряжения в ремне от сил инерции ремня	$\sigma_v = \frac{F_v}{100 \cdot S}$						σ_v	0,19	Мпа
25	Приведенный модуль упругости клиновых кордотканевых ремней (выбираем из диапазона E=80…100 Мпа)							E	100	Мпа
26	Напряжения в наружных слоях ремня от его изгиба на малом шкиве	$\sigma_{1r} = E \cdot \frac{2 \cdot y_0}{d_1}$						σ_{1r}	5	Мпа
27	Напряжения в наружных слоях ремня : наибольшее (в ведущей ветви в зоне контакта с малым шкивом) и наименьшие (в ведомой ветви)	$\sigma_{1max} = \sigma_1 + \sigma_v + \sigma_{1r}$						σ_{1max}	7,00	Мпа
		$\sigma_{1min} = \sigma_2 + \sigma_v$						σ_{1min}	0,92	Мпа

Шаг 7. Расчитываем долговечноть ремней, т.е. находим ресурс передачи.
Расчет выполняем с использованием кривых усталости
(Кудрявцев В.Н. Курсовое проектирование деталей машин, 1984) .

28	Предел выносливости σ_y для материалов ремня и базовое числи циклов N_0. Рекомендуется σ_y=9 при $N_0=10^7$ и m=11	σ_y		9	Мпа
		N_0		1,00E+07	циклов
		m		11	
29	Отношение напряжений в ремне: σ растяж/σ изгиб $k_\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_v)}{\sigma_{1r}}$	kσ		0,40	
30	Коэффициент влияния ν_i напряжений изгиба на большом и малом шкивах. Выбирается по диаграмме, приведённой справа в зависимости от значения коэффициента kσ , содержащегося в соседней строке сверху. 	ν_i		2	
31	Число шкивов (обычно Kskiv=2).	k_{Skiv}		2	
32	Класс ремня (влияет на его долговечность - см. таблицу ниже)	Класс	I	I	I

Класс ремня	I	II	III	IV		
Коэфф. роста долговечности	1	1,33	1,67	2	k_{KLAS}	1

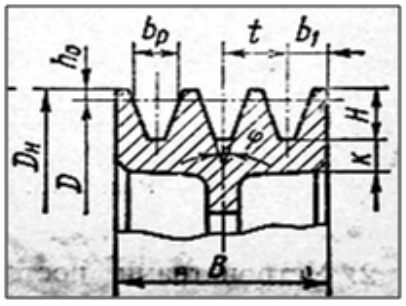
33	Расчетная долговечность ремней. Здесь: U – число пробегов ремня 1/сек. $L_h = K_{klas} \cdot \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}\right)^m \frac{10^7 \cdot \nu_i}{3600 U \cdot k_{skiv}}$	L_h	7170	часов

ВЫВОД: ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РЕМНЯ ДОСТАТОЧНА. ОНА СОСТАВЛЯЕТ 179% ОТ ТРЕБУЕМОЙ

РЕКОМЕНДАЦИИ: 1. Долговечность ремня можно изменить на (30..100)%, взяв другой класс ремня.
. (ОПРОБУЙТЕ) 2. Долговечность ремня существенно возрастает при увеличении диаметра
. (ИХ) малого шкива и числа ремней, а также при уменьшении сечения ремня.

Шаг 7. Находим геометрические параметры шкивов и передачи

34 Размеры клиноременных шкивов извлекаем из таблицы ГОСТ 1284-68 и вычисляем по формулам



Ремень	b_p	h_0	H	t	b_1	k
B	14	5	16	20	12,5	7,5

Углы φ канавок на шкивах (по таблице ниже)		малый	φ_1	34	градус
		большой	φ_2	38	градус
Наружные диаметры шкивов	$D_H = D + 2 \cdot h_0$		D_{H1}	170	мм
			D_{H2}	460	мм
Ширина шкивов	$B = 2 \cdot b_1 + (Z-1) * t$		B	85	мм

Завимость углов канавок шкивов от их диаметров (Извлечение из ГОСТ 1284-68 для ремня В) **d_1= 160** **d_2= 450** Таблица 9

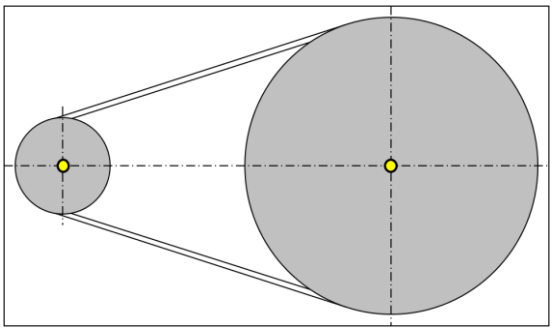
Диаметр шкива	125	**160**	180	224	250	500	560	4000
Угол φ канавки	**34**	**34**	36	36	**38**	**38**	40	40

35	Гравный размер, а также условные площадь и объём передачи	$A = 1{,}05 \cdot [0{,}5 \cdot (D_{H1} + D_{H1}) + a_{max}]$	длина	A	908,12 мм
		$S = \frac{(D_{H1}^2 + D_{H2}^2) + (D_{H1} + D_{H2}) \cdot a_{max}}{2 \cdot 1000000}$	площадь	S	0,29346 $м^2$
		$V = B \cdot S$	объём	V	24,9442 литров

Приложение В.6		СПбзу-14-1	Иванов А.Б.	12.04.2016 9:48

Шаг 8. Конструирование передачи и оптимизация её параметров

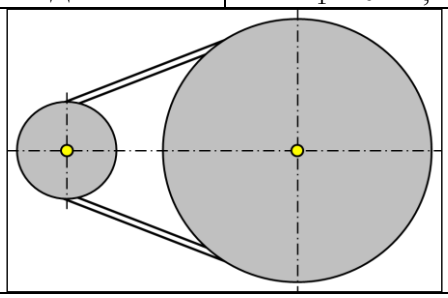
ВАРИАНТ 1

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	P_1=10квт; n_1=1460об/мин; i =2,8; L_h=4000час.		
	ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ		
	РАЗМЕРЫ (мм)	a=500 (от 480 до 550)	
		D_1=160	D_2=450
		i=2,841	Δi=1,45%
	РЕМНИ	СЕЧЕНИЕ В	КЛАСС I
		Z = 4	L= 2000
		V=12,2м/с	U=6,1 1/с
		L_h=7170час	**179%**
	ШКИВЫ	Da_1=170	Da_2=460
		$\varphi_1=34^0$	$\varphi_2=38^0$
		B=85мм	$\alpha_1=147^0$
	СИЛЫ	F_1=340Н	F_2=136Н
		F_r =1837Н	Ψ=0,43

ВАРИАНТ 2.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	P_1=10квт; n_1=1460об/мин; i =2,8; L_h=4000час.		
ОТЛИЧИЕ ОТ ВАРИАНТА 1: 1. УМЕНЬШИЛИ ЧИСЛО РЕМНЕЙ С Z=4 НА Z=3 (ШАГ 4). 2. ИЗМЕНИЛИ КЛАСС РЕМНЯ С I НА II (СМ. ШАГ 4). **РЕЗУЛЬТАТ:** 1. ЧЕРТЁЖ ПЕРЕДАЧИ НЕ ИЗМЕНИЛСЯ. 2. ОСТАЛИСЬ ПРЕЖНИМИ И ВСЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ, НЕ УКАЗАННЫЕ (ИЛИ БЛЕДНЫЕ) СПРАВА В ТАБЛИЦЕ.	ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ		
	РЕМНИ	СЕЧЕНИЕ В	**КЛАСС II**
		Z = 3	L= 2000
		L_h=4220час	**106%**
	ШКИВЫ	B=65мм	$\alpha_1=147^0$
	СИЛЫ	F_1=441Н	F_2=168Н
		F_r =1768Н	Ψ=0,45

ВАРИАНТ3

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	P_1=10квт; n_1=1460об/мин; i =2,8; L_h=4000час.		
	ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ		
	РАЗМЕРЫ	a=394 (от 376 до 439)	
	РЕМНИ	Z = 3	**L= 1800**
		V=12,2м/с	U=6,8 1/с
		L_h=3770час	**94%**
	ШКИВЫ	B=65мм	$\alpha_1=138^0$
	СИЛЫ	F_1=442Н	F_2=170Н
		F_r =1733Н	Ψ=0,45

Отличие варианта 3 от варианта 2: длина ремней не L= 2000, а L= 1800мм.

Отличительные особенности созданной программы и работа с ней

1. В программе реализована методология, существенно отличающаяся от заложенной в ГОСТы [9-11]. В ГОСТ предусмотрено не трудоёмкое *проектирование одного варианта хорошей передачи*, которое может надёжно выполнить даже специалист невысокой квалификации. При этом в ГОСТ не содержит вычислений долговечности ремней, вероятнее всего из-за малой надёжности таких расчетов.
2. В учебной программе предусмотрен расчет долговечности ремней. Это сделано по двум причинам. Во-первых, всегда декларируется, что критерием работоспособности ременных передач является долговечность ремней, и это в учебной программе целесообразно подтверждать, даже

понимая, что надёжность таких расчетов не высока. Во-вторых, расчеты долговечности ремней, даже ориентировочные, могут быть востребованы в инженерной практике при: модернизациии передач с целью увеличения их долговечности; когда нужна передача с одним ремнём и т.п..

3. В программе сочетается ГОСТовская методика расчета *одного хорошего варианта*, с последующими расчетами *нескольких вариантов передач* с выбором пользователем лучшего из них.
4. Программа позволяет пользователю изменить значение любого параметра – исходного; константы в формулах и нормативах; параметра, найденного самой программой: a, D_1, D_1, Z, размеров сечения ремня, констант для расчета долговечности – см. шаг 7 Приложения В5 – и др.
5. Пользователю доступны все средства EXCEL, в том числе надстройки.

Обсуждение результатов

Опыт работы студентов с программой (два семестра) показал:

1. При работе *в ручном режиме* студенты тратят на расчет много времени и допускают при этом большое число ошибок, что угнетает студентов и делает результаты их расчетов ненадёжными. Усвоение методики проектирования выше удовлетворительного. Ручной режим приемлем лишь для студентов машиностроительных специальностей и лишь как этап, предшествующий автоматическим расчетам нескольких вариантов.
2. При работе *в автоматическом режиме* усвоение методики проектирования вполне приемлемо, даже для студентов немеханических специальностей и заочников. Но лишь в том случае, если на зачете или при защите курсовой или расчетно-графической работы, преподавателем проводится строгий опрос по содержанию шагов расчета и по тому, как выявить влияние параметров передачи (сечения и длины ремней, диаметров шкивов и др.) на её качество (долговечность, габариты и др.).
3. Программа эффективна в учебном процессе: снижаются время, отводимое на раздел «Ременные передачи» на аудиторных занятиях; курсовые работы делаются быстрее; понимание физического смысла улучшается.

Направления совершенствования программы

1. Ведётся доработка ручного режима работы с программой.
2. Необходимо сделать более удобным и простым шаг 8 в Приложении В6: автоматизировать формирование набора спроектированных передач, отбираемых пользователем для печати; улучшить рисунок передачи, показав на шкивах дуги скольжения, а в ремне – эпюры изменения усилий.
3. При востребованности сделаем программу двуязычной: с ней можно будет работать, как на родном языке (например, русском), так и на английском. Тексты пользовательского интерфейса и выходных форм локализуем в словарях. Переход с одного языка на другой будет осуществлять-

ся переключением словарей. При этом можно будет расчеты выполнить на одном языке (например, русском), а результаты напечатать на другом (английском). Привилегированным пользователям будет предоставлена возможность внесения изменений в интерфейсные словари системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коловский М.З., Евграфов А.Н. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ // Теория механизмов и машин. 2003. №1. Т.1. С. 3–29.
2. Онищенко В.П., Сотников А.Л. Состояние и перспективы развития учебной дисциплины «Теория механизмов и машин» в Донецком национальном техническом университете // Теория механизмов и машин. 2010. №2(16). Т.8. С. 80–84.
3. Лясич В.А., Романов В.В., Лапшин В.В. Использование компьютерных технологий при изучении ТММ // Теория механизмов и машин. 2012. №2(20). Т.10. С. 24–29.
4. Дудкина Н.Г. Внедрение интенсивно-информационных технологий обучения в лекционный курс «Теория механизмов и машин». // Теория механизмов и машин. 2013. Т. 11. № 21. С. 84–89.
5. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и MathCAD // Теория механизмов и машин. 2008. № 1. С. 71–80.
6. Зиборов К.А., Мацюк И.Н., Шляхов Э.М. Силовой анализ механизмов с помощью программы Mathcad // Теория механизмов и машин. 2010. №1. Том 8. С. 83–88.
7. Бабичев Д.Т. Компьютерное моделирование работы плоских механизмов и многовариантное конструирование одноступенчатых цилиндрических редукторов // Теория механизмов и машин. 2011. №2(18). С. 38–47.
8. Бабичев Д.Т., Балин А.В., Иркитова В.Н. Анализ и синтез цилиндрических передач в курсе “Прикладная механика” // Теория и практика зубчатых передач. Сборник трудов Международного симпозиума. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. С.89–95.
9. ГОСТ 1284.3-96. Ремни приводные клиновые нормальных сечений. Передаваемые мощности.
10. ГОСТ 1284.1-89. Ремни приводные клиновые нормальных сечений. Основные размеры и методы контроля.
11. ГОСТ 20889-88 Шкивы для приводных клиновых ремней нормальных сечений. Общие технические условия.
12. Кудрявцев В.Н., Державец Ю.А., Арефьев И.И. и др.; Под общ. ред. В.Н. Кудрявцева. Курсовое проектирование деталей машин, – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1984. − 400 с.
13. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для втузов. – М.: Машиностроение, 1989. − 496 с.
14. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для вузов. – М.: Машино-

строение, 1988. − 368 с.
15. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: Учебник для вузов. – М.: “Высшая школа”, 2002. − 408 с.
16. Курмаз Л.В., Скойбеда А.Т. Детали машин. Проектирование. – Минск: УП «Технопринт». 2002. – 296 с.

D.T.Babichev

IMPROVEMENT THE TEACHING TECHNIQUE BASES OF DESIGN THE STANDARD KNOTS OF CARS ON THE EXAMPLE OF THE STUDY THE SUBJECT “BELT DRIVES”

Tyumen Industrial University, Russia.

Abstract

At the department of Applied Mechanics of Tyumen Industrial University (till 2016 – the TSOGU oil and gas university) the author has been using the Excel MS Office system for 25 years to create computer programs designed for educational process. The article describes one of the last programs "Design and calculation of V-belt drives". Features: **1.** Basis of calculation – GOST 1289.2-89; an additional calculation to find durability of belts. **2.** The result of the calculation - explanatory note (6 A4 pages), including a brief explanation, all used normative tables or extracts from them, all formulas and calculation results, images of several designed drives. This note can be used by students to prepare for tests and exams as methodological guide and as a brief summary of lectures on the calculation of belt drives. **3.** All diagrams and tables in the note are "living" - the selected items are filling. **4.** It is provided two modes of operation of the program: automatic and manual. By the automatic mode all data from the tables are chosen by means of the program and work of the user is reduced only by inputting the main basic data and by refining parameters of drive which provides the set durability of belts. At the manual mode all data from tables are chosen by the user (using prompts of pouring). In the article the example of the explanatory note is given.

Key words: machine elements and basis of design, applied mechanics, V-belt drive, the teaching of technical disciplines.

REFERENCES

[1] Kolovskij M.Z., Evgrafov A.N. O nekotorykh napravleniyakh modernizacii kursa TMM //Teoriya mekhanizmov i mashin. 2003. №1. T.1. S.3-29. (rus.)
[2] Onishhenko V.P., Sotnikov A.L. Sostoyanie i perspektivy razvitiya uchebnoj discipliny «Teoriya mekhanizmov i mashin» v Doneckom nacional'nom tekhnicheskom universitete // Teoriya mekhanizmov i

mashin. 2010. №2(16). T.8. S. 80-84. (rus.)
[3] Lyasich V.A., Romanov V.V., Lapshin V.V. Ispol'zovanie komp'yuternykh tekhnologij pri izuchenii TMM // Teoriya mekhanizmov i mashin. 2012. №2(20). T.10. S. 24-29. (rus.)
[4] Dudkina N.G. Vnedrenie intensivno-informacionnykh tekhnologij obucheniya v lekcionnyj kurs «Teoriya mekhanizmov i mashin» . Teoriya mekhanizmov i mashin . 2013. T. 11. № 21 . S. 84-89. (rus.)
[5] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Komp'yuternaya animaciya kinematicheskikh skhem v programmakh Excel i MathCAD // Teoriya mekhanizmov i mashin. 2008. № 1. S. 71-80. (rus.)
[6] Ziborov K.A., Macyuk I.N., Shlyakhov E.M. Silovoj analiz mekhanizmov s pomoshh'yu programmy Mathcad // Teoriya mekhanizmov i mashin. - 2010. -№ 1. -Tom 8. -S. 83-88. (rus.)
[7] Babichev D.T. Komp'yuternoe modelirovanie raboty ploskikh mekhanizmov i mnogovariantnoe konstruirovanie odnostupenchatykh cilindricheskikh reduktorov. Teoriya mekhanizmov i mashin. 2011. №2(18). S. 38-47. (rus.)
[8] Babichev D.T., Balin A.V., Irkitova V.N. Analiz i sintez cilindricheskikh peredach v kurse "Prikladnaya mekhanika" Teoriya i praktika zubchatykh peredach // Sbornik trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2013. S. 89-95. (rus.)
[9] GOST 1284.1-89. Remni privodnye klinovye normal'nykh sechenij. Osnovnye razmery i metody kontrolya. (rus.)
[10] GOST 1284.3-96. Remni privodnye klinovye normal'nykh sechenij. Peredavaemye moshhnosti. (rus.)
[11] GOST 20889-88 Shkivy dlya privodnykh klinovykh remnej normal'nykh sechenij. Obshhie tekhnicheskie usloviya. (rus.)
[12] Kudryavcev V.N., Derzhavec Yu.A., Aref'ev I.I. i dr.; Pod obshh. red. V.N. Kudryavceva. Kursovoe proektirovanie detalej mashin, – L.: Mashinostroenie, Leningr. Otdelenie, 1984. − 400 s. (rus.)
[13] Reshetov D.N. Detali mashin: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Mashinostroenie, 1989. − 496 s. (rus.)
[14] Iosilevich G.B. Detali mashin: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Mashinostroenie, 1988. − 368 s. (rus.)
[15] Ivanov M.N., Finogenov V.A. Detali mashin: Uchebnik dlya vuzov. – M.: "Vysshaya shkola", 2002. − 408 s. (rus.)
[16] Kurmaz L.V., Skojbeda A.T. Detali mashin. Proektirovanie. - Minsk: UP «Tekhnoprint». 2002. – 296 s. (rus.)

УДК 621.88.084.4 ; DOI 10.1872/MMF-2016-33

Башкарев А.Я.[1], Букреев В.В.[2], Кущенко А.В.[3], Стукач А.В.[4]

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПОЛИАМИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

[1] Альберт Яковлевич Башкарев, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: bashkarev@spbstu.ru

[2] Владимир Васильевич Букреев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: vicedir.tm @immet.spbstu.ru

[3] Александра Владимировна Кущенко, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

[4] Александр Васильевич Стукач, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: alst2004@mail.ru

Аннотация

Описывается методика расчета на прочность и долговечность адгезионного соединения антифрикционного полиамидного покрытия и его стальной подложки. Исследовано влияние на его прочность нагрева и давления со стороны контртела, а также термодеструкции. Представлены рекомендации по составу полиамидной композиции для соединений, подвергающихся фреттинг-коррозии.

Ключевые слова: адгезия, покрытие, полиамид, прочность, долговечность, модуль упругости, нагрев, давление.

Полиамидные покрытия толщиной менее 1 мм, нанесенные на поверхность металлических деталей машин, уже давно благодаря своим износостойким свойством и простоте их нанесения положительно зарекомендовали себя в узлах трения [1, 2]. Как известно, полимерные материалы имеют плохую теплопроводность, значительный коэффициент теплового расширения и значительные деформации под нагрузкой. Все это

создает трудности для их применения. У тонкослойных покрытий благодаря их малой толщине эти недостатки не проявляются. Но все это до тех пор, пока сохраняется прочное соединение полимера с металлической подложкой, на которую он нанесен [3,4]. Другими словами, при наличии адгезии между этими двумя разнородными материалами.

Полиамиды, как известно, способны создавать достаточно прочные адгезионные соединения с металлами, особенно со сталью. Их первоначальная прочность на сдвиг превышает 40 МПа [5].

В узлах машин и механизмов, покрытия на деталях машин особенно в узлах строительной техники подвергаются воздействию ряда неблагоприятных факторов, такие как нагрев, сдвигающие нагрузки и остаточные напряжения [6-11]. Характер их воздействия на снижение прочности адгезии включает два фактора. Первый - обратимое снижение прочности адгезионного соединения. К нему относится нагрев. Авторы исследовали зависимость прочности склейки полиамидом стальных поверхностей от температуры, при которой проводилось испытание. Полученные результаты представлены на рис. 1. Они показывают, что прочность соединения с повышением температуры заметно снижается. Опыты проводились с несколькими марками полиамидов, с различной температурой плавления. Эффект снижения прочности был различным. У более термостойких полиамидов он был значительно меньше и достаточно хорошо описывается формулой (1).

$$[\tau]_T = [\tau]_H - h \cdot (T - T_0) \qquad (1)$$

Здесь $[\tau]_T$ - прочность при температуре Т, $[\tau]_H$ - прочность при нормальной температуре T_H, h - экспериментально установленный коэффициент.

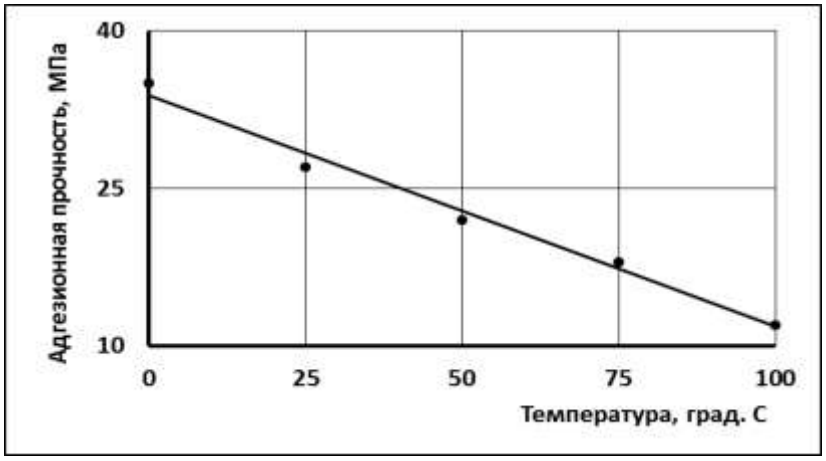


Рис. 1. Изменение адгезионной прочности полиамида П-68 с повышением температуры.

Аналогичная зависимость была получена Д.Ф.Бабиковым для зависимости прочности самих полимеров от температуры. Например, для полиамидной смолы он получил h = 0,35 МПа/град. При испытании адгезионной прочности соединения полиамида П-68 со сталью оказалось, что h = 0,14 МПа/град, т.е. влияние температуры в этом случае меньше. Очевидно, здесь проявляется положительное влияние подложки на сам полиамид.

Продолжительность нагрева образцов перед испытаниями была непродолжительной (в пределах 3 часов). После охлаждения до нормальной температуры прочность адгезионных соединений у всех марок полиамидов полностью восстанавливалась.

Таким образом, процесс снижения адгезионной прочности при кратковременном нагреве оказался обратимым.

На тех же образцах было изучено продолжительное воздействие температуры на адгезионное соединение полиамид-сталь. Для этого подготовленные образцы выдерживались в термостате более продолжительное время при температуре 80 градусов. Затем они охлаждались до нормальной комнатной температуры и испытывались на сдвиг. Результаты, представленные на рис. 2, показывают, что прочность адгезионного соединения восстанавливается далеко не полностью.

Следовательно, в процессе нагрева происходит деструкция части адгезионных связей.

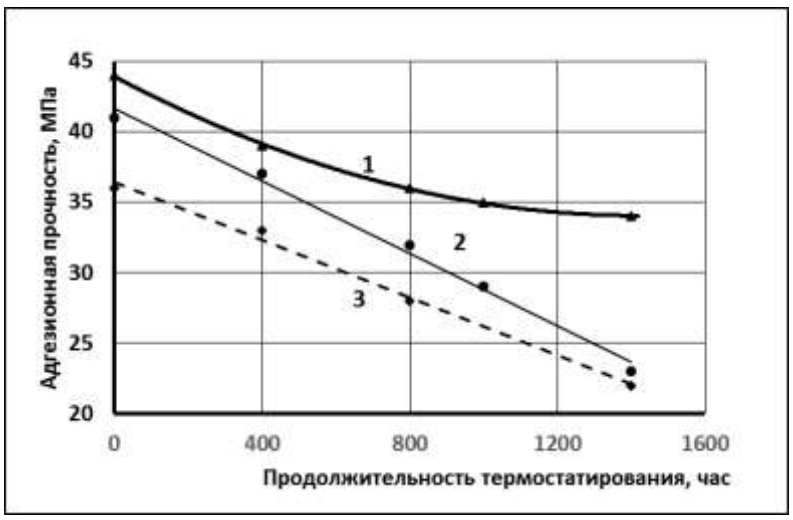


Рис. 2. Изменение адгезионной прочности полиамидов после термостатирования: 1 – капролон, 2 – капроамид с 1,5% MoS и 0,6% неозон D, 3 – полиамид П-68.

Многими исследованиями доказано, что долговечность адгезионных соединений может прогнозироваться с помощью термофлуктационной теории прочности. Ее каноническая формула С.Н.Журкова при

переменных напряжениях и температурах записывается в виде критерия Бейли (2) [12].

$$\int_0^{t_*} \frac{dt}{(\tau_0 \exp \frac{u - \gamma\sigma(t)}{RT(t)})} = 1 \qquad (2)$$

Здесь применительно к адгезионному соединению приняты следующие обозначения. t_* - долговечность соединения, T - температура, σ - напряжения, u - энергия активации разрушения адгезионных связей, γ - коэффициент, отражающий их чувствительность к механическим напряжениям, R - газовая постоянная, τ_0 - предэкспотенциальный коэффициент равный $10^{-11} - 10^{-13}$ с.

Если с достаточно полным основанием считать, что прочность соединения прямо пропорциональна количеству сохраняющихся адгезионных связей, то приведенный выше критерий при отсутствии нагрузки и постоянной температуре (что имело место при эксперименте) можно представить в следующем виде.

$$[\tau]_t = [\tau]_H \left(1 - \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u}{RT}}\right) \qquad (3)$$

Здесь t - время воздействия на соединение температуры и механических напряжений, $[\tau]_H$ - его начальная прочность, $[\tau]_T$ - остаточная прочность.

С учетом фактора времени и обратимой части снижения прочности при повышении температуры окончательную прочность следует рассчитывать по формуле:

$$[\tau]_{t,T} = \left(1 - \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u}{RT}}\right) \{[\tau]_H - h(T - T_H)\} \qquad (4)$$

Естественно предположить, что разрушение адгезии полимерного покрытия наступит, когда касательные напряжения от действующих нагрузок превысят значение остаточной прочности. Действующие нагрузки на сдвиг полимерного покрытия относительно его подложки, это силы трения, возникающие в зоне контакта трущихся поверхностей.

В подшипнике скольжения, где всегда имеет место зазор между трущимися поверхностями, в зависимости от распределения контактных напряжений при взаимодействии детали с полиамидным покрытием и контртелом сила трения в зоне трения оказывается неравномерно распределенной. Можно считать, что ее максимальное значение имеет место в зоне максимальных контактных напряжений.

Но существует и другая задача. В последнее время полимерные покрытия стали применять как средство защиты от фреттинг-коррозии в прессовых неподвижных посадках, в которых полимерное покрытие дополнительно находится в условиях всестороннего сжатия [13]. В этом случае напряжения от внешней нагрузки складываются с напряжениями от упругой деформации стальных деталей при их запрессовке.

Деформационными особенностями полиамидов является то, что они относятся к эластомерам, т.е. материалам практически не сжимаемым. Они легко деформируются без изменения объема. Поэтому считается, что их коэффициент Пуассона равен 0,5 [14]. В условиях, исключающих такое их деформирование, они сжимаются только за счет расстояний между молекулами или существующими технологическими микродефектами. Проведенными специальными экспериментальными исследованиями было установлено, что в этом случае коэффициент их Пуассона равен 0.49, а модуль упругой деформации 530 МПа.

Тонкое полиамидное покрытие, толщина которого менее 0.5 мм, из-за адгезионных связей с металлической подложкой не может проявлять способность к высокоэластичной деформации. Поэтому в подшипнике скольжения, где имеется определенный монтажный зазор, размеры угла контакта трущихся деталей и распределение контактных напряжений определяются только деформацией самих металлических деталей. Абсолютной величиной упругой деформации полиамида, как показали исследования можно пренебречь, и для расчета максимальных контактных напряжений можно использовать методику, предложенную Сухаревым И.П. [15].

Максимальные напряжения, возникающие при фрикционном взаимодействии деталей, будут прямо пропорциональны величине давления в зоне контакта и будут равны

$$\tau = fq \qquad (5)$$

где f - коэффициент трения, q - максимальные контактные давления.

Именно эти напряжения приводят к постепенному снижению прочности адгезии и окончательному ее разрушению.

Предстояло установить, как сами контактные давления, прижимающие полимерный слой к подложке влияют на его адгезионную прочность. Для этого были проведены исследования прочности полиамидных склеек при одновременном действии сдвигающих и сжимающих нагрузках. Полученные результаты в виде графиков представлены на рис. 3.

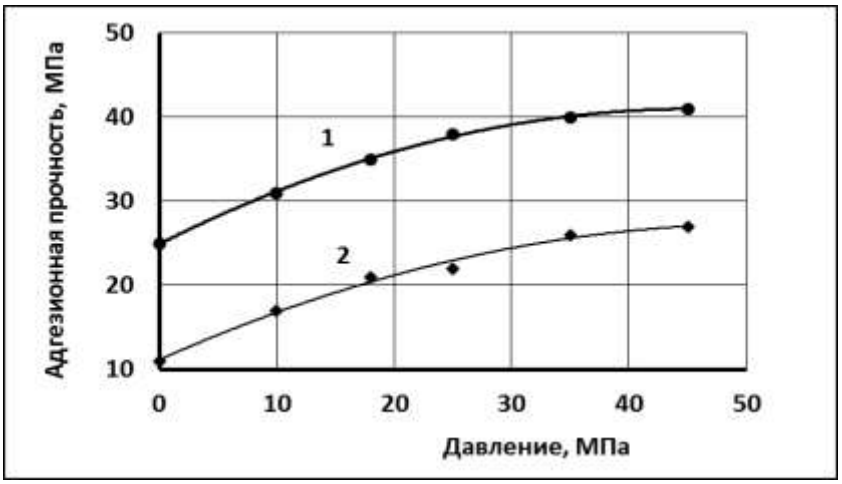


Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности от величины давления:
1 – полиамид П-66/6 без наполнителя и с 15% мелкодисперсной меди при 293^0К, 2 – при температуре 353^0К.

Обработка результатов экспериментов показала, что адгезионная прочность в этих условиях может быть рассчитана по формуле

$$[\tau]_q = [\tau] + aq^c \qquad (6)$$

где a и c являются константами полимерного материала. Эксперимент показал, что значение этих констант не зависит от вводимого в него наполнителя. Для полиамида П-68 после статистической обработки материалов было установлено: a = 4.2, а c = 0.51. Для всех остальных исследованных полиамидов в том числе с различными наполнителями значения находились для a в пределах 3.9 - 4.2 и для c в пределах 0.47 - 0.51.

При нагреве и одновременном действии давления прочность может быть рассчитана по формуле

$$[\tau]_{q,T} = [\tau]_H - h(T - T_H) + aq^c \qquad (7)$$

Через время t прочность уменьшится до значения

$$[\tau]^t_{q,T} = \left(1 - \frac{t}{\tau_0 \exp \frac{u}{RT}}\right)\{[\tau]_H - h(T - T_H)\} + aq^c \qquad (8)$$

которое должно превышать величину напряжений, возникающих в результате действия силы трения.

$$qf \le [\tau]^t_{q,T} \qquad (9)$$

Для неподвижных прессовых посадок с промежуточным полиамидным покрытием контактные напряжения можно рассчитываться по формуле^

$$q = \frac{\delta}{2r_2\left[\frac{(1-\mu_c)(r_3^2-r_2^2)+(1-\mu_c)r_2^2+(1+\mu_c)r_3^2}{E_c(r_3^2-r_2^2)} + \frac{(1-\mu_n)}{E_n\left(\frac{r_2}{r_2-r_1+\frac{\delta}{2}}+\mu_n\right)}\right]}, \quad (10)$$

где r_1 - радиус вала, r_2 -наружный радиус полимерного покрытия, r_3 - наружный радиус втулки, δ – диаметральный натяг, E_c, E_n, μ_c, μ_n – модули упругости и коэффициенты Пуассона стали и полимера.

Касательные напряжения по величине сдвигающей осевой нагрузки:

$$\tau = f \cdot q \quad (11)$$

Применительно к прессовым посадкам, чтобы противостоять их разрушению, наоборот приходится искать пути увеличения коэффициента трения между полиамидным слоем и контртелом. Работы, посвященные решению этой задаче, пока не находятся. Поэтому авторы провели самостоятельные исследования с различными наполнителями, которые должны были увеличить коэффициент трения. Наибольший эффект был достигнут при использовании в качестве наполнителя железного сурика (рис. 4).

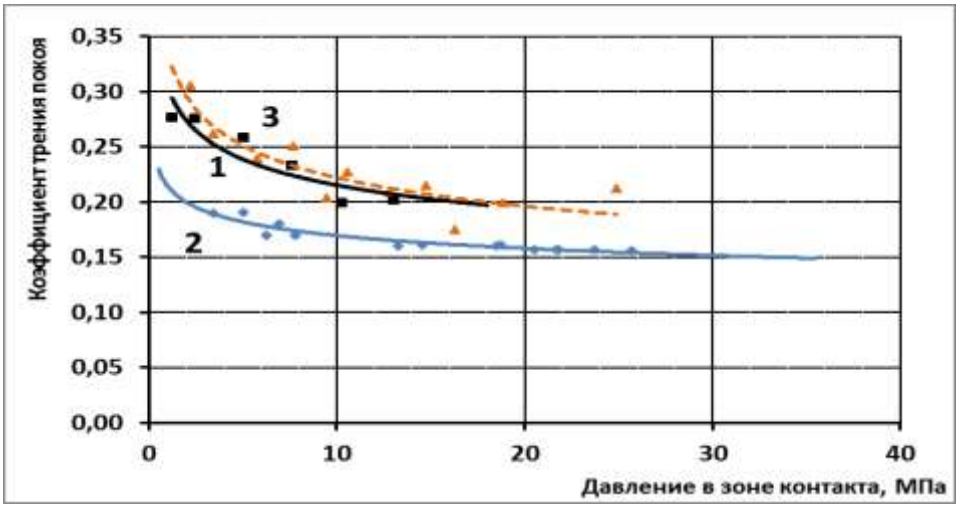


Рис. 4. Изменение коэффициента трения покоя от давления в зоне контакта для сочетаний: 1- сталь по стали; 2 – полиамид по стали; 3 - полиамид + 20% железного сурика по стали.

Благодаря добавлению в полиамид железного сурика удалось повысить коэффициент трения полиамида по стали до значения коэффициента трения стали по стали, что имеет важное значение для повышения прочности для неразъемных соединений.

Основные выводы

1. Установлен обратимый и необратимый характер изменения адгезионной прочности полиамидных покрытий в процессе нагрева. Показано, что необратимое снижение адгезионной прочности в результате термодестукции может быть описано с помощью термофлуктуационной теории прочности.

2. Получены эмпирические зависимости прочности адгезии покрытия от величины давления на него.

3. Разработана методика расчета долговечности адгезионного покрытия в подвижных и неподвижных узлах трения с учетом температуры их эксплуатации.

4. Экспериментально установлено, что для неразъемных соединений, работающих в условиях фреттинг-коррозии, для полимерного покрытия рекомендуется полиамидная композиция, содержащая до 20 % железного сурика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билик М.М., Слюдикова Н.Н. Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов в монолите и тонкослойных покрытиях. // Полимеры в промышленности, 1968, с. 26 - 32.
2. Яковлев В.Ф., Здор В.Ф., Каплан В.И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе. // Л.Химия, 1979, - 256 с.
3. Басин В.Е. Адгезионная прочность. //М. Химия, 1981, -208 с.
4. Зимон А.Д. Адгезия пленок и покрытий. // М. Химия, 1977, -352.
5. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. // М. Наука, 1973, -280 с.
6. Зубов П.И., Лепилкина Л.А. Внутренние напряжения в полимерных покрытиях и методы их измерения. //Лакокрасочные материалы, 1961, №5, с.19-27.
7. Зубов П.И., Сухарева Л.А., Смирнова Ю.П. Влияние внутренних напряжений на долговечность полимерных покрытий. //Доклады АН СССР, 1963, т.150, 32, с.359-360.
8. Бикерман Я.О. Новые представления о прочности адгезионных связей полимеров. //Успехи химии, т.61, вып.8, 1972, с. 1431-1463.
9. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. // 1993, 475 с.
10. Bikerman J.J. The science of Adhesives Joints. New York. // Academic Press, 1968, 241 h.
11. Kumultas D., Tavman I.H. Thermoplastic Composite Material // Journal Plastics and Reinforced Composites, 2006, V. 19, p. 441-455.
12. Bailey J. Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass // Glass industry. 1939, V.20, № 1, P. 20 - 35.

13. Кущенко А.В., Башкарев А.Я. Повышение долговечности соединений с натягом нанесением полимерных покрытий. // Вестник машиностроения, №10, 2015, с. 60 - 64.
14. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Л. Прогностика деформативности полимерных материалов. // Рига, Зинатне, 1975. 416 с.
15. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. // М. Машиностроение, 1977, 168 с.

A.Y. Bashkarev, V.V. Bukreev, A.V. Kushchenko, A.V. Stukatch

THE DURABILITY OF MACHINE PARTS WITH POLIAMIDE COATINGS IN FRICTION UNITS OF CONSTRUCTION EQUIPMENT

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Describes a method of calculating the strength and durability of bonding of polyamide coating with steel substrate. We studied the influence on its strength of temperature and pressure and thermal degradation. Provides guidance on the composition of the polyamide compositions for coatings subjected to fretting-corrosion.

Key words: adhesion, coating, polyamide, strength, durability, modulus of elasticity, heat, pressure.

REFERENCES

[1] Bilik MM, NN Slyudikova Anti-friction properties of some polymeric materials in the monolith and thin-film coatings. // Industrial Polymers, 1968, pp. 26 - 32.
[2] Yakovlev VF is healthy VF, Kaplan VI Powdered polymeric materials and coatings based on them. // L.Himiya, 1979 - 256 p.
[3] Basin VE Adhesive strength. // M. Chemistry, 1981, 208 p.
[4] Simon AD Adhesion of films and coatings. // M. Chemistry, 1977, -352.
[5] Deriagin BV, Krotov N., VP Smilga Adhesion of solids. // M. Science, 1973. 280 p.
[6] PI Zubov, LA Lepilkina Internal stresses in the polymer coatings and methods of their measurement. // Paints 1961, №5, pp.19-27.
[7] PI Zubov, LA Sukharev, Smirnov Yu.P. The influence of internal stresses on the durability of coatings. // Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, t.150, 32, pp.359-360.
[8] Bickerman Ya.O. New ideas about the strength of adhesive bonds of polymers. // Russian Chemical Reviews, t.61, vyp.8, 1972, pp. 1431-1463.
[9] Petrov VA, Bashkara AY, Vettegren VI Physical basis of forecasting the durability of structural materials. // 1993, 475 p.

[10] Bikerman J.J. The science of Adhesives Joints. New York. // Academic Press, 1968, 241 p.
[11] Kumultas D., Tavman I.H. Thermoplastic Composite Material // Journal Plastics and Reinforced Composites, 2006, V. 19, pp. 441-455.
[12] Bailey J. Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass // Glass industry. 1939, V.20, № 1, pp. 20 - 35.
[13] Kushchenko AV, AY Bashkara Increasing longevity connections with a tightness polymer coating. // Engineering Bulletin, №10, 2015, pp. 60 - 64.
[14] Urzhumtsev Yu, Maksimov RL Prognostics deformability of polymer materials. // Riga, Zinatne, 1975. 416 p.
[15] Sukharev IP The strength of the hinge units of machines. // MA Engineering, 1977, 168 p.

УДК 620.179 ; DOI 10.1872/MMF-2016-34

В.П. Белогур[1], Н.А. Семашко[2], А.А. Кулеш[3]

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АЭ)

[1]Белогур Валентина Павловна
Россия, Санкт-Петербург, к.т.н. лауреат премии правительства РФ, президент «Ассоциации производителей пружин», генеральный директор ОАО «НПП «Пружинный Центр»
Тел.:(812)347-86-56, E-mail: mail@pruzhina.ru

[2]Семашко Николай Александрович,
Россия, Санкт-Петербург, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ОАО «НПП «Пружинный Центр»
Тел.:(812)347-86-56, E-mail: mail@pruzhina.ru

[3]Кулеш Александр Александрович
Россия, Санкт-Петербург
технический директор ОАО «НПП «Пружинный Центр»
Тел.:(812)347-86-56 доб. 204, E-mail: td@pruzhina.ru

Аннотация

Показаны преимущества использования метода акустической эмиссии при диагностике изделий из двухфазных титановых сплавов типа ВТ23.

Ключевые слова: Титановый сплавы ВТ23, метод акустической эмиссии, термическая обработка, структура, упругие элементы (пружины), диагностика.

1. Введение. Использование двухфазных титановых сплавов типа ВТ23 при производстве упругих элементов различного типа и назначения обусловлено их уникальными физическими и механическими свойствами, в частности, отсутствием участка деформационного упрочнения у термически обработанных образцов вплоть до предела прочности материала. При этом структура, следовательно, механические свойства сплавов критически зависят от конкретного их состава и режимов термической обработки. Нарушение режимов для конкретного состава сплава приводит к изменению структуры и катастрофическому росту зерна, и как следствие, к снижению их усталостной прочности.

Сплав ВТ23 относится к высокопрочным α+β – титановым сплавам

мартенситного типа [1] . Подобные сплавы содержат значительное количество β – стабилизирующих элементов, и благодаря своей гетерофазности, могут подвергаться эффективной упрочняющей термической обработке. Многие авторы [2,3] отмечают, что двухфазные α+β – сплавы весьма чувствительны к соблюдению технологических параметров термического упрочнения, в частности, к скорости охлаждения после отжига и старения. При больших скоростях остывания сплава (более 5С/мин) происходит выделение метастабильной α, -фазы, существенно снижающей эксплуатационные свойства готовых изделий. Эксперименты, включающие регистрацию акустического излучения при нагреве титанового сплава ВТ23 показали, что энергия импульсов акустической эмиссии, накопленная при нагревании состаренных образцов, а также образцов, отожженных при 800 С и остывавших со скоростью 5 град. в минуту, т.е. упрочненных с соблюдением технологических регламентов, на порядок меньше энергии, выделяющейся при нагреве образцов, термически обработанных без соблюдения технологических регламентов.

Известно, что на особенность генерации сигналов АЭ при деформации материалов оказывают влияние многие факторы. К ним относятся: структура и кристаллическое строение материалов, режимы термической и механической обработки, фазовый состав сплава. Можно предположить, что энергетический параметр метода АЭ, может служить чувствительным инструментом анализа изменений в структурах двухфазных титановых α+β – сплавах не только при их термической обработке, но и при статической деформации пружин в рабочем диапазоне нагрузок. При этом, чем меньшая энергия акустических импульсов будет накоплена в процессе деформации пружины на испытательном стенде, тем большей стабильностью будет обладать материал данной пружины и тем больше релаксационная стабильность и усталостная прочность самой пружины [4].

2. Материал и методика проведения эксперимента

Исследования проводились на образцах из высокопрочного титанового сплава ВТ23 (ГОСТ 1050-88) в виде двойной лопатки с сечением рабочей части 15,2×4,3 мм и на реальных изделиях (тарельчатые пружины) из этого же сплава (рис. 1).

Для регистрации и обработки механических параметров и кривой деформации использовалась встроенная в машину система. Для регистрации и обработки акустических импульсов применялась акустико-эмиссионная система СДС 1008. Система СДС1008 это аппаратно-программный комплекс для регистрации, обработки, измерения и анализа параметров АЭ сигналов при проведении научных исследований, а также технической диагностики промышленных объектов акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля (НК).

Рис. 1. Общий вид тарельчатой пружины из сплава ВТ23

АЭ система СДС1008 включает в себя системный блок и персональный компьютер (PC) с программным обеспечением (ПО **«Maestro»)**, посредством которого осуществляется управление системой, а также регистрация, обработка, анализ и графическое отображение всей поступающей информации об испытуемом объекте.

АЭ система СДС1008 построена по принципу параллельной многоканальной цифровой регистрации параметров АЭ сигналов. Каналы регистрации АЭ сигналов включают:

- преобразователь (датчик) АЭ сигналов;
- предварительный усилитель АЭ сигналов;
- блок цифровой регистрации АЭ сигналов.

В работе применялись широкополосные преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) GT300 с полосой регистрации 50-1000 кГц .

Программное обеспечение системы СДС1008 позволяет отображать комплекс параметров АЭ испытаний в реальном времени, а также обеспечивает широкие возможности для последующей обработки полученной информации в режиме «постанализа». Общий вид системы СДС 1008 показан на рис. 2.

Рис. 2. Общий вид системы СДС 1008

В случае образцов, датчики АЭ устанавливались около зажимов испытательной машины , а в случае тарельчатых пружин – непосредственно на поверхности изделия, как показано на рис. 3.

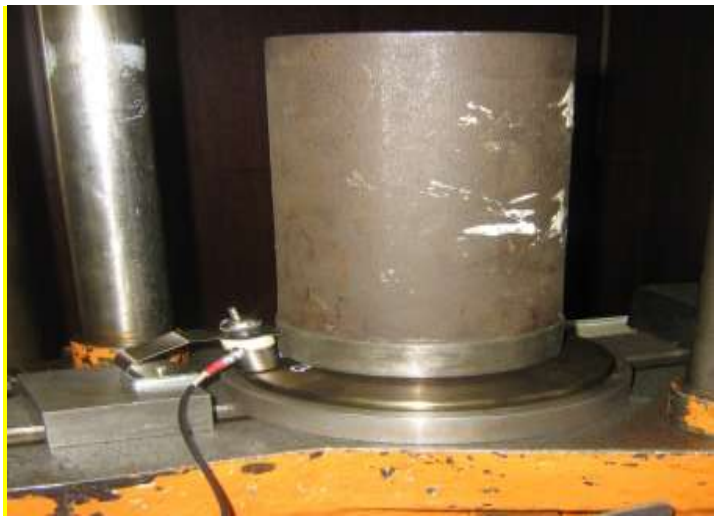


Рис. 3. Общий вид приспособления для деформации тарельчатых пружин

В процессе деформации датчики поджимались к поверхности изделия специальными пружинами. Тарельчатые пружины устанавливаются в приспособление для деформации (рис.3). В процессе эксперимента производится медленная деформация тарельчатой пружины до 10Т, и последующая разгрузка. Деформация реализуется на испытательной машине УТС110М-50, с записью диаграммы «сила деформации – перемещение инструмента».

3. Результаты и их обсуждение

Параметры АЭ, совмещенные с кривой деформации термически не обработанного (А) и закаленного (В) образцов сплава ВТ23 показаны на рис. 4.

Как видно из рисунка, сырой образец имеет выраженную площадку текучести от 3,0 до 7.0 % деформации и область образования и роста шейки от 8.0 до 10.0% деформации. Закаленный образец имеет площадку текучести на конечном этапе деформации, перед разрушением. Основное акустическое излучение в сыром образце приходится на область образования шейки (от 8 до 10% деформации). При этом интенсивность излучения достигает 60 имп./сек, а средняя энергия - 20×10^{-3} мВ^{2}с за секунду. Можно утверждать, что акустическое излучение в области образования шейки сырого образца связано с процессом образования и развития трещин, которые приводят к его разрушению.

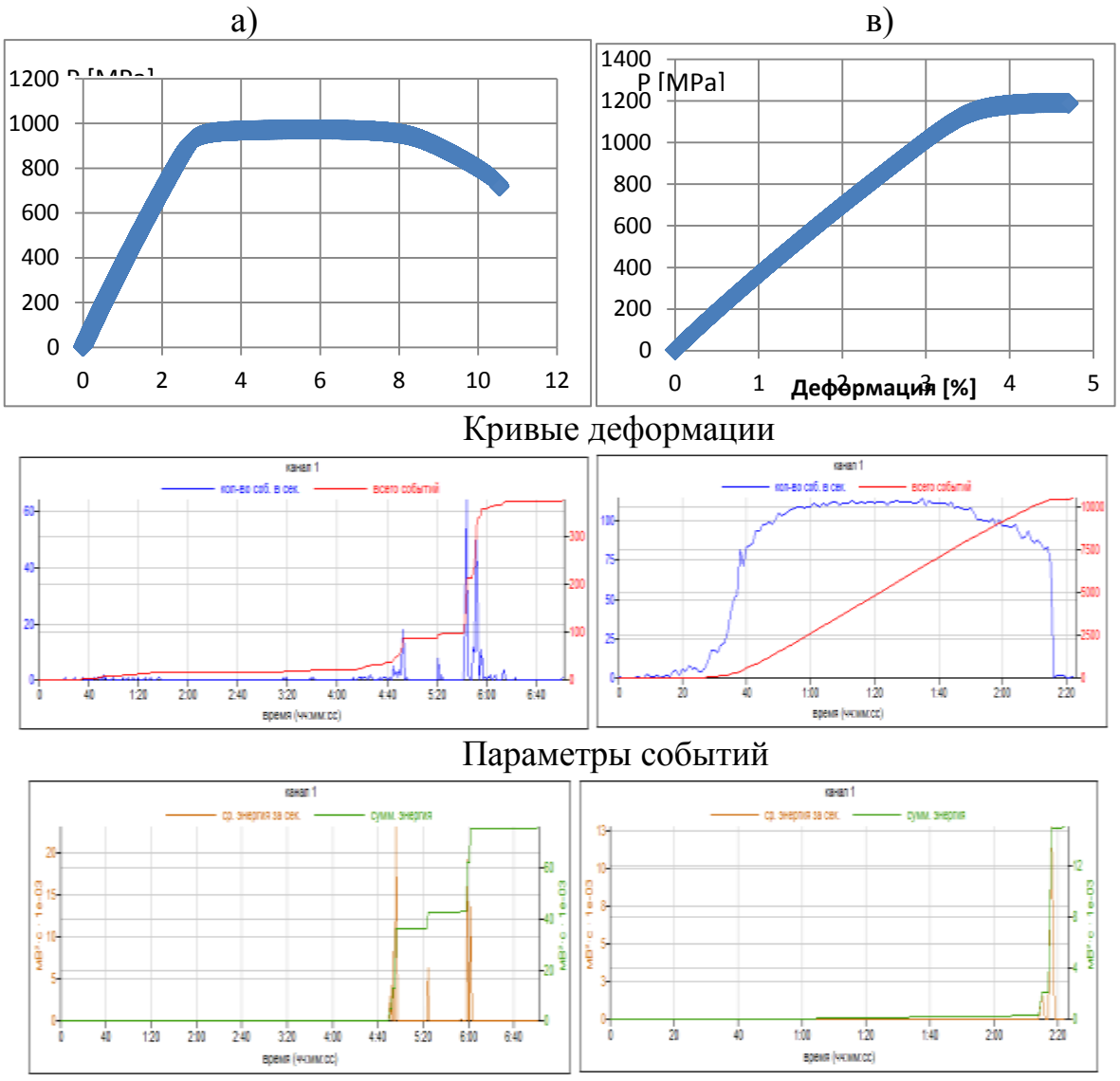
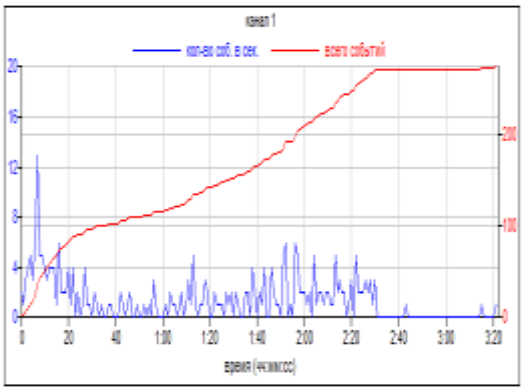


Рис. 4. Параметры АЭ, совмещенные с кривой деформации термически не обработанного (а) и закаленного (в) образцов сплава ВТ23

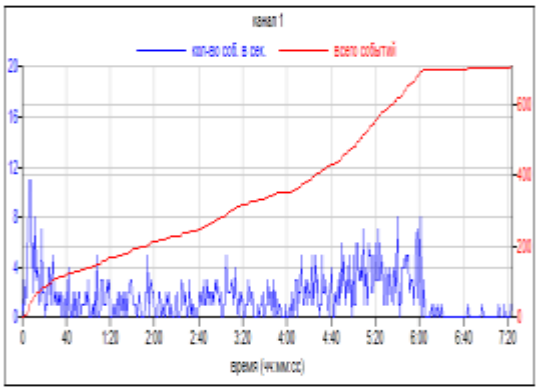
Акустическое излучение закаленного образца сопровождает практически весь процесс его деформации. Оно начинается в области физического предела упругости материала, равномерно сопровождает процесс деформации до его выхода на площадку текучести и несколько уменьшает интенсивность вплоть до разрушения образца. Энергетика этого акустического излучения ничтожно мала (практически равна нулю) при интенсивности излучения 100 имп./сек. Можно предположить, что данные импульсы АЭ связаны с процессами эволюции в структуре образовавшихся фаз закаленного титанового сплава и не связаны с процессами образования трещин в образце. Импульсы с энергией 13×10^{-3} мВ^{2}с зафиксированы только в момент разрушения образца.

В результате предварительных экспериментов по деформации стандартных образцов из сплава ВТ23 на растяжение можно сделать вывод, что основным параметром акустической эмиссии, характеризующим процесс образования и развития микротрещин в материале, является энергия импульсов и ее накопление за время деформации.

Учитывая вышесказанное, была проведена серия экспериментов по деформации реальных тарельчатых пружин в специальном приспособлении, показанном на рис. 3. В данной серии испытывались серийные пружины с продольно – поперечной прокаткой. Скорость деформации составляла 2 мм/мин. Деформация осуществлялась один раз с небольшой выдержкой после полного сжатия при максимальной нагрузке. В качестве примера, на рис. 5 представлены параметры событий и энергетические параметры двух резко отличающихся по этим параметрам пружин (№10 и №17).

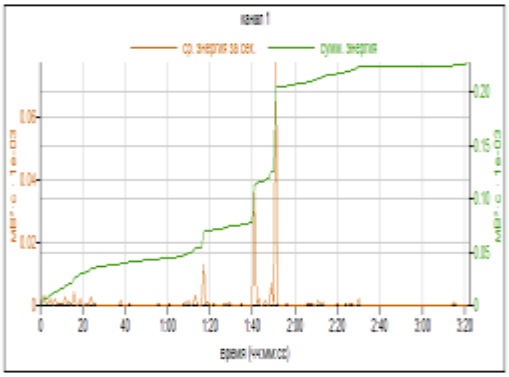


Образец № 10

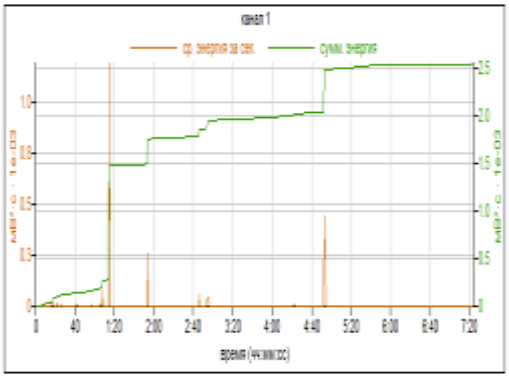


Образец № 17

а) Параметры событий



Образец №10



Образец №17

в) Энергетические параметры

Рис. 5. Параметры АЭ двух серийных тарельчатых пружин с отличающимися значениями накопленных событий и накопленной энергией за время деформации

Необходимо отметить, что пружина №10 находится в пределах статистической обработки серии пружин, а пружина №17 выпадает из общей статистики. Накопленная энергия пружины №17 превышает накопленную энергию пружины №10 в десять раз. Из общих соображений, приведенных выше, пружину №17 можно считать дефектной. Такие пружины требуют дополнительных исследований на наличие структурных изменений материала в процессе термической обработки изделия.

Выводы

1. В результате статических механических испытаний на растяжение определен акустический образ сплава ВТ23 в исходном и закаленном состоянии.
2. Представлен один из подходов анализа процесса деформации тарельчатых пружин из сплава ВТ23, основанный на связи процесса релаксации с энергией акустического излучения дефектной структуры материала.
3. Предложен методологический подход экспресс анализа структурного состояния готовых тарельчатых пружин с оценкой их релаксационной стойкости и возможностью сплошного контроля готовой продукции по величине энергетического параметра метода АЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коллинз Е.В. Физическое металловедение титановых сплавов. – Перевод с англ. Под ред. Б.И. Веркина, В.А. Москаленко. М.: Из - во Металлургия. 1988. 224 с.
2. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Из- во Металлургия. 1974. 368 с.
3. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Из-во Металлургия 1974. 554 с.
4. Семашко Н.А., Шпорт В.М. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Изд. «Машиностроение», 2002. 320 с.
5. Баранов В.М., Грищенко А.И., Карасевич А.М. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. М. Наука. 1998. 303 с.
6. Авербух И.И., Вейнберг В.Е. Зависимость акустической эмиссии от деформации в различных материалах // Дефектоскопия. 1973 №4. С 25-32.

7. Грешников В.Л. Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. М. Изд-во стандартов 1976 272 с.
8. Муравин Г.Б., Лезвинская Л.М. Шин В.В. Акустическая эмиссия и критерии разрушения. Дефектоскопия. №8 1993 С.5-13
9. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Киев. 1999. 304 с.
10. Ельчанинов Г.С., Носов В.В., Методика оценки ресурса сложно нагруженных сварных соединений // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 1-ой Международной науч.-практ. конференции под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.212-218.

Belogur V.P. [1], Semashko N.A.[2], Kulesh A.A.[3]

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE DIAGNOSIS OF PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOYS BY ACOUSTIC EMISSION (AE)

all: St.Petersburg, Russia; JSC « Scientific Production Enterprise «Spring Centre»

Abstract

The advantages of using acoustic emission method in the diagnosis of the two-phase products from titanium alloy VT23 type.

Key words: Titanium alloy VT23, acoustic emission method, heat treatment, structure, springs elements , diagnostics.

REFERENCES

[1] Kollins E.V., Physical metallurgy of titanium alloys. - Translated from English. Ed. Verkin B.I., Moskalenko V.A. M .: Metallurgy. 1988. 224 p.
[2] Glazunov S.G., Moiseev V.N. Structural titanium alloys. M .:in Metallurgy. 1974. 368 p.
[3] Kolachev B.A., Ivanov V.A., Baranov A.A., The mechanical properties of titanium and titanium alloys. M .: 1974. Metallurgy 554p.
[4] Semashko N.A., Shport V.M., Acoustic emission in experimental materials science. M .: Publishing. "Mechanical Engineering", 2002 with 320 p.

[5] Baranov V.M., Grishchenko A.I., Karasevich A.M., Acoustic diagnostics and monitoring at the enterprises of the fuel and energy complex. M.Nauka.1998, 303p.
[6] Averbukh I.I., Weinberg V.E., The dependence of the acoustic emission of the strain in various materials. Defectoscopy. Since 1973 №4 25-32p.
[7] Sinners V.L., Drobot Y.B., Acoustic emission. The use of test materials and products. M. Publishing House of Standards 1976 272 p.
[8] Muravin G.B., Lezvinskaya L.M., Shin V.V., Acoustic emission and fracture criteria. Flaw. №8 1993 5-13p.
[9] Filonenko S.F., Acoustic emission. Kiev. 1999. 304 p.
[10] Elchaninov G.S., Nosov V.V., Methods of assessing the resource difficult loaded welded joints // Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 1st International scientific-practical. Conference ed. MM Radkevich and AN Evgrafova. SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2011. Pp. 212- 218.

УДК621.9.079.621.7.079(031) ; DOI 10.1872/MMF-2016-35

В.А. Годлевский[1], В.В. Марков [2]

ПРИНЦИП СОЧЕТАЕМОСТИ РАЗНОРОДНЫХ ПРИСАДОК В ТРИБОАКТИВНЫХ СОТС ДЛЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

[1]Владимир Александрович Годлевский, д.т.н., профессор
Ивановский государственный университет
Россия, Иваново
E-mail: godl@yandex.ru

[2]Виктор Владимирович Марков, д.т.н., профессор
Ивановский государственный энергетический университет
Россия, Иваново
E-mail: markov-izumrud@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена проблема совместного применения в составе СОТС для лезвийной обработки металлов поверхностно- и химически-активных присадок. Приведены результаты испытания СОТС, содержащих ПАВ с кислородсодержащими химически-активными присадками. Сформулирована гипотеза об особой структуре граничных смазочных слоев, сформированных двумя трибоактивными компонентами.

Ключевые слова: обработка резанием, СОТС, присадки, ПАВ.

В случае резания металлов и сплавов низкой обрабатываемости обычно применяют (СОТС) с высокой активностью, которая обеспечивается введением химически-активных присадок, содержащими серу, фосфор и галогены. По экологическим причинам применение этих материалов является нежелательным и возникает вопрос, как обеспечить надлежащий результат обработки более безопасным образом.

В качестве одного из способов решить эту проблему было предложено использовать в качестве СОТС раствор ПАВ, дополненный добавкой химически-активного кислородсодержащего соединения — мелкодисперсной неорганической перекиси. На возможность использования использования перекиси водорода в качестве компонента СОТС указывалось и ранее, однако свойство этого соединения быстро распадаться в водных растворах делало это решение сомнительным [2]. В этом отношении переход от пе-

рекиси водорода к более термодинамически устойчивым перекисям металлов давал принципиальную возможность создавать стабильный технологический состав, выделяющий активный компонент непосредственно в контактной зоне. Впрочем, при этом поялась дополнительная проблема: обеспечить коллоидную устойчивость порошка твердой перекиси в жидкой вмещающей среде. И это могло бы быть решено подбором соответствующего ПАВ, играющего, помимо роли смазочного агента, еще и роль стабилизатора коллоидной устойчивости суспензии.

Результаты испытаний модельных составов СОТС, содержащих присадки, выбранные согласно вышеобозначенному принциипу, позволили переосмыслить процесс взаимодействия двух типов компонентов (поверхностно- и химически-активного) при формировании граничного слоя в контактной зоне при резании.

Достаточно долго проводилась научная дискуссия о механизме смазочного действия внешней среды в процессе обработки металла резанием. Центром этих обсуждений были особенности кинетики проникновения смазочного материала в зону контакта, а также о роли физических и химических процессов при формировании в этом процессе граничного смазочного слоя. Вопрос о проникновении внешней среды в зону резания получила довольно прозрачное объяснение в рамках микрокапиллярной модели [3, 4, 5], которая построена на рассмотрении последовательных стадий, характеризующих те или иные процессы взаимодействия среды с твердыми поверхностями. Разумно предположить, что по причине высокой температуры в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом смазочный слой формируется главным образом вследствие *хемосорбции* активных компонентов присадок и продуктов деструкции органических компонентов смазочного материала [6].

Ряд экспериментальных фактов в рамках этих представлений до настоящего времени были не понятны. Например, почему растворы коллоидных ПАВ обладают смазочным эффектом при резании, а неполярные органические компоненты (например, бензол) — оказываются неэффективными [5]? Почему сурфактанты, имеющие разное пространственное молекулярное строение, но примерно одинаковый элементный состав, столь существенно различаются по трибологической активности? Даже в пределах гомологического ряда ПАВ можно видеть значимые различия в смазочном действии, при этом наблюдается такая зависимость, что при удлинении радикальной цепочки эффективность присадки увеличивается [7] (своеобразное проявление эффекта Траубе).

Тот факт, что ПАВ при резании начинают оказывать антифрикционное действие уже при весьма малой концентрации (в сотые доли процента), свидетельствует о том, что смазочная эффективность этих присадок связана в первую очередь с поверхностными процессами. Недаром нами отмечалось, что концентрационная кривая эффективности поверхностно-

активной присадки весьма похожа на кривую изотермы поверхностного натяжения той же присадки [8].

Не ясной остается особенность совместного действия ПАВ и химически-активных компонентов. Предполагали, что химически-активные частицы, вводимые в состав СОТС в составе присадок высокого давления (ВД-присадки), такие как кислород сера, хлор — должны, в силу малости и поэтому большей подвижности частиц, сравнительно быстрее достигать поверхности и формировать хемосорбционный слой раньше, чем образуется составленный из амфифилов физисорбированная пленка.

Однако в таком случае в СОТС, составленной из активных молекул обоих типов, действие поверхностно-активной присадки было бы незначимо, в то время как опыты показывают, что в композиции эти присадки при резании чаще всего действуют синергически. В процессах же обычного трения было обнаружено, что присутствие кислорода значительно уменьшает эффекты адсорбционного пластифицирования и диспергирования [9].

Имеются данные о том, что органические мезогены, формирующие на поверхности развитые упорядоченные (эпитропные) надмолекулярные структуры (например, соединения гетероциклического типа) являются эффективными в качестве присадок для металлообработки [10], хотя трудно предположить, что при столь высоких температурах структурная упорядоченность больших молекул на поверхности могла бы играть существенную роль.

Известен факт, что смеси двух ПАВ, отличающихся молекулярным строением (например, ионогенное ПАВ в смеси с неионогенным ПАВ) обладают гораздо лучшей трибологической эффективностью, чем каждый из этих компонентов, примененный в отдельности [11, 12]. Как нам представляется, ничем иным, кроме как особенностями поверхностной надмолекулярной структуры формируемого граничного слоя этот факт объяснить невозможно.

Перечисленные выше множественные экспериментальные факты убедительно свидетельствуют о том, что в процессе формирования смазочного слоя при резании высокомолекулярные компоненты, такие, скажем, как коллоидные ПАВ, в какой-то мере *сохраняют свою молекулярную индивидуальность*, *не распадаются*, несмотря на высокую контактную температуру (400…1100˚С), которая в большинстве реальных технологических процессов механической обработки превышает температуру термодеструкции данных соединений. В этой ситуации следовало бы найти те факторы, которые позволяют органическим веществам сохранить их смазочную способность в условиях высокой температуры резания. Для прояснения описанной ситуации нами была выдвинута рабочая гипотеза, заключающаяся в следующем.

- Аномальная температурная устойчивость больших молекул коллоидных ПАВ и других мезогенных амфифилов проявляется в результате их совместного действия с химически-активными компонентами среды (кислородом воздуха и ВД-присадками).
- В результате процесса, сходного с гипотетическим процессом «трибополимеризации» [13], на поверхности микрокапиллярной полости, разделяющей поверхности резца и стружки, образуется «третье тело», «вторичная структура» — сложного состава смазочная пленка, каркас которой составляют молекулы амфифила.
- Роль химически-активного компонента в формировании такого рода пленки состоит в том, что он: а) химически связывает часть активных центров поверхности; б) образует химические «мостики», связывающие радикальные цепочки амфифила в прочную и термически устойчивую надмолекулярную структуру.

На рис. 1 показано гипотетическое строение граничного смазочного слоя, составленного из частиц различных типов. Можно видеть, что в случае совместного использования в составе СОТС адсорбционно- и химически-активного компонентов на поверхности образуется более пространственно развитая и, по-видимому, более прочная структура композиционного слоя (рис. 1, с). Достаточно близкой аналогией нашему гипотетическому процессу может служить процесс вулканизации эластомеров.

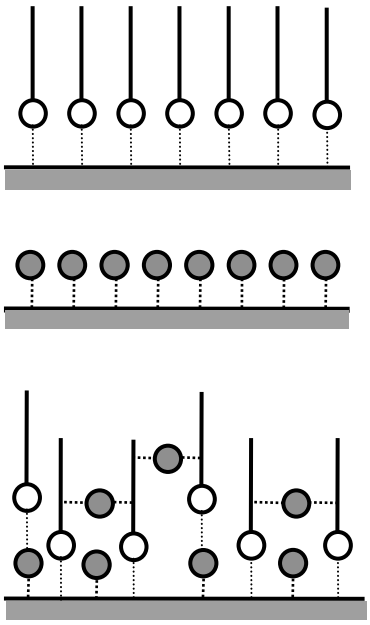


Рис. 1. Схематическое изображение строения граничного смазочного слоя, образующегося на поверхностях стружки и инструмента при резании в среде СОТС, содержащей:
a — поверхностно-активную присадку;
b — химически-активную присадку;
c — присадки обоих типов;
— дифильная молекула ПАВ;
— частица химически-активного вещества;
— физисорбционная связь;
— хемосорбционная связь

Резонным возражением против существования описываемого процесса явилась бы констатация того, что подобного рода сложной структуре особенно трудно образовываться при высокой температуре, стремящейся увеличить энтропию молекулярной системы, разупорядочить последнюю.

Однако, мы должны учитывать то обстоятельство, что роль температуры в таком процессе неоднозначна, двояка.

Наряду с тенденцией разупорядочения системы, рост температуры ускоряет термодинамически возможные процессы, быстрее идет диффузия — и эти факторы способствуют более быстрому формированию смазочного слоя, скорейшему его структурному упорядочиванию еще до того, как он будет жестко зафиксирован химическими связями. Кроме того, нельзя не учитывать тот факт, что процесс формирования такого «композитного» слоя необратим, поскольку «сшивка» его элементов есть процесс химический, и «разупорядочить» такой слой означает полностью его разрушить.

Как мы уже отмечали, идея композитного, «полимеризованного» смазочного слоя хорошо согласуется с многочисленными экспериментами, которые мы хотим проиллюстрировать некоторыми нашими опытными данными.

Выполнялись опыты по получистовому точению коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т резцами с режущей частью из твердого сплава марок ВК8 и Т5К10. Точение производилось при следующих режимах резания: скорость резания v = 3,2 м/с, подача s = 0,13 мм/об., глубина резания t = 0,5 мм. СОТС подавалась в зону резания в виде свободно падающей струи при расходе 500 мл/мин. Геометрия резцов имела следующие параметры: $\gamma = 9^\circ$; $\alpha = 9^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $\varphi_1 = 9^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

Испытания производились на токарном станке, снабженном устройствами для одновременной регистрации нескольких параметров обработки. Измерялись три ортогональные компоненты силы резания, ЭДС естественной термопары и размерный износ инструмента в радиальном направлении (координата y). На рис. 2. показано влияние на перечисленные параметры добавки к воде неионогенного поверхностно-активного вещества «синтамид-5» (далее обозначается как С-5).

Из приведенных на рисунке графиков можно видеть, что на протяжении существенного пути резания, в ходе обработки прочного и вязкого материала очень маленькая добавка ПАВ значимо снижает силу резания, интенсивность изнашивания инструмента и контактную температуру. На следующей иллюстрации (рис. 3) видно, как влияет на результирующий параметр обработки — размерный износ инструмента — добавка к раствору ПАВ химически-активного компонента, в качестве которого мы испытывали перекись водорода H_2O_2.

Из графиков, представленных на рис. 3, можно заключить, что увеличение концентрации ПАВ свыше минимального значения не дает прироста эффективности. Это еще раз показывает, поверхностную, адсорбционную природу действия этой присадки. Добавление же к раствору ПАВ небольшого количества H_2O_2 приводит к тому, что при достижении концентрации перекиси порядка 0,01…0,1 % происходит резкое снижение интенсивности изнашивания инструмента (независимо от концентрации ПАВ).

Качественно схожие с представленными результаты были получены при использовании вместо перекиси водорода твердых мелкодисперсных перекисей MgO_2, CaO_2 и ZnO.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные по совместному использованию в составе СОТС поверхностно- и химически-активных присадок согласуются с приведенной выше рабочей гипотезой, предполагающей особое строение граничного смазочного слоя, сходное со структурой трибополимерных пленок.

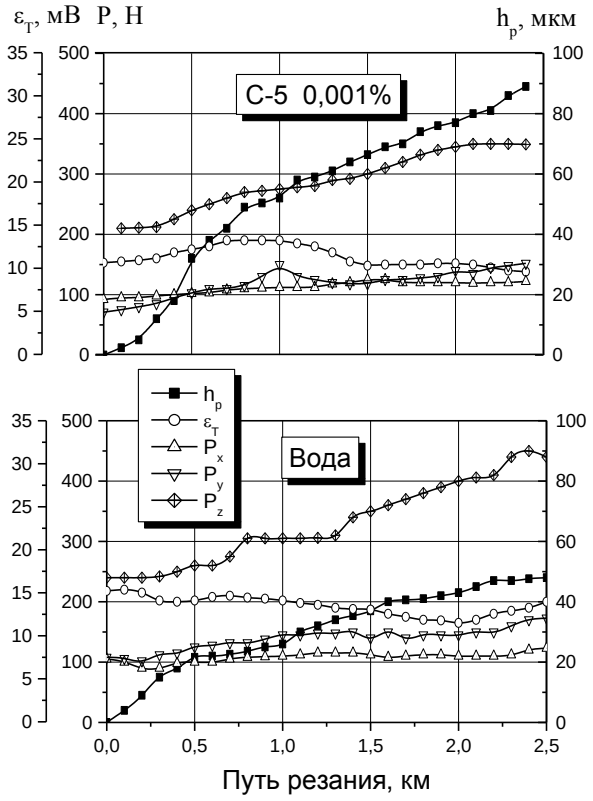


Рис. 2. Зависимости размерного износа (h_p) токарного резца ВК8, величины термо-ЭДС (ε_T) и ортогональных проекций силы резания (P_x P_y и P_z) от длины пути резания при использовании в качестве СОТС дистиллированной воды и 0,01%-го раствора ПАВ С-5

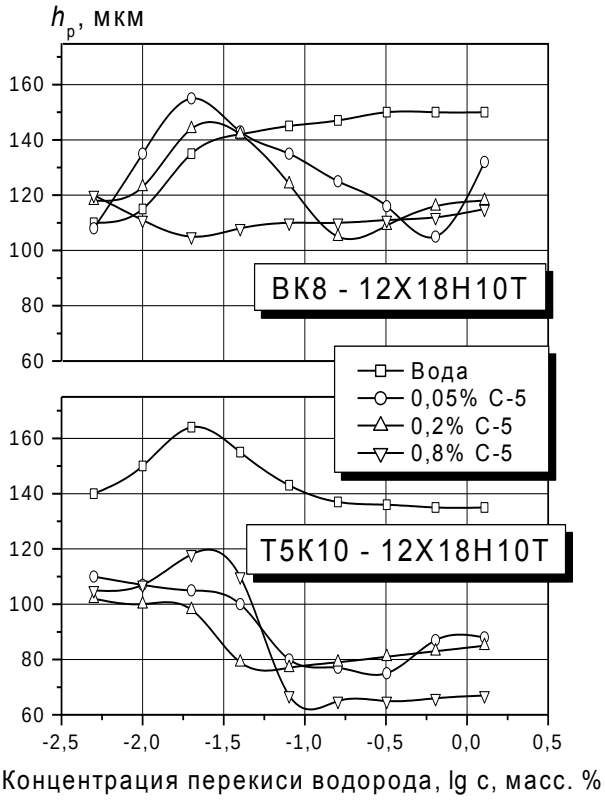


Рис. 3. Влияние концентрации H_2O_2 в растворах С-5, применяемых в качестве СОТС, на размерный износ твердосплавного инструмента при точении стали 12Х18Н10Т резцами из твердых сплавов ВК8 и Т5К10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годлевский В.А., Марков В.В. Синергическое взаимодействие поверхностно- и химически-активных компонентов СОТС для резания металлов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2009. Вып. 1 (27). С. 85 – 90.
2. Латышев В.Н., Марков В.В. Применение перекисных соединений в качестве СОЖ при резании металлов // ЦНИИТЭИ Легпищемаш, вып. «Технология машиностроения», 1974. № 10, С. 6–12.
3. Williams J.A., Tabor D. The role of lubricants in machining // Wear. 1977. V. 43. № 3. P. 275-292.
4. Годлевский В.А., Латышев В.Н., Волков А.В., Маурин Л.Н. Проникающая способность СОТС как фактор эффективности процесса обработки резанием // Трение и износ, 1995. Т.16. № 5. С. 938–949.
5. Astakhov V.P., Godlevskiy V.A., Joksch S. and others. Metalworking fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. 413 p.
6. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. М.: Машиностроение, 1985, 65 с.
7. Mizuhara K. Experimental evaluation of cutting fluid penetration // Tribologia, 1992. V. 11. № 2. P. 20-29.
8. Chakraborty S.K., Bhattaharyya A., Sen G.C. Chemistry of cutting fluids action // J. Inst. Engrs. (India). Chem. Engng. Div. 1968. V. 48. № 10. Part 3. P. 149-159.
9. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 214 с.
10. Берёзина Е.В., Годлевский В.А., Латышев В.Н., Егоров С.А., Жукова Л.А. К механизму смазочного действия растворов производных фталоцианина в процессах металлообработки // Известия АН РФ. Серия физическая, 1995. Т. 59. № 3. С. 161–165.
11. Плетнев М.Ю. О природе взаимодействия в растворе смесей неионогенных и анионных поверхностно-активных веществ // Коллоидный журнал, 1987. Т. 49. № 1. С. 184–187.
12. Лазюк Ю.Н. Влияние поверхностно-активных СОТС на механическую обработку кремния и арсенида галлия / Дисс. ... канд. хим. наук, Иваново, 1985. 165 с.
13. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Механизм действия противоизносных присадок к маслам. М.: Химия, 1978. 224 с.

Работа поддержана грантом Минобразования РФ в рамках госзадания в сфере научной деятельности (грант № 9.700.2014/К).

V.A. Godlevskiy[1], V.V. Markov[2]

COMPATIBILITY PRINCIPLE OF DIVERSE ADDITIVES IN TRIBO-ACTIVE METALWORKING FLUIDS

[1]Ivanovo State University, Ivanovo, Russia;
[2] Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia

Abstract

The problem of joint application in metalworking fluids compositions surface- and chemically-active additives is considered. Results of cutting fluids tests, containing additives with oxigenic chemically-active additives are resulted. The hypothesis about special structure of the boundary lubricant layers generated by two tribo-active components was formulated.

Key words: metal cutting, metalworking fluids, surfactants.

REFERENCES

[1] Godlevskiy V.A., Markov V.V. Synergic interaction of superficial- and chemically-active metalworking fluids components // Liquid crystals and their practical use. 2009. # 1 (27). P. 85 – 90. (In Russian).
[2] Latyshev V.N., Markov V.V. The peroxyde substances application as metalworking fluids // TSNIITEI LEIPISCHEMASH, Issue. «Machinery technology», 1974. № 10, P. 6–12. (In Russian).
[3] Williams J.A., Tabor D. The role of lubricants in machining // Wear. 1977. V. 43. № 3. P. 275-292.
[4] Godlevskiy V.A., Latyshev V.N., Volkov V.V., Maurin L.N. The kinetics of lubricant penetration action during machining // Lubrication Science Volume 9, Issue 2, February 1997. P. 127–140.
[5] Astakhov V.P., Godlevskiy V.A., Joksch S. and others. Metalworking fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Wood-head Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. 413 p.
[6] Latyshev V.N. Increasing of metalworking fluids effectivity. Moscow: Mashinostrojenije, 1985, 65 p. (In Russian).
[7] Mizuhara K. Experimental evaluation of cutting fluid penetration // Tribologia, 1992. V. 11. № 2. P. 20-29.
[8] Chakraborty S.K., Bhattaharyya A., Sen G.C. Chemistry of cutting fluids action // J. Inst. Engrs. (India). Chem. Engng. Div. 1968. V. 48. № 10. Part 3. P. 149-159.
[9] Kostetskiy B.I., Natanson M.E., Bershadskiy L.I. Mechano-chemical processes during boundary friction. Moscow: Nauka, 1972. 214 p. (In Russian).
[10] Berezina E.V., Godlevskiy V.A., Latyshev V.N. and others. To the mechanizm of phthalocyanine derivatives solutions lubrication action in

metal cutting processes // Izvesija AN RF. Physical series, 1995. V. 59. № 3. PP. 161–165. (In Russian).
[11] Pletnev M.Ju. About the interaction nature in a solutions of non-ionogenic and ionogenic surfactants mixtures // Kolloidny zhurnal, 1987. V. 49. № 1. PP. 184–187. (In Russian).
[12] Lazjuk Lu.N. Influence of surface-active COTC on machining of silicon and gallium arsenide / Diss. ... cand. chem. science, Ivanovo, 1985. 165 p. (In Russian).
[13] Zaslavskiy Ju. S., Zaslavskiy R.N. The action mechanism of oils anti-wear additives. Moscow, Chimija, 1978. 224 p. (In Russian).

УДК 621.822-752.3 ; DOI 10.1872/MMF-2016-36

В.А.Голубков[1], И.Н.Лукьяненко[2], Е.Э.Аман[3]

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СМАЗКИ ОПОР ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

[1]Виктор Александрович Голубков, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: viktor-golubkov@yandex.ru

[2]Ирина Николаевна Лукьяненко, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: irina.n.lukyanenko@gmail.com

[3]Елена Эдуардовна Аман, аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: anhelena7@gmail.com

Аннотация

Наличие смазки в зоне контактирования элементов трения шарикоподшипников существенно замедляет процесс разрушения опор электромеханических устройств приборостроения. В связи с этим представляет практический интерес неразрушающий контроль состояния смазки на этапе сборки и эксплуатации изделий. Метод реализован на основе диагностики технического состояния шарикоподшипника. Путем увеличения статических нагрузок добиваются возрастания динамической нагрузки на телах качения, что приводит к увеличению статической деформации и позволяет дать заключение о состоянии несущей способности смазки. Заключение о состоянии смазки на этапе сборки и эксплуатации дается по коэффициенту качества смазки.

Ключевые слова: трение, подшипник, смазка, диагностика, надежность, опоры подшипника, анализ, деформация

Обеспечение работоспособности и надежности электромеханических систем приборостроения имеет решающее значение в деле обеспечения ресурса и безотказной работы.

Задачи неразрушающей диагностики позволяют распознавать состояние технических систем в любой момент времени, определить причины нарушения работоспособности, установить вид дефекта и прогнозировать его изменения.

Установлено [1, 2], что наиболее слабыми звеньями электромеханических систем приборостроения, с точки зрения надежности, являются узлы трения, а именно подшипниковые опоры. Поэтому оценка ресурса изделия проводится на основе результатов диагностики подшипников. Износ элементов подшипников связан, как правило, с процессом контактирования шариков с кольцами и шариков с сепаратором. Наличие смазки между сопряженными деталями опор позволяет разделить соприкасающиеся элементы трения и в значительной степени замедлить процесс разрушения.

При выработке ресурса узлов трения, вследствие наличия дефектов формы поверхностей, разделенных смазочным слоем, происходит их неравномерный износ.

Смазочный слой со временем испаряется, загрязняется микрочастицами, изменяет свои электрические, химические и физические свойства. При этом несущая способность N, характеризующая подъемную силу смазочной пленки, постепенно уменьшается, что приводит к увеличению динамической нагрузки P со стороны взаимодействующих поверхностей и прорывам смазки, при которых происходят непосредственные контакты поверхностей сопряженных элементов. Прерывистое контактирование, в свою очередь, вызывает нагрев в моменты непосредственного металлического взаимодействия, увеличивается суммарный момент трения и уровень собственной вибрации.

Различают два основных режима работы смазки: гидродинамический и граничный. Гидродинамический режим работы является наиболее благоприятным. В этом режиме между телами качения, толщина смазочного слоя не менее чем в 2 – 3 раза превышает среднеквадратичную высоту неровностей. При нарушении гидродинамического режима наблюдаются прорывы смазочного слоя, которые характеризуют граничный режим работы смазки.

Анализ литературы [1] показывает, что критерием перехода от гидродинамического режима работы смазки к граничному является наличие прорывов смазочного слоя, которое по времени составляет 5%.

В работе [3, 4] показано, что работоспособность смазки зависит не только от технологических погрешностей шарикоподшипника, но и от несущей способности смазки.

В зоне контакта тел качения действуют две основные силы: динамическая нагрузка и несущая способность смазки. Прорывы смазочного слоя происходят при превышении динамической нагрузкой несущей способности смазки.

Следовательно, диагностику режима контактирования можно проводить, анализирую функцию следующего вида:

$$e(P_{qi} - N), \tag{1}$$

где P_{qi} – сила упругости, действующая со стороны i – го шарика на q-е кольцо подшипника, N – несущая способность смазки;

$e(x) = \begin{cases} 1, x > 0, \\ 0, x \le 0. \end{cases}$ – функция контактирования.

Динамическая нагрузка F_{qi}, действующая на шарики, зависит от контактных деформаций δ_{qi} и несущей способности смазочного слоя N, выражается

$$F_{qi} = (B\delta_{qi}^{3/2} e(\delta_{qi}) - N) e(B\delta_{qi}^{3/2} e(\delta_{qi}) - N).$$

Выражение для несущей способности смазочного слоя можно представить в виде [2]

$$N = \frac{\omega_q \eta}{a_q^2 S_0} \sqrt{\frac{S - S_0}{bq}} \left(1 + \frac{S_0}{2(S - S_0)} \ln \frac{1 - \sqrt{\frac{S - S_0}{S}}}{1 + \sqrt{\frac{S - S_0}{S}}} \right), \tag{2}$$

где ω_q – угловая частота вращения шарика относительно q-го кольца, η – вязкость смазки, определяемая с учетом условий работы подшипникового узла, a_q, b_q – приведенные кривизны контактирующей поверхности q-го кольца соответственно в направлении качения и перпендикулярном направлении, S_0 – минимальная толщина слоя смазки, S – толщина слоя смазки в свободной зоне.

Несущая способность смазочного слоя изменяется со временем в результате разрушения смазки и, следовательно, изменения ее параметров η, S, которые выражаются

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \varepsilon t^{\gamma} + \eta_0, \\ S(t) &= S(0) e^{-\beta t} + S_0, \end{aligned} \tag{3}$$

где ε, γ, β – коэффициенты, зависящие от свойств смазки и условий работы подшипникового узла.

Анализ (2), (3) показывает, что $N \to 0$ при $t \to \infty$, поэтому введение узлов подпитки, которые способствуют уменьшению степени изменения η

и S, увеличивает стабильность N, а следовательно, и ресурс работы подшипника.

Сила упругости является функцией времени, зависящей от полной деформации δ_{qi} в месте контакта и может быть вычислена по формуле

$$P_{qi}(t) = B\delta_{qi}^{3/2}(t)(\delta_{qi}(t)), \quad (4)$$

где B – конструктивный параметр, характеризующий упругие свойства подшипника.

Полная деформация δ_{qi} зависит как от условий нагружения, так и от технологических погрешностей изготовления и сборки подшипника

$$\delta_{qi} = \delta_{q0i} + \sum_{p} x_P \alpha_{pi} - \sum_{q=1}^{2} \delta r_{qk} + \delta d_i, \quad (5)$$

где δ_{q0i} – статическая деформация тел качения; x_p – координата вектора вибрации подвижного кольца, α_{pi} – коэффициент, зависящий от угла контакта и углового положения i – го шарика, r_q – дефекты формы и расположения элементов подшипника, δd_i – разноразмерность шариков.

Статическая деформация δ_{q0i} зависит от условий нагружения и определяется из уравнений равновесия внутреннего кольца шарикоподшипника [2].

Для определения полной деформации тел качения δ_{qi} кроме статической деформации δ_{q0i} необходимо иметь данные по вибрации изолированного подшипника. Он определяется согласно выражению [3]

$$\mathbf{X} = \mathrm{W}\mathbf{F},$$

где $\mathbf{F}$ – вектор возмущающих сил,
W – передаточная функция.
$\mathbf{X} = \{x_{p1}, x_{p2}, \ldots, x_{pn}\}$.

Анализ выражений (1), (3), (5) показывает, что режим работы смазки при известных условиях работы шарикоподшипников, их технологических погрешностей изготовления и сборки, а также несущей способности смазки может быть определен посредством расчета коэффициента качества смазки

$$K = \frac{\omega_c}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_c}} \sum_{i=1}^{m} e\left(P_{qi}(t) - \mathrm{N}\right) dt. \quad (6)$$

где ω_c – частота вращения сепаратора.

Заключение о режиме работы смазки принимается согласно следующему правилу:

$$K = \begin{cases} \leq 0,05 \text{ - гидродинамический режим,} \\ > 0,05 \text{ - граничный режим.} \end{cases}$$

Рис. 1. Структурная схема алгоритма диагностики смазки.

Для новых подшипников, как правило, $K = 0$ и несущая способность смазки неизвестна. Анализ (6) показывает, что определить несущую способность смазки можно путем увеличения динамической нагрузки P_{qi} и добиваясь пятипроцентных прорывов смазочного слоя.

Наиболее эффективным методом повышения P_{qi} является увеличение статической нагрузки, что приводит к возрастанию статической деформации, входящей в выражение (4).

Структурная схема алгоритма диагностики смазки представлена на рис.1. Согласно схеме, анализ режима контактирования тел качения производится путем измерения контактного сопротивления [1] между внутренним и наружным кольцами шарикоподшипника, работающего при нормальных нагрузках.

Процесс определения несущей способности смазочного слоя шарикоподшипника показан на рис. 2, где приведены экспериментальные импульсы контактирования элементов подшипника типа 5-800 63 ЮТ С-20 с технологическими погрешностями беговых дорожек внутреннего кольца (типа овал) r_{22} = 0,2 мкм, наружного кольца (типа овал) r_{12} = 0,5 мкм, при осевой нагрузке R_1 = 2 Н, на рис. 2 б, г – результаты расчета динамической нагрузки, действующей на шарики 1 – 7 соответственно за время, равное периоду вращения сепаратора.

Подбирается значение несущей способности смазки N так, чтобы импульсы контактирования, рассчитываемые теоретически (рис. 2, в), были по характеру идентичны экспериментальным (рис. 2, а). В данном примере несущая способность смазки лежит в пределах 5,5 – 6.

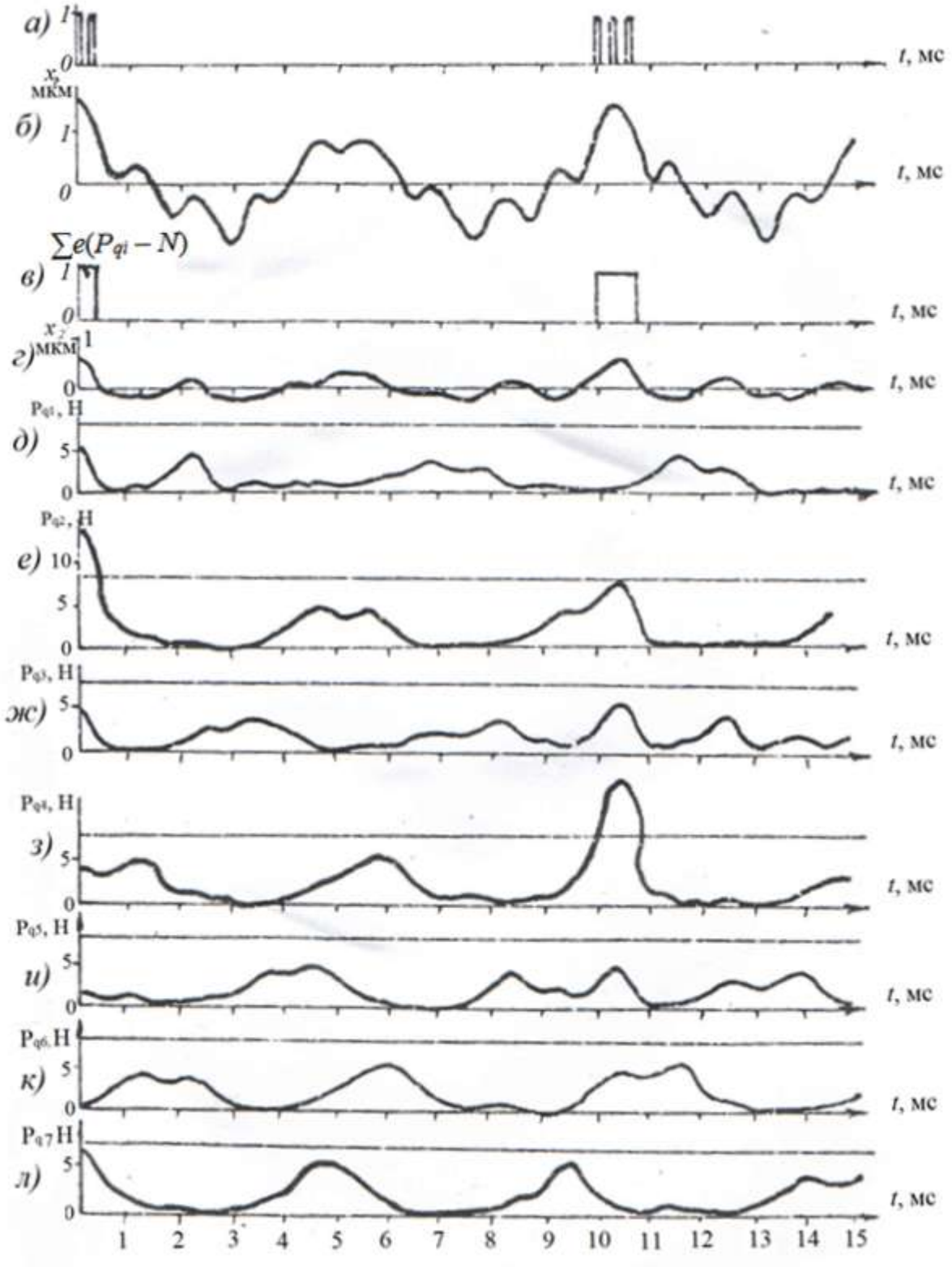


Рис. 2. Процесс определения несущей способности смазочного слоя шарикоподшипника.

Таким образом, для определения технического состояния смазки на этапе сборки малогабаритного устройства необходимо

– провести диагностику, для определения технического состояния элементов шарикоподшипника,

– добиться перехода от гидродинамического режима работы к граничному путем увеличения статических нагрузок,

– определить динамические нагрузки на тела качения,

– решить уравнение (6) относительно несущей способности смазки.

Рассмотренный метод позволяет оценить работоспособность смазки в условиях функционирования устройств приборостроения и дать оценку технического состояния шарикоподшипников с точки зрения надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *А.Г. Горбунов, В.М. Малыгин. Электрический контроль гидродинамического режима смазки шарикоподшипниковых конструкций*// Вестник машиностроения. – 1987. – №11. – С.48.
2. *А.К. Явленский, К.Н. Явленский.* Теория динамики и диагностики систем трения качения. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 184с.
3. *К.Н. Явленский, А.К. Явленский.* Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение,1983. – 121с.
4. *А.Г. Горбунов. Оценка надежности подшипниковых узлов электрических машин*// Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2000. – №1. – С.50

V.A.Golubkov[1], I.N.Lukyanenko[2], E.E.Aman[3]

DIAGNOSTICS OF GREASE TECHNICAL CONDITION OF BEARING AT MECHANICAL INSTRUMENTATION DEVICES

all: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Abstract

The grease in the elements of ball bearings contact area slows down the destruction process of the supports electromechanical instrumentation devices. Therefore not destroying control of grease condition at the assembly and exploitation stage of the work is of practical importance. The method is implemented on the basis of diagnostics of technical condition of the ball bearings. By increasing the static loads achieve to increasing dynamic load on the rolling bodies, it leads to increase the static deformation and allows to conclude on the state

of grease bearing strength. The conclusion about the condition of grease at the stage of the assembly and exploitation given according to a coefficient of the grease.

Keywords: friction, bearing, grease, diagnostics, reliability, bearing supports, analysis, deformation

REFERENCES

[1] Gorbunov A.G., Malygin V.M., Electric control of the hydrodynamic grease of ball bearing structures //Journal of Mechanical Engineering 1987, №11, p. 48 (rus.)

[2] Jawlensky A.K., Jawlensky K.N., The theory of the dynamics and diagnostics rolling friction systems. Leningrad, Leningrad State University, 1978. 184 p. (rus.)

[3] Jawlensky K.N., Jawlensky A.K., Vibration diagnostics and forecastinging the quality of mechanical systems. Leningrad, Engineering 1983. 121p. (rus.)

[4] Estimation of the reliability of the bearing units of electric machines// Problems of mechanical engineering and automatization, 2000, №1, p.50 (rus.)

УДК 620.179.17 ; DOI 10.1872/MMF-2016-37

В.П.Гомера[1], Е.Ю. Нефедьев[2], А.Д. Смирнов[3], Д.Н. Ковалев[4]

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНОГО ШВА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

[1]Виктор Петрович Гомера,
инженер ОТН ООО «КИНЕФ»
Россия, г. Кириши, Ленинградская обл.
Тел.: (813)6897276, e-mail: Gomera-V-P@yandex.ru

[2]Евгений Юрьевич Нефедьев, к.ф.-м.н.,
Зав. лабораторией ОАО «НПО ЦКТИ»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04;
e-mail: ne246@ya.ru

[3]Анатолий Джумамуратович Смирнов,
инженер ООО «КИНЕФ», аспирант ОАО «НПО ЦКТИ»
Россия, Санкт-Петербург
Тел: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04,
E-mail: kfnmpa@mail.ru

[4]Дмитрий Николаевич Ковалев,
ведущий инженер отдела прочности ОАО «НПО ЦКТИ»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04,
e-mail: ne246@ya.ru

Аннотация

В работе рассматривается применение метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля качества сварного шва в процессе его изготовления. Исследованы возможности АЭ метода по выявлению в реальном времени дефектов сварного шва при ручной электродуговой сварке под флюсом, и при остывании шва. В результате анализа данных АЭ контроля и данных арбитражных методов неразрушающего контроля предложен набор информативных АЭ параметров, образующих критериальное пространство для разделения сигналов от дефектов и сигналов от помех, сопровождающих процесс сварки. Определение с высокой точностью координат дефектов создает возможность их оперативного исправления в

процессе сварки с минимальным количеством выборки металла; сокращается объем применения методов традиционного контроля.

Ключевые слова: сварной шов, процесс сварки, трещина, акустико-эмиссионный метод, ультразвуковой контроль, капиллярный контроль

Введение

Обеспечение надежности толстостенных корпусных конструкций во многом зависит от качественного изготовления сварных швов. Для оценки качества сварки в таких отраслях как энергетика и судостроение в настоящее время чаще всего применяются радиографический (РГК) и ультразвуковой (УЗК) методы контроля. Этими методами степень опасности дефектов оценивается, в основном, по их формальным размерам, без учета формы, определяющей степень концентрации локальных напряжений, уровень которой определяет реальную опасность дефектов. Метод АЭ, в силу физических принципов, лежащих в его основе, позволяет выявлять наиболее опасные, склонные к развитию дефекты, независимо от их текущей величины. Для него вероятность выявления дефекта тем выше, чем выше острота дефекта и, соответственно, концентрация напряжений в его окрестности. Это определяет все более широкое применение метода АЭ при контроле качества ответственных металлоконструкций, например, во время проведения их перегрузочных испытаний [4,6,7,8].

Исследования по использованию АЭ в качестве перспективного метода контроля сварных соединений в процессе их изготовления [12-15] начались достаточно давно. Тогда было установлено, в частности, существование количественной зависимости между АЭ активностью и процессом образования «холодных» трещин на стадии остывания шва: АЭ регистрировалась в течение 265 часов после окончания сварки. Однако, решение основной из поставленных тогда задач – контроль каждого прохода сварного шва непосредственно в процессе сварки под флюсом («горячие» трещины) получено не было. Это объяснялось тем, что выделение и идентификация сигналов от дефектов на фоне акустических сигналов, порождаемых сварочной дугой, истечением защитного газа, кристаллизацией, фазовыми превращениями, растрескиванием шлаковой корки и иными помехами, сопровождающими процессы сварки, были невозможны с помощью АЭ аппаратуры, используемой в то время [13].

В настоящее время, с развитием приборных средств АЭ контроля, решение задач по контролю качества сварного шва в процессе изготовления получило дальнейшее развитие [5,9]. С решением задачи по выделению сигналов от дефектов из общего массива АЭ данных связана также возможность решения задачи по оценке по параметрам АЭ допустимости выявленных дефектов. Решение данных проблем рассматривается, например, в работах [1,2,3,10,11]. В качестве

критериальных параметров при этом, как правило, предлагается использовать параметры волновой формы и частотного спектра.

Он-лайн идентификация АЭ источников по их волновым и частотным характеристикам является перспективным методом анализа данных. Однако этот метод требует оперативного анализа в режиме реального времени огромных объемов информации, поступающих с высокой интенсивностью, что не всегда реализуемо на практике. Поэтому для упрощения процедуры выделения сигналов от дефектов, особенно в условиях производства, предпочтительнее использовать набор основных (импульсных) акустико-эмиссионных параметров [16]. Данный подход позволяет уменьшить на порядки объем информации, обрабатываемой АЭ системой, не снижая достоверности контроля. Также появляется возможность использования менее сложных контрольных систем, что приводит к снижению стоимости диагностики.

Целью данного исследования является разработка методики АЭ контроля процесса сварки в реальном времени, позволяющей оперативно выявлять на фоне существенных акустических помех развивающиеся трещины в результате их идентификации по набору основных параметров АЭ сигналов. В образующемся пространстве критериальных признаков происходит разделение АЭ сигналов по их физической природе, а также оценка соотношения относительных размеров структурных источников АЭ.

Результаты исследования основываются на анализе формы сигналов от дефектов сварного шва с известными характеристиками, в том числе от дефектов искусственного происхождения, и на арбитражной инспекции результатов АЭ методами визуального, ультразвукового и капиллярного контроля, а также ультразвукового контроля с использованием фазированной решетки.

Использование предлагаемой методики в сочетании с высокой точностью локации источников АЭ создает предпосылки для оперативного выявления трещинообразных дефектов шва в процессе сварки и их исправления с минимальным объемом выборки металла. При этом появляется возможность существенного сокращения объема работ по применению традиционных методов контроля.

Проведение эксперимента

Исследования проводились при многопроходной сварке под флюсом стыковых прямых швов с V–образной разделкой металлических пластин из низколегированной стали размером 300х600х27 мм. В экспериментах использовался АЭ комплекс AMSY-5 (Vallen Systeme, ФРГ). Управление системой и обработка сигналов осуществлялись с применением программного пакета VisualAE. Использовались интегральные пьезоэлектрические резонансные ($f_р$ = 150 кГц) преобразователи АЭ (ПАЭ)

VS150-RIC. Диапазон контроля составлял Δf = 90-450 кГц. Порог фиксированный, равный 50 dB.

Дополнительно использовался АЭ комплекс СДАЭ-16. На рис. 1 представлена схема эксперимента. Контроль проводился в процессе сварки, кристаллизации и остывания сварного шва.

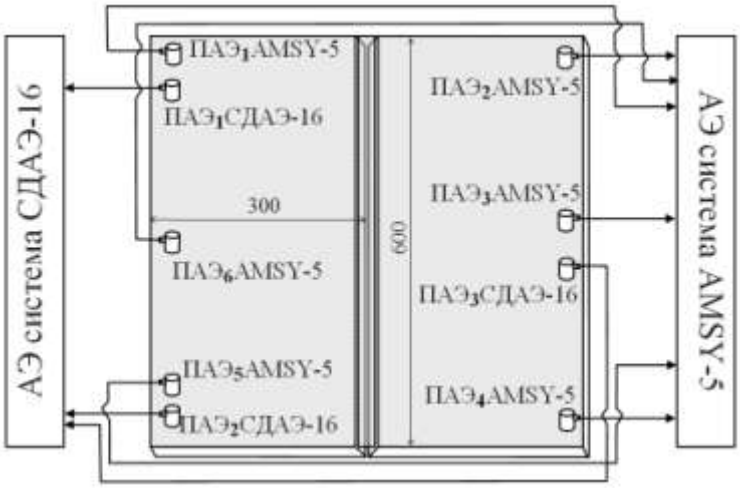


Рис. 1. Расположение ПАЭ на образце стыкового сварного соединения

Инициирование структурных АЭ источников в сварном шве происходило под действием термических напряжений во время сварки и остывания сварочной ванны.

Возможность для образования дефектов в сварном шве осуществлялась:

– за счет использования на отдельных участках шва специально подобранных электродов и различных режимов сварки. Для формирования горячих трещин использовались электроды Т-590. Для формирования холодных трещин использовались электроды ЭЛЗ Н3;

– в результате введения в сварной шов ванадиевой цилиндрической вставки (длина l = 13 мм) (рис. 2).

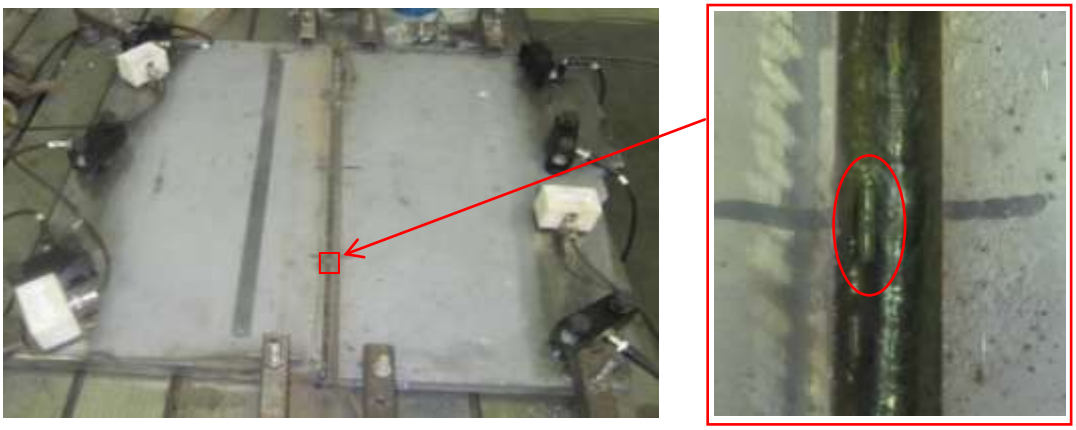


Рис. 2. Пример создания искусственных дефектов в сварном шве: ванадиевая вставка, расположение в шве (x = 13 см)

Первая половина шва заварена электродами УОНИ-13/55. Третья четверть шва варилась электродами ЭЛЗ-Н3, четвертая четверть – электродами Т-590.

На каждом этапе эксперимента выполнялась локализация источников АЭ по результатам планарной и линейной локации.

Заваренный образец был проконтролирован визуальным и ультразвуковым контролем. Для УЗ контроля сварных швов после полного завершения сварки применялись ультразвуковые дефектоскопы УД 3-103 «Пеленг» и HARFANG VEO TKIT (Sonatest Ltd, Великобритания).

Для определения формы и размеров внутренних дефектов шва, а также для подтверждения точности их локализации методом АЭ, был использован капиллярный метод при послойной выборке шва.

Результаты ультразвукового контроля

На рис. 3 представлены результаты ультразвукового сканирования сварного шва, полученное с применением фазированной решетки, позволяющее оценить распределение дефектов по длине и высоте шва.

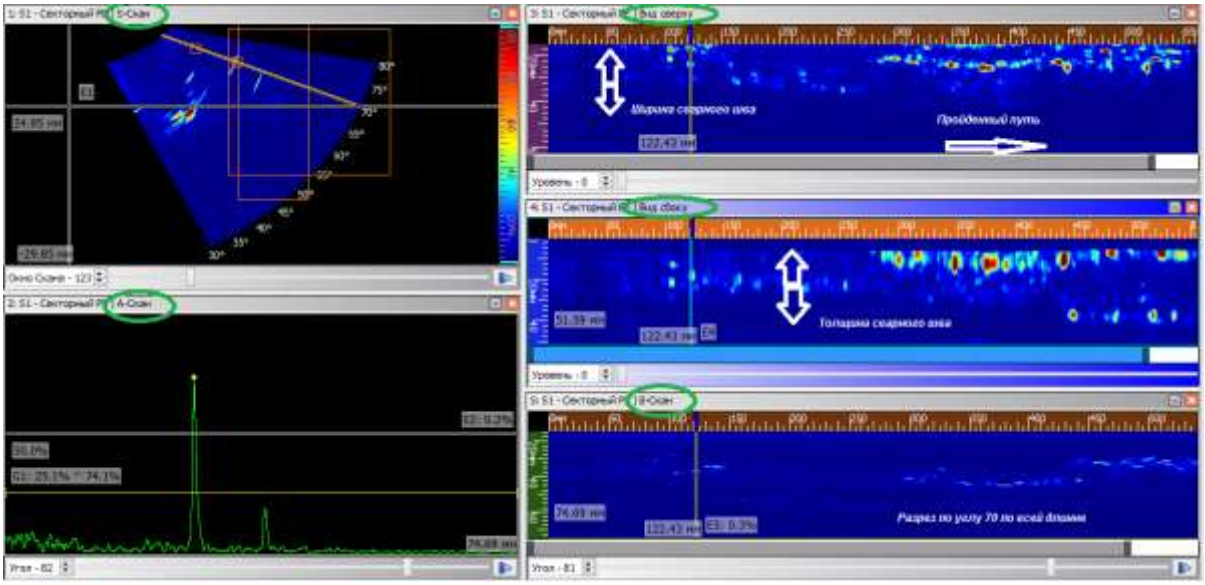


Рис. 3. Результаты УЗК сварного шва дефектоскопом на фазированной решетке

В данной работе рассматриваются источники АЭ, расположенные на участке с ванадиевой вставкой и в последней четверти шва. Данные УЗК, полученные дефектоскопом УД 3-103 на этой четверти, были пересчитаны через размер зарубки и амплитуду превышения сигнала от дефекта над сигналом зарубки, и были просуммированы на каждом сантиметре участка шва и результаты сведены в таблицу 1. В ней представлены данные о дефектах на разной глубине шва, в зависимости от их локализации по его длине. Эти результаты далее сопоставлялись с данными АЭ контроля.

Таблица 1. Результаты УЗК шва на участке *X* = [46;58] см

X-координата, [см]	Глубина от верхней поверхности, [см]	Амплитуда относит. зарубки 3,5х2 мм, [dB]	Глубина от верхней поверхности, [см]	Амплитуда относит. зарубки 3,5х2 мм, [dB]	Глубина от верхней поверхности, [см]	Амплитуда относит. зарубки 3,5х2 мм, [dB]	Общая площадь дефекта, [мм^2]
46	8	+6	11	+5			26
47	8	+8					18
48	8	+10	22	-2			22
49	8-11	+2	23	+2			27
50	8	+7	25	+2			25
51	11	+12	23	+6			42
52	25	+11					25
53	14	+5	25	+4			23
54	11	+5	12	+0	26	+4	34
55	8	+5	25	+3			22
56	9	0	25	+3			17
57	14	0	24	+3			17
58							

Результаты акустико-эмиссионного контроля и их анализ

Во время АЭ контроля производилась запись формы сигналов, генерируемых источниками АЭ различной природы, определялись основные параметры импульсов, осуществлялась локация источников АЭ.

Пример результатов локализации АЭ источников в процессе двух последовательных проходов сварки показан на рис.4. По оси ординат расположены координаты источников вдоль шва (в сантиметрах), по оси абсцисс – время (в секундах), в течение которого проводились операции сварки, смены электрода, отбивания шлака и т.д. На этом графике локализованы сигналы от всех типов источников, без фильтрации. Символам различной формы соответствуют различные значения амплитуд сигналов.

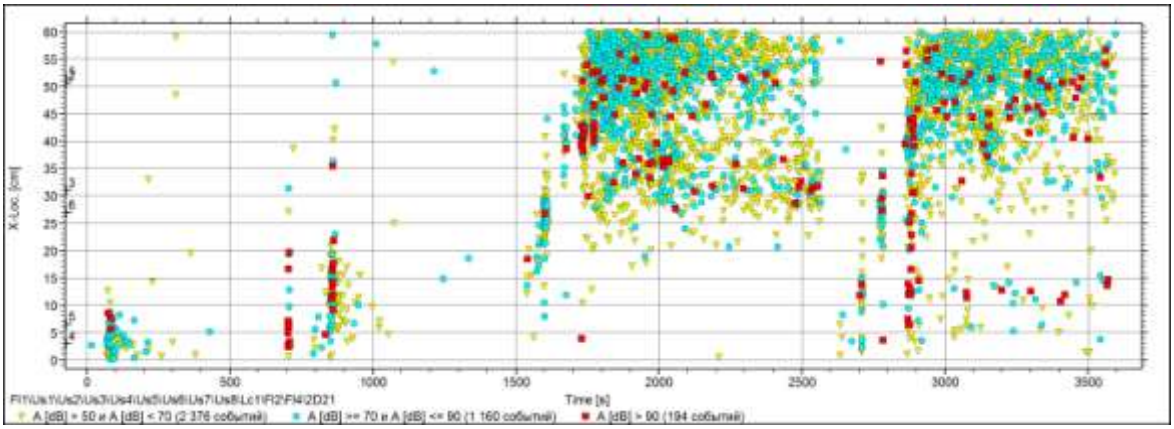


Рис. 4. Локализация источников АЭ вдоль шва во время двух последовательных проходов сварки

На рис. 5 представлены типичные волновые формы сигналов и их спектральные разложения. Сопоставляя данные о времени реализации и локализации источников АЭ различной природы с соответствующими волновыми формами, удалось связать значительное число сигналов с наиболее вероятными источниками, определившими их генерацию. Идентифицировались формы, связанные с такими источниками АЭ помех как шум сварочной дуги, растрескивание шлака, отбивка шлака, сдувка отбитого шлака и т.д.

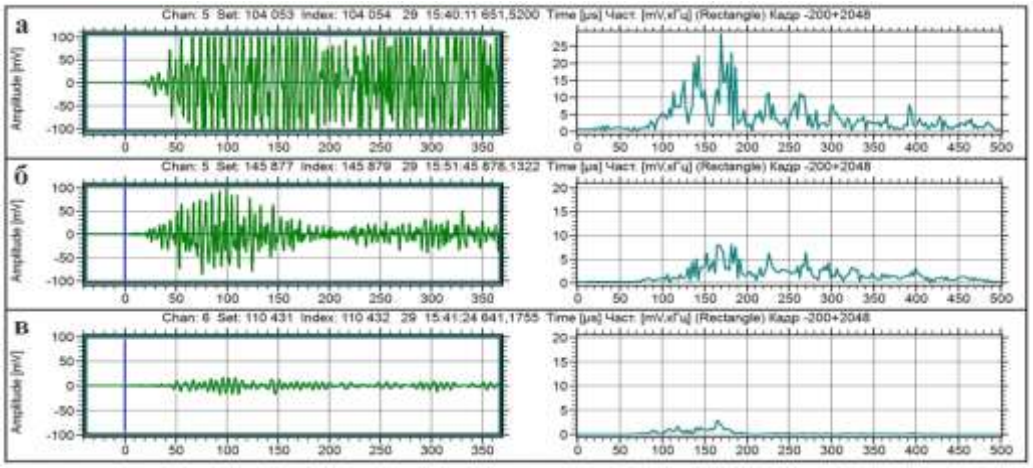


Рис. 5. Примеры волновых форм для АЭ источников различного типа: (а) шум сварочной дуги; (б) дефект значительного размера; (в) структурный источник небольшого размера

На основе анализа форм сигналов от разных источников и вида распределений сигналов по различным параметрам были определены параметры, формирующие пространство признаков, в котором можно было бы решить задачу разделения АЭ источников различного типа на классы. На рис.6 показаны результаты двухпараметрического распределения в координатах *D*E/Counts* (длительность * энергия импульса / число осцилляций в импульсе) и *RiseTime* (время нарастания сигнала) множества локализованных АЭ событий, зарегистрированных во время двух последовательных проходов сварки (соответствуют результатам рис.4).

На рис. 7 представлены графики, демонстрирующие применение этого критерия для фильтрации данных во время двух проходов сварки. Перед вторым проходом в зоне А.1 в конце первой четверти шва поместили инициатор дефектов – ванадиевую вставку. Появление в зоне А.1 событий, соответствующих развитию трещин, согласно предложенному критерию, зарегистрировано только после внедрения в этот участок шва вставки и развития трещиноподобных дефектов, связанных с ее наличием (рис.7в, 7г). В зоне А.1 планарной локацией зарегистрировано 15 АЭ событий, соответствующих критерию (рис.8). Если рассматривать их совокупность как локационный кластер размером 5х5 см, то его центр, по длине шва, расположен в *X*=12,2 см, средняя амплитуда импульсов *Amp*=90,17 *dB*.

Можно отметить хорошее, для инженерной практики, соответствие результатов локации, полученных при АЭ контроле, результатам УЗК.

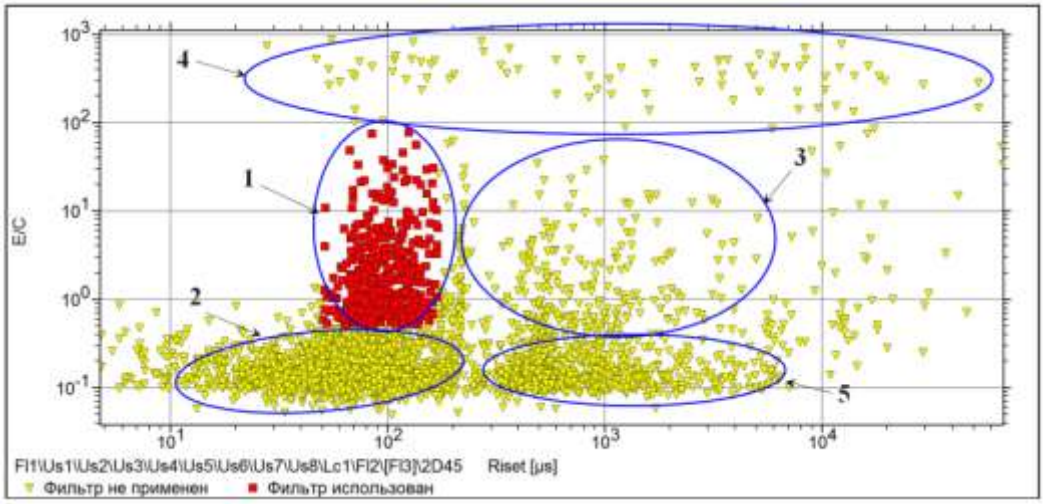


Рис. 6. Результат разделения локализованных источников АЭ на классы в двухмерном пространстве признаков *D*E*/*Count* vs *RiseTime*:
1 – импульсы от АЭ событий, связанных с образованием и развитием дефектов значительных размеров; 2 – микродефекты; 3 – сигналы от наложения импульсов от значительных дефектов и высокоэнергетических шумов; 4 – сигналы от шумов; 5 – наложение сигналов от небольших дефектов и низкоэнергетических шумов

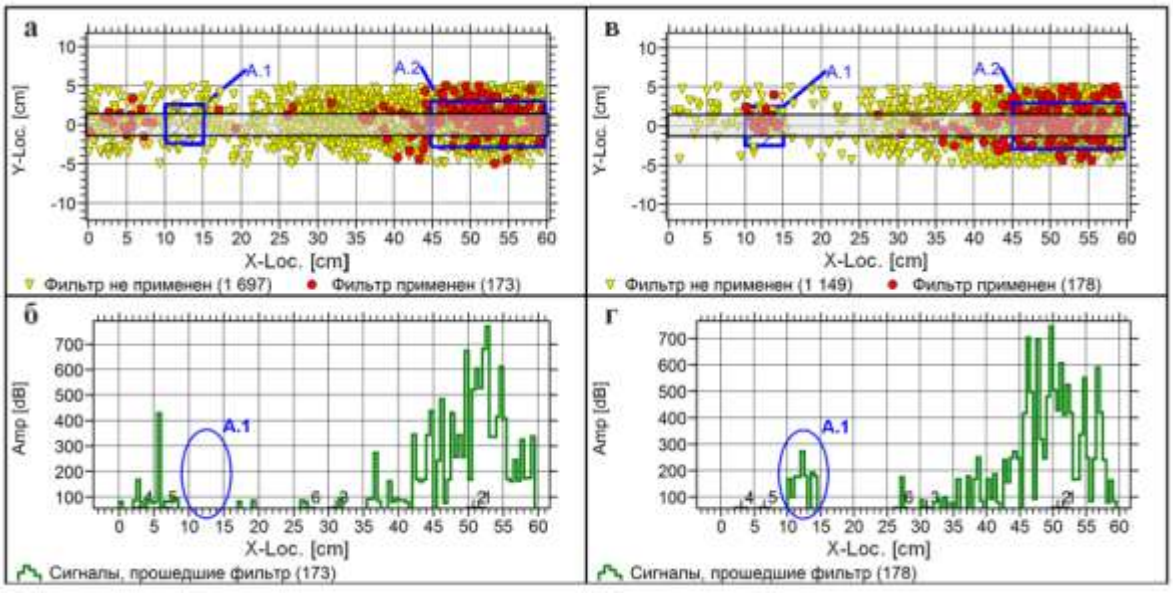


Рис. 7. Результаты планарной локации (а, в) и распределения суммарной амплитуды сигналов вдоль шва (б, в). Графики 7а,7б соответствуют этапу до внедрения в шов ванадиевой вставки на участке А.1. Графики 7в,7г получены после внедрения вставки.

Результаты капиллярного контроля (фото на рис. 9) также подтверждают точность локализации дефекта методом АЭ.

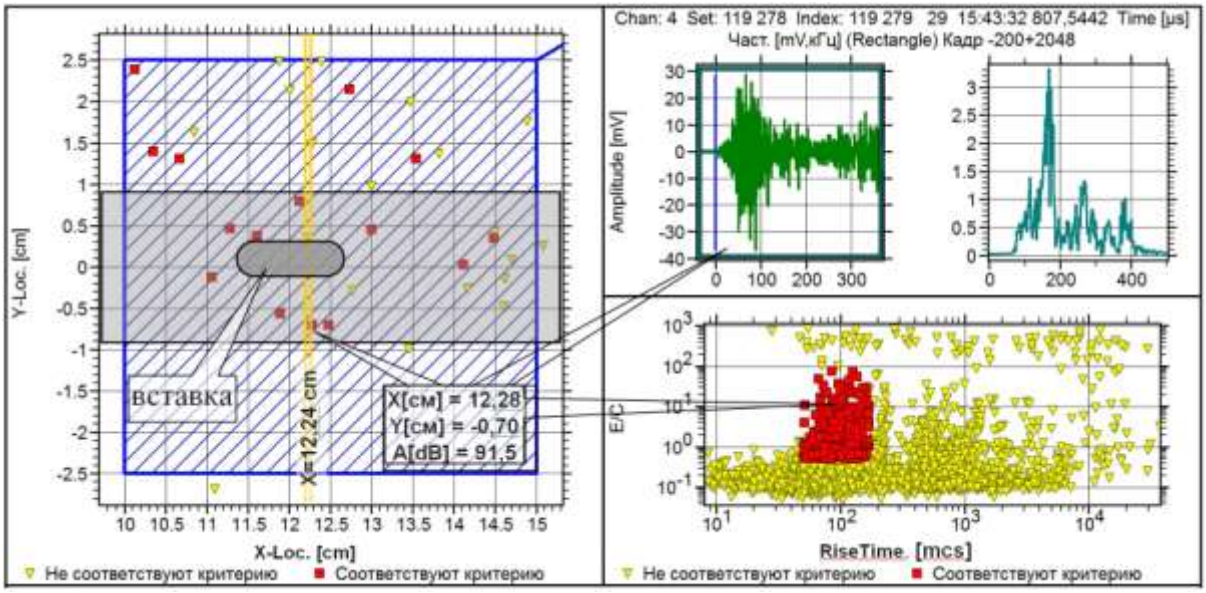


Рис. 8. Результаты локации источников АЭ в месте расположения ванадиевой вставки (зона А.1). Для одного из источников приведены некоторые характеристики первого импульса соответствующего АЭ события: форма сигнала и частотный спектр начального участка сигнала; показано его положение в критериальном пространстве.

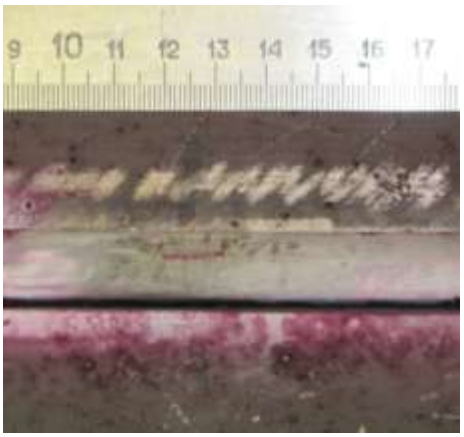


Рис. 9. Индикация трещины в месте внедрения ванадиевой вставки в сварной шов капиллярным методом контроля при послойной выборке металла

На рис. 10 для источников АЭ из зоны А.2 (см.рис. 8) показано распределение суммарных амплитуд для АЭ сигналов, прошедших критериальный фильтр и распределение суммарной площади дефектов по длине этого участка шва по данным из Таблицы 1. Сравнивая результаты на графике, можно отметить хорошее соответствие результатов АЭ контроля и ультразвукового контроля.

Как показывает эксперимент, процессы образования и развития дефектов в ходе сварки и остывания сварного шва являются достаточно устойчивыми и длительно функционирующими источниками АЭ

информации. В результате имеется достаточно данных для того, чтобы сделать выводы о наличии дефекта, месте его расположения, и о его характеристиках даже на фоне зашумленности данных.

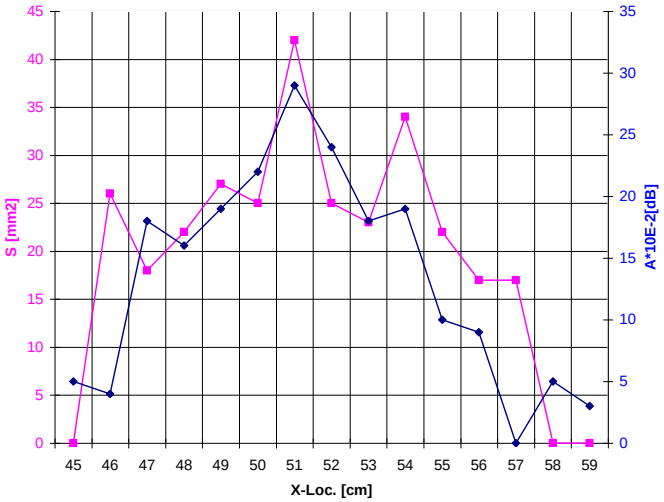


Рис. 10. Соотношение суммарной площади дефектов и суммарной амплитуды сигналов АЭ по длине участка сварного шва в зоне А.2

Дальнейшие исследования предполагают дополнение методики критериальными признаками, использующими результаты анализа волновых форм с помощью технологий идентификации образов, при сохранении возможности оперативной автоматической оценки источников АЭ. В методиках такого рода [17] в качестве обучающей выборки также используются волновые и спектральные характеристики сигналов от известных по условиям эксперимента дефектов.

Выводы

1. Проведено исследование по регистрации АЭ от источников различной природы, возникающих при выполнении ручной дуговой сварки, включая АЭ от дефектов сварного шва.

2. Трещины, выявленные методом АЭ в процессе сварки, подтверждены различными методами УЗК. Обнаруженные методами АЭ и УЗК дефекты подтверждены методом ПВК при послойном вскрытии сварного шва.

3. В результате проведенного исследования продемонстрированы возможности АЭ метода по выявлению в реальном времени трещиноподобных дефектов сварного шва в процессе его изготовления и остывания.

4. Предложено выявлять дефекты сварки на фоне помех в результате разделения источников АЭ в пространстве координат, сформированных из комбинации основных параметров импульсов (*Energy, Counts, Rise Time).* Данный подход позволяет значительно уменьшить объемы

обрабатываемой АЭ системой информации, не уменьшая достоверность результатов контроля.

5. Определение с высокой точностью координат дефектов создает возможность их оперативного исправления в процессе сварки с минимальным количеством выборки металла; сокращается объем применения методов традиционного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль качества сварных соединений в процессе сварки с применением метода акустической эмиссии / Баринов А.В и [др.] // Науч.-техн.вестник ИТМО. – 2013. №5(87) – С.144 - 148.
2. В.А.Гуменюк, Н.А.Казаков, В.А.Сульженко. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки корпуса глубоководного аппарата // Технология машиностроения. – 2007. – №12. – С.58 – 63.
3. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки объектов морской техники / Гуменюк В.А. и [др.] // В мире неразрушающего контроля – 2010 – №4 – С.20-25.
4. Г.С. Ельчанинов, В.В. Носов. Методика оценки ресурса сложно нагруженных сварных соединений // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 1-ой Международной науч.-практ. конференции под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С.212-218.
5. В.И. Иванов, В.М. Белов. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981 – 184 с.
6. Д.Н. Ковалев, Е.Ю. Нефедьев, В.Г. Ткачев. Акустико-эмиссионный контроль испытаний стальной гофрированной трубы при циклическом и статическом нагружении // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-ой Международной науч.-практ. конференции под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.382-390.
7. Е.Ю. Нефедьев. Использование метода акустической эмиссии с применением метода спектрального анализа сигналов для определения параметров течи в трубопроводах ИТЕР // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-ой Международной науч.-практ. конференции под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С.347-355.
8. Е.Ю. Нефедьев, А.Д.Смирнов, В.П. Гомера. Разработка методических приемов для повышения эффективности АЭ контроля теплообменников // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-ой Международной научно-практ. конференции под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С.408-418.
9. Патент ФГУП «ЦНИИ им. акад. Крылова» RU 2156456 «Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам».

10. В.Е.Прохорович, Л.Н.Степанова, И.С.Рамазанов. Исследование возможностей локализации дефектов сварного шва в процессе остывания с использованием акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 2015. №2 – С.24-31.
11. Акустико-эмиссионный контроль качества сварного шва в процессе остывания / Степанова Л.Н. и [др.] // Контроль. Диагностика – 2009. – №3. – С.61– 67.
12. Acoustic Emission for the Detection of Weld and Stress Corrosion Cracking / C.E. Hartbower et al. // Acoustic Emission, STP 505 – American Society for Testing and Materials, 1972, – pp. 187-221.
13. T.Hopwood, J.Havens. Acoustic Emission Monitoring of Weldments. – Kentucky Bureau of Highways, Division of Research, Report No. 515, December 1978.
14. W. D. Jolly. Acoustic Emission Exposes Cracks during the Welding Process. – Welding Journal, Vol. 48, January 1969 – pp. 21-27.
15. W.D. Jolly. The Application of Acoustic Emission to In-Process Inspection of Welds. – Materials Evaluation, Vol. 28, June 1970 – pp. 135-139, 144.
16. E. Nefedyev, V. Gomera, A. Sudakov A.. Application of Acoustic Emission Method for Control of Manual Arc Welding, Submerged Arc Welding // Proc. of the EWGAE-2014 – Dresden, Germany – September 3-5 – 2014 (In CD-ROM).
17. M.J. Peacock. Improving the Noise Discrimination for an Ammonia Tank AE // Proc. of the EWGAE-2012 – Granada, Spain, September 12-15, 2012 (In CD-ROM).

V.Gomera[1], E. Nefedyev[2], A. Smirnov[2], D. Kovalev [2]

APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR CONTROL OF QUALITY OF WELDING JOINT IN ITS PRODUCTION PROCESS

[1]Kirishi, Leningrad region, KINEF Ltd, Russia,
[2]St. Petersburg, Central Boiler and Turbine Institute (CKTI), Russia

Abstract

This paper considers the application of the method of acoustic emission (AE) for the control of welding quality in process of its manufacturing. Features AE method to detect in real time defects of weld joint during manual submerged arc welding and in cooling were studied. Set of informative AE parameters after the analysis of AE-monitoring and data of arbitration methods of nondestructive testing was offered, which form a space of criteria for separating the signals from defects and interference that accompany the welding process. Determination of the coordinates of defects with high precision makes it

possible to correct them in the operative welding process with a minimum of metal excision; reduces the volume of application of traditional testing methods.

Key words: welding joint, process of welding, crack, acoustic emission method, ultrasonic testing, capillary testing

REFERENCES

[1] Quality control of welded joints during the welding process using the method of acoustic emission / Barinov A.V. et. al. // Nauchno-tehnicheskiy vestnik ITMO, N5, 2013 – P.144-148. (rus.)

[2] Gumeniuk V.A., Kazakov N.A., Sul'zhenko V.A. Acoustic emission inspection of the welding process of deepwater apparatus hull // Technologia mashinostroenia, N12, 2007 – P.58-63. (rus.)

[3] Acoustic emission inspection of the welding process of marine engineering objects / Gumeniuk V.A et al. // V mire nerazrushaiushchego kontrolia, N4, 2010 – P.20-25. (rus.)

[4] El'chaninov G.S., Nosov V.V. Methods of assessing the resource difficult loaded welded joints // Modern Engineering. Science and education: Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference. Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov – SPb.: Publishing House of Polytechnic University, 2011. – P.212-218. (rus.)

[5] Ivanov V.I., Belov V.M. Acoustic emission inspection of welding and welded joints // Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 184 p. (rus.)

[6] Kovalev D.N., Nefedyev E.J., Tkachev V.G. Acoustic emission control testing of steel corrugated pipes of circular and static loading // Modern Engineering. Science and education: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov – SPb.: Publishing House of Polytechnic University, 2012. – P.382-390. (rus.)

[7] Nefedyev E.J. The use of acoustic emission method with spectral analysis of signals to determine the parameters of a leak in the pipe-line ITER // Modern Engineering. Science and education: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov – SPb.: Publishing House of Polytechnic University, 2012. – P.347-355. (rus.)

[8] Nefedyev E.J., Smirnov A.D., Gomera V.P. Development of Methods to Increase Efficiency AE Control of Heat Exchangers // Modern Engineering. Science and education: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference. Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov – SPb.: Publishing House of Polytechnic University, 2014. – P.408-418. (rus.)

[9] Patent FGUP «CNII named acad. Krylov» RU 2156456. A method for detecting defects in the welding process in the welds and for determining their location by acoustic signals. (rus.)

[10] Acoustic emission monitoring the quality of the weld during cooling / Stepanova L.N. et al. // Kontrol'. Diagnostika, N3, 2009 – P.61-67. (rus.)

[11] Prohorovich V.E., Stepanova L.N., Ramazanov I.S. Welding defects diagnostic by acoustic emission signals parameters statistical analysis method. // Kontrol'. Diagnostika, N2, 2015 – P.24-31. (rus.)
[12] Acoustic Emission for the Detection of Weld and Stress Corrosion Cracking / Hartbower C.E. et al. // Acoustic Emission, STP 505 – American Society for Testing and Materials, 1972, – P.187-221.
[13] Hopwood T., Havens. J. Acoustic Emission Monitoring of Weldments. // Kentucky Bureau of Highways, Division of Research, Report No. 515, December 1978.
[14] Jolly W.D. Acoustic Emission Exposes Cracks during the Welding Process. // Welding Journal, Vol. 48, January 1969 – P.21-27.
[15] Jolly W.D. The Application of Acoustic Emission to In-Process Inspection of Welds. // Materials Evaluation, Vol. 28, June 1970 – P.135-139,144.
[16] Nefedyev E., Gomera V., Sudakov A. Application of Acoustic Emission Method for Control of Manual Arc Welding, Submerged Arc Welding // Proc. of the EWGAE 2014 – Dresden, Germany – September 3-5 – 2014 (In CD-ROM).
[17] Peacock M.J. Improving the Noise Discrimination for an Ammonia Tank AE // Proc. of the EWGAE-2012 – Granada, Spain, September 12-15, – 2012 (In CD-ROM).

УДК 539.37+621.8 ; DOI 10.1872/MMF-2016-38

В. Л. Дорофеев

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФИКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Владислав Леонидович Дорофеев, д.т.н., профессор
ГНЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова"
Россия, Москва
Тел.: (495)361-19-51, E-mail: vld@ciam.ru.

Аннотация

Расчет контактных напряжений, например, в зубчатых передачах с модифицированными по ширине зубьями по формулам Герца может приводить к недопустимо большим ошибкам. Рассмотрены причины этих ошибок. Приведен алгоритм строгого решения контактной задачи. Показано, что контактные напряжения – это напряжения тела бесконечных размеров. Применение метода фиктивной нагрузки не вносит погрешность в расчет тел конечных размеров, снимая, таким образом, ограничение, согласно которому контактная площадка должна быть меньше размеров тела.

Ключевые слова: Метод фиктивной нагрузки, формулы Герца, контактные напряжения, проблемы расчета контактных напряжений.

Одной из важных задач машиноведения является расчет контактных напряжений в деталях с. Это например, зубчатые колеса авиационных трансмиссий.

Если кривизна поверхности контакта по ширине тела мала, например, в области шероховатости, то результаты расчета по двум формула, полученным Гецем для эллиптического и цилиндрического контакта должны быть почти равными, однако это не так.

Рассмотрим пример расчета зубчатой передачи: , для которой: число зубьев:z_1 = 28; z_2 = 41; коэффициент смещения исходного контура: x_1 = 0.057; x_2= - 0.057; ширина зубьев: w_1 = 32; w_2 = = 32, мм; глубина продольной модификации зубьев:C_1 = 0; C_2 = 0.25,…,50; кривизна профиля по высоте зубьев: $k_{11}=4.37\cdot10^{-2}$; $k_{21}= 2.98\cdot10^{-2}$, 1/мм; угол между плоскостями с кривизной k_{11} и k_{21}: $\omega=0$; нагрузка, по нормали к профилю: p_n = 25000, Ньютон.

По известной глубине продольной модификации профиля зубьев, продольная кривизна k_{12} и k_{22} – определяется по формуле:

$$k_{12,22} = \frac{2 \cdot C_{1,2}}{\left(\frac{(w_1, w_2)}{2}\right)^2 + C_{1,2}^2},$$

где C_1 и C_2 соответственно высоты, кругового сегмента с хордой равной ширине тел w_1 и w_2, определяющие продольную выпуклость или вогнутость продольных линий контакта.

Построим график зависимости контактных напряжений от глубины продольной модификации профиля зубьев.

Для расчета нормальных удельных давлений, распределенных по площади контактной поверхности соприкасающихся деталей машин, имеющих эллиптическую форму в месте контакта под действием заданной внешней нагрузки, будем использовать первую формулу Герца [1,с.162]:

$$\sigma_H(x, y) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_H(x,y)$- удельное контактное давление (контактное напряжение) в точке с координатами x и y, относительно центра контактной площадки, p – суммарное нормальное давление (внешняя нагрузка), распределенная по контактной площадке, a и b – соответственно большая и малая полуоси эллиптической площадки контакта.

Полуоси эллиптической площадки контакта a и b, направленные вдоль координатных осей x и y определяются по формулам [1, с.163]:

$$a = n_a(\tau) \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot p \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22})}}, \; b = n_b(\tau) \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot p \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22})}}, \quad (2)$$

где ϑ - постоянная Кирхгофа - величина, характеризующая упругие свойства материала, которая связана с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν зависимостью: $\vartheta = 4(1 - \nu^2)/E$; k_{11} и k_{12} - кривизны главных нормальных сечений поверхности первого тела; k_{21} и k_{22} -кривизны главных нормальных сечений поверхности второго тела., $n_a(\tau)$ и $n_b(\tau)$- трансцендентные функции, зависимые от угла τ.

В работе [1] Г. Герц трансцендентные функции угла τ обозначал символами μ и ν; главные кривизны контактирующих поверхностей были обозначены символами $\rho_{i,j}$; удельное контактное давление – символом Z_Z.

Аргументом функций $n_a(\tau)$ и $n_b(\tau)$ является вспомогательный угол $\tau = \tau(A,B)$, который определяется из решения уравнения

$$\cos\tau = \frac{A-B}{A+B}, \qquad (3)$$

где A и B – параметры суммарной кривизны контактных поверхностей.

Угол τ в определяется с помощью таблиц [1,с.163]. Однако, поскольку эти таблицы не содержат данных, необходимых для расчета класса деталей с малой кривизной в направлении большей оси эллипса контакта то ниже, приведены прямые формулы вычисления трансцендентных функций, полученные Динником А.Н. [2].

Результаты расчета в зависимости от глубины продольной модификации показаны на рис. 1

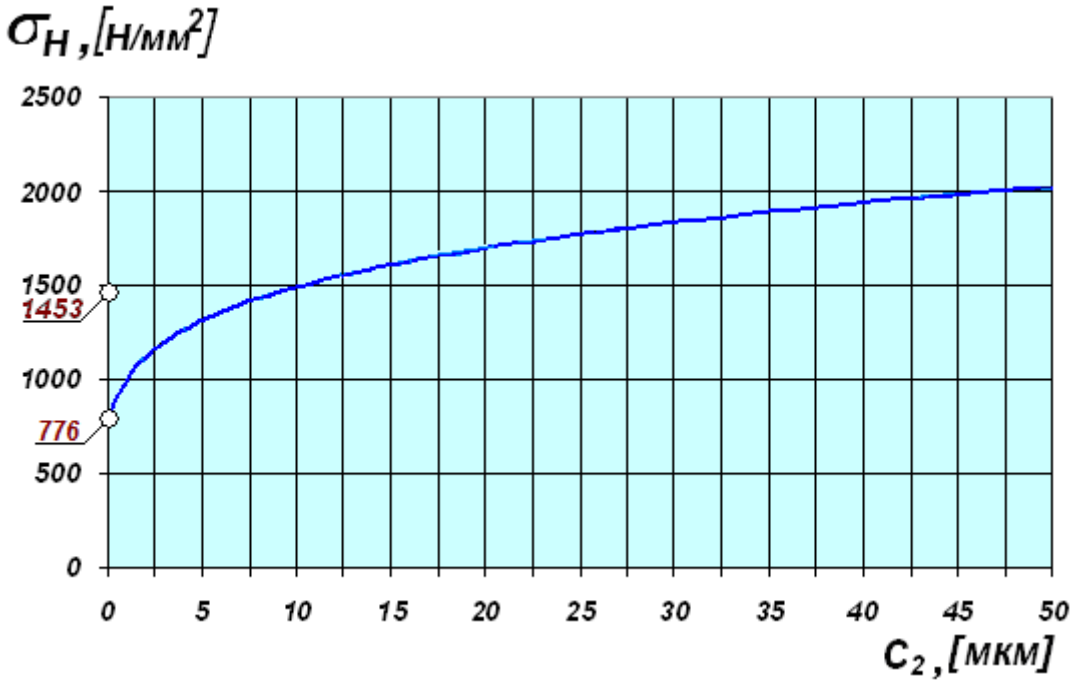


Рис. 1. Зависимость рассчитанных по первой формуле Герца контактных напряжений от глубины продольной модификации

При значении продольной кривизны $C_2=0$ имеет место не эллиптическая форма контактной поверхности, а цилиндрическая. Для этого случая рассчитаем контактное напряжение по второй формуле Герца, полученной им в работе [3, стр. 457]:

$$\sigma_H(y) = \frac{2 \cdot p'}{\pi \cdot b^2} \cdot \sqrt{b^2 - y^2}\,, \qquad (4)$$

где p' - нагрузка на единицу длины полосы контакта,

$$b = \sqrt{\frac{3 \cdot p' \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (k_{11} + k_{21})}}\,.$$

Если сравнить формулы (1) и (4), то можно заметить, формула (4) отличается от формулы (1) тем, что содержит ширину тела *w*, в определении нагрузки на единицу длины полосы контакта: $p' = p/w$, а формула (1) не содержит никакой информации о размерах контактирующих тел, что и порождает проблемы её применения.

Контактные деформации и контактные давления в сопряжении цилиндрических или эллиптических поверхностей с малой кривизной, например, в пределах высоты микронеровностей, например при $C_2=0.1$, мкм не должны существенно отличаться. При этом расчетные значения давлений, полученные по формуле (4) должны быть меньше значений, рассчитанных по формуле (1). Однако результат расчета по второй формуле Герца (2), равный $\sigma_H = 1453$, Н/мм^2, существенно отличается от результата, полученного по первой формуле Герца (1), равный $\sigma_H = 776$, Н/мм^2, полученный при $C_2=0.1$ мкм. При расчете по полученного по первой формуле Герца принимать предельное значение $C_2=0$ нельзя, так как, если $C_2 \to 0$, то $\sigma_H \to 0$.

Таким образом, необходимо найти такие формулы и алгоритмы, применение которых в инженерной практике не будет приводить к ошибкам расчета. Это особенно важно по той причине, что модифицированные по ширине зубья зубчатых колес и бочкообразные ролики подшипников начинают широко применяться в прецизионном машиностроении, позволяя компенсировать прогибы конструкции от нагрузок.

Для анализа причин погрешностей рассмотрим те условия, при которых Герц считал возможным применение формулы (1):

1. каждое тело рассматривается как бесконечное полупространство;
2. сила, сжимающая тела, направлена по линии, соединяющей центры кривизны;
3. поверхности тел абсолютно гладкие, шероховатости не учитываются, а по области контакта действует только нормальное давление;
4. трение отсутствует;

5. зона контакта мала по отношению к поверхности тела;
6. деформации в зоне контакта только упругие;
7. контактные поверхности в области контакта эллиптические.

Из перечисленных условий для тел с малой продольной кривизной не выполняется условие 5 и в определенной мере условия 1 и 7.

Из формулы Герца следует, что для двух разных по размеру тел, имеющих ширины w_1 и w_2 показанных на рис.2, находящихся в контакте, но имеющих одинаковые кривизны в точке контакта, определяемые высотой дуги C на ширине w_1 размеры контактной площадки S и контактное давление будут одинаковые.

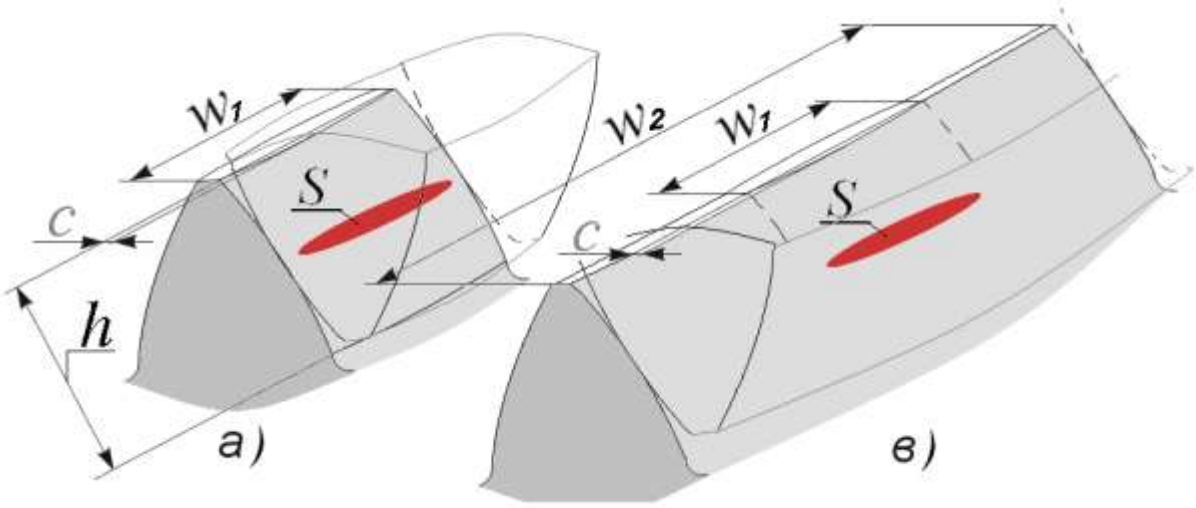


Рис. 2. Равные площадки контакта при контакте тел разных размеров

Касательно этой проблемы Герц дает следующее разъяснение[1,с.160]:

“Когда на поверхность тел ограниченных размеров действует вертикальное давление, оно ведет себя как тело бесконечных размеров, при этом необходимо, чтобы интеграл $\int_S \sigma_H(x,y)\,ds$, взятый по поверхности, ограниченной фигурой давления, определял суммарное давление p на тело.”

Рассмотрим другой случай, показанный на рис. 3, когда расчетные размеры контактной площадки больше ширины тела.

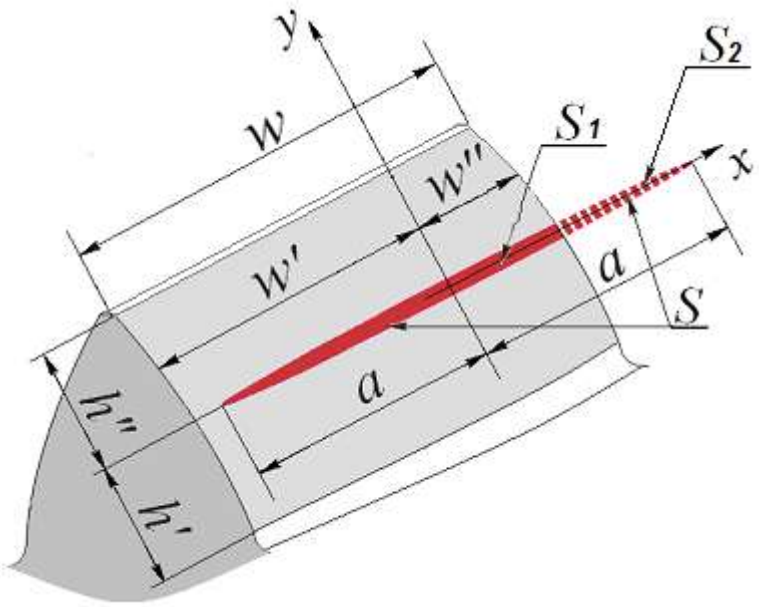


Рис. 3. Расчетные по формуле Герца размеры площадки контакта больше размеров тела

Для случая, показанного на рис. 3 площадь $S=S_1+S_2$, поэтому

$$p=\int_{S_1}\sigma_H(x,y)\,ds+\int_{S_2}\sigma_H(x,y)\,ds \qquad (5)$$

В этом случае интеграл, взятый по поверхности, ограниченной фигурой давления

$$p\neq\int_{S_1}\sigma_H(x,y)\,ds\,. \qquad (6)$$

В правую часть формулы (6) подставим формулу (1), получим

$$p\neq\int_{S_1}\frac{3\cdot p}{2\cdot\pi\cdot a\cdot b}\cdot\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}\,ds\,. \qquad (7)$$

Суммарная сила, распределенная по площадке S_1 должна быть равна заданному суммарному давлению p на тело.
Используя метод фиктивной нагрузки запишем выражение (7) в виде

$$p=\int_{S_1}\frac{3\cdot F}{2\cdot\pi\cdot a_F\cdot b_F}\cdot\sqrt{1-\frac{x^2}{{a_F}^2}-\frac{y^2}{{b_F}^2}}\,ds\,, \qquad (8)$$

Получено одно уравнение с неизвестными: S_1, F, a_F, b_F. Но , a_F, b_F. зависят от F, а S_1 определяется размерами тела и размерами расширенной площадки контакта a_F, b_F. Поэтому уравнение (8) это уравнение одним неизвестным. В выражении (8) размеры площадки контакта a_F и b_F. зависят от фиктивной нагрузки (давления) F.

В дальнейшем, параметры a_F и b_F. будем записывать, опуская подстрочный символ F.

Для такого случая расположения контактной площадки, показанной на рис. 3, фиктивная нагрузка F, на которую должен выполняться расчет, будет определяться из решения системы уравнений

$$\begin{cases} F = \int\limits_{x=-a}^{x=a} \int\limits_{y=-y(x)}^{y=y(x)} \sigma_H(x,y)\,dxdy, \\ p = \int\limits_{S1} \sigma_H(x,y)\,ds = \int\limits_{x=-\min(a,w')}^{x=\min(a,w'')} \int\limits_{y=-\min(y(x),h')}^{y=\min(y(x),h'')} \sigma_H(x,y)\,dxdy \end{cases}, \qquad (9)$$

где $a = a_F$ и $b = b_F$. – полуоси площадки контакта, w', w'', h', h''- расстояния от центра виртуальной эллиптической площадки контакта до ближайших границ сопряженных контактирующих тел, (рис.3),

$$y(x) = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}x^2}$$

Выражение (9) полностью соответствует главному условию Герца, но является обобщенным, так как содержит размеры тел, в виде пределов интегрирования.

Решается система уравнений (9), например, минимизацией функции

$$F: \quad f(F_t) = \min\left\langle \left| p - \int\limits_{S_1} \sigma_H(F_t, x, y)ds \right| \right\rangle \qquad (10)$$
$$F_t \subset [p, ..., M \cdot p)],$$

где F_t – текущее значение фиктивной нагрузки, M - коэффициент, определяющий границы области поиска, он зависит от отношения

виртуальной ширины площадки контакта к фактическому значению, его можно принять равным *10*.

Система уравнений (9) содержит функцию, $\sigma_H(F_t,x,y)$, определяющую распределение контактных давлений по всей площадке контакта, в зависимости от текущего значения виртуальной нагрузки F_t. На каждом итерационном цикле решения системы уравнений (9) фиктивная нагрузка F_t каждый раз принимает новое значение. Это продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$p = \int_{S_1} \sigma_H(F_t, x, y)ds .$$

Входящая в выражение (10) внутренняя функция $\sigma_H(F_t,x,y)$ определяется с помощью следующих формул, соответствующих формулам Герца:

$$\sigma_H(F_t, x, y) = \frac{3 \cdot F_t}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} , \qquad (11)$$

$$a = n_a(A,B) \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_t \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22})}}, \qquad (12)$$

$$b = n_b(A,B) \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_t \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{8 \cdot (k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22})}} , \qquad (13)$$

Следуя работам [2 и 4],

$$n_a(A,B) = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi}\left(1 + \frac{B}{A}\right) \cdot D(e)} , \; n_b(A,B) = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{A}{B}\right) \cdot \left[K(e) - D(e)\right] \cdot \sqrt{1 - e^2}} \qquad (14)$$

$$A = \min(\Phi, \Gamma), \; B = \max(\Phi, \Gamma), \qquad (15)$$

$$\Phi = \frac{1}{4} \cdot \left[k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22} - \sqrt{\Psi}\right], \; \Gamma = \frac{1}{4} \cdot \left[k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22} + \sqrt{\Psi}\right],$$

$$\Psi = (k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2 \cdot (k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22}) \cdot \cos\omega,$$

где ω – угол между плоскостями кривизны k_{11} и k_{12},

$$D(e)=\frac{1}{e^2}\left[K(e)-L(e)\right],\ K(e)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{d\varphi}{\sqrt{1-e^2\cdot\sin^2(\varphi)}},\quad L(e)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{1-e^2\cdot\sin^2(\varphi)}{\sqrt{1-e^2\cdot\sin^2(\varphi)}}d\varphi$$

.(16)

Функции (15 и 16) [4, стр.416], должны удовлетворять трансцендентному уравнению [4, стр.415]

$$\frac{A}{B}=(1-e^2)\cdot\frac{D(e)}{K(e)-D(e)}, \tag{17}$$

которое решается методом минимизации целевой функции:

$$e:\ \ f(e_t)=\min\left\langle\left|\frac{A}{B}-(1-e_t^2)\cdot\frac{D(e_t)}{K(e_t)-D(e_t)}\right|\right\rangle_{e_t\in[0,...,1]}. \tag{18}$$

Здесь e_t переменная, принимающая значение равное e только в точке минимума целевой функции. В результате минимизации целевой функции (18) определяются значения эллиптических интегралов *K(e), L(e), D(e)*. После подстановки вычисленных значений в формулы (11-14) определяются контактное давление σ_H. с учетом фактических размеров тел, что и является решением проблемы расчета контактных напряжений по формулам Герца.

Для подтверждения работоспособности откорректированных формул Герца на рис. 4 показаны результаты расчета зависимости контактных напряжений от глубины продольной модификации, полученные решением системы уравнений (9) по формулам (10-18).

Сплошной линией на рис. 4 показан график зависимости контактных давлений от величины продольной модификации зубьев колес, полученный решением системы уравнений (9) по формулам (10-18); пунктирной линией на рис.4 показан график увеличения погрешности расчета контактных давлений от величины продольной модификации зубьев колес, построенный по формуле Герца (1). Значение 1453 МПа, показанное на оси ординат – результат расчета по второй формуле Герца, которая не учитывает эллиптичность контакта. Значение давления 1780 соответствует глубине модификации 26 мкм. При таком значении полная ширина площадки контакта равна ширине контактирующих тел.

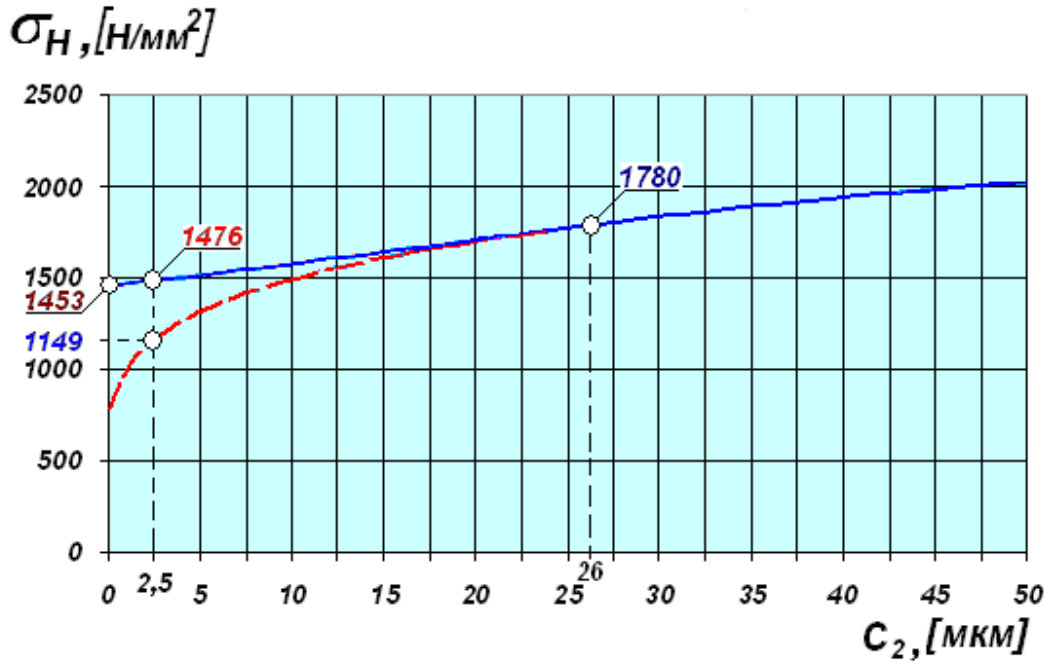


Рис. 4. Зависимость контактных напряжений от глубины продольной модификации, полученные решением системы уравнений (9) по формулам (10-18)

Сходимость решений по второй формуле Герца с результатами расчета по предложенным уравнениям (9) и формулам (10-18) и равенство результатов с первой формулой Герца при $C_2 > 26$ мкм служат доказательством, подтверждающим правильность и работоспособность предложенного решения проблемы расчета контактных напряжений по формулам Герца.

Если рассчитываются детали со сложным расположением площадки контакта, как, например, показано на рис. 5, то пределы интегрирования в системе уравнений (9) должны быть определены в соответствие с геометрией рассчитываемой детали.

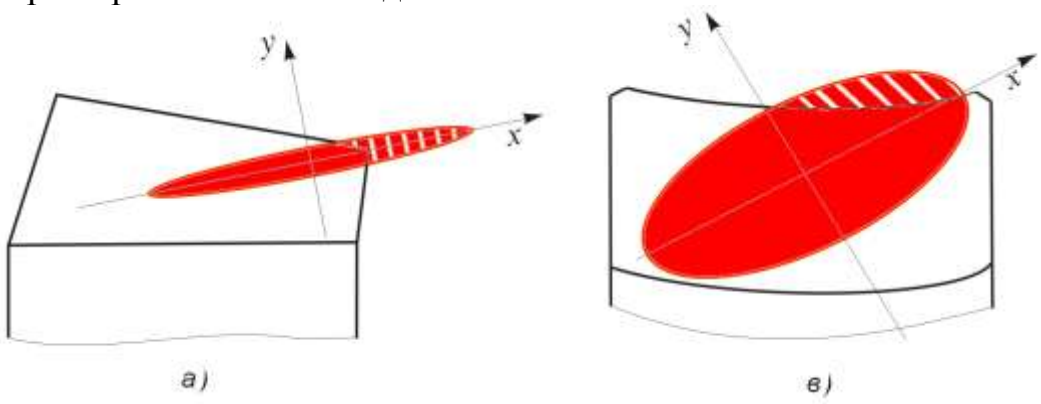


Рис. 5. Виды расположения контактной площадки, выходящей за пределы контактирующих тел; *а*) на зубьях конической передачи, *в*) на зубьях арочной или гиперболоидной передачи

Несмотря на сходимость предложенного решения с решениями, полностью удовлетворяющими условиям Герца, возникает вопрос о допустимости применения метода фиктивной нагрузки, при которой расчетная контактная площадка выходит за пределы тела.

Ответ на такой вопрос следующий: контактные напряжения это некоторая часть общих напряжений, действующих в телах. В работах [5 и 6], получены формулы для расчета общих напряжений, в которых есть составляющая контактных напряжений. Особенность формул в том, что контактная составляющая не содержит области интегрирования, поэтому результат решения продолжается за пределы расчетной области. Вблизи контактной площадки расчетные контактные напряжения составляют основную часть общих напряжений, что позволяет их рассчитывать и учитывать игнорируя другие составляющие напряжений. По этой же причине допустимо применять метод фиктивной нагрузки при решении проблемы расчета контактных напряжений по формулам Герца. Основоположником метода продолжения является Н.И.Мусхелишвили [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Über die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte Mathematik. Volume 1882, Issue 92 (Jan 1882), s.156-171.
2. Динник А.Н. Удар и сжатие упругих тел: Известия Киевского Политехнического института Императора Александра II – Киев, 1909. – 120 с.(Избранные труды.- Киев: АН УССР, 1952, т.1.- 151с.
3. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Harte Körper // Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleißes, Berlin : Verein zur Beförderung des Gewerbefleisses, 1882, S. 449-463.
4. Расчеты на прочность в машиностроении. Том 2: Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть // С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев, и др. М.: Машгиз, 1958.— 974 с.
5. Дорофеев В.Л. Основы технологии компьютерного моделирования полей напряжений методом комплексных аналитических функций// Новые технологии управления движением технических объектов. Материалы 3-й международной научно-технической конференции. Том 2, Новочеркасск 2000, с.104-109.
6. Dorofeyev V.L., Problems of internal gear pair design and methods of their solution / International Conference on Gears. VDI - Berrichte 2108.2 pp. 1443-1446 (October 4th to 6th, 2010, Technical University of Munich (TUM) Garching (near Munich), Germany).
7. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. Наука, 709 с.

V.L.Dorofeyev

APPLICATION OF A METHOD OF FICTITIOUS LOADING FOR THE SOLUTION OF A PROBLEM OF CALCULATION OF CONTACT PRESSURE

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia.

Abstract

Calculation of contact pressure, for example, in tooth gearings with the teeths modified on width under Hertz formulas can lead is inadmissible to the big errors. The reasons of these errors are considered. The algorithm of the decision of a contact problem is offered. It is shown that contact pressure are pressure of a body of the infinite sizes. Application of a method of fictitious loading does not bring an error in calculation of bodies of the final sizes, excluding, thus, restriction according to which the contact platform should be less sizes of a body.

REFERENCES

[1] Über die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte Mathematik. Volume 1882, Issue 92 (Jan 1882), s.156-171.

[2] Dinnik A.N. Blow and compression of elastic bodies: News of the Kiev Polytechnical institute of Emperor Alexander II – Kiev, 1909. – 120 with. (The Selected works. - Kiev: AN USSR, 1952, Volume.1. – 151p. (rus.)

[3] Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Harte Körper // Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleißes, Berlin: Verein zur Beförderung des Gewerbefleisses, 1882, S. 449-463.

[4] Calculation of the Strength in Mechanical Engineering. / S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, K.K. Likharev, V.M. Makushin, N.N. Malinin, Knoroz. V.I. Feodosjev. Moskva, 1958, Volume 2, 974p. (rus).

[5] Dorofeyev V. L. Bases of technology of computer simulation of fields of pressure a method of complex analytical functions//New technologies of traffic control of technical objects. Materials of 3rd international scientific and technical conference. Volume 2, Novocherkassk 2000, pp.104-109.

[6] Dorofeev V.L. Problems of internal gear pair design and methods of their solution /International Conference on Gears. VDI - Berichte 2108.2 pp. 1443-1446 (October 4th to 6th, 2010, Technical University of Munich (TUM) Garching (near Munich),Germany).

[7] Muskhelishvili N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. M. Nauka, 709 p. (rus.)

УДК 621.833.1 : 621.753.1 ; DOI 10.1872/MMF-2016-39

В. Л. Дорофеев[1], В.В.Голованов[2], С.Г.Гукасян[3], Д.В.Дорофеев[4]

ОТОБРАЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ МНОГОЗНАЧНЫМИ И МНОГОЛИСТНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

[1]Владислав Леонидович Дорофеев, д.т.н., профессор
ГНЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова"Россия, Москва
Тел.: (495)361-19-51, E-mail: vld@ciam.ru

[2]Виктор Васильевич Голованов
ГНЦ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Россия, Москва
Тел.: 495-362-90-77, E-mail: golovanov_vv@rambler.ru

[3]Сурен Гургенович Гукасян
ГНЦ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Россия, Москва
Тел.: 495-362-90-77, E-mail: gsg@ciam.ru

[4]Дмитрий Владиславович Дорофеев, к.т.н., доцент
"Национальный исследовательский университет "МЭИ", Россия, Москва
E-mail: dl@list.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы отображения погрешностей и контактных напряжений в зубчатых передачах многолистными функциями. Показано, что существующие методы не отражают важную для анализа качества зубчатых передач информацию. Вводится понятие многозначных и многолистных функций, позволяющих каждой фазе зацепления и сечению поставить в соответствие, как значения погрешностей зацепления, так и расчетные значения динамических контактных напряжений.

Ключевые слова: Зубчатые передачи, погрешность, контактные напряжения, функциональное представление, многозначные функции, многолистные функции.

Целью расчета зубчатых передач является обеспечение заданной несущей способности в течении заданного времени. Основным критерием выполнения этого условия является превышение допускаемых напряжений над действующими. Действующие напряжения зависят от точности зубчатых колес и геометрических параметров зацепления. Поэтому расчеты выполняются по стандартам геометрического расчета, и по стандартам расчета действующих и допускаемых напряжений. Большое влияние на прочность зубчатых колес и на плавность хода зубчатой передачи оказывают погрешности профиля, шага и радиального биения колес. В соответствии со стандартами [1-4] эти параметры регламентируются своими предельными значениями. Но кроме этого в перечисленных стандартах предлагается и графическое их изображение. Однако стандартные методы отображения погрешностей не достаточно информативны для повышения качества зубчатых передач. Например, невозможно проследить за процессом входа зубьев в зацепление.

Зубчатая передача это система, в которой фазовые соотношения между погрешностями и изменением жесткости зубьев имеют огромное значение. Чтобы изменить динамическое состояние зубчатой передачи необходимо строго задавать необходимые фазовые сдвиги между погрешностью и жесткостью зацепления. Если найдены лучшие характеристики погрешности, то такая погрешность становится обязательной и называется модификация профиля или модификация направления зубьев. Но для этого необходимо регистрировать процесс зацепления каждой пары зубьев, но существующие методы графического отображения погрешностей это не позволяют выполнить.

Точность зубчатой передачи оценивается по многим показателям, но два из них: кинематическая погрешность и погрешность профиля зубьев наиболее полно, но для практического использования недостаточно, определяют качество зубчатой передачи.

Проблема в том, что практически все производители измерительной техники ограничиваются печатью протоколов измерения. Однако на этих протоколах нет ни номеров зубьев, находящихся в текущей фазе зацепления, ни координат точек контакта. Но и стандарты [5-7] не требуют этого. Как следствие результаты измерений нельзя использовать для расчета контактных и изгибных напряжений в зубчатых передачах.

Для решения проблемы в работе [8] было предложено все динамически изменяемые параметры регистрировать не только функционально, но для каждой пары зубьев отдельно. Это означает, что регистрировать необходимо не только величину погрешности, но и координаты точки в которой находится эта погрешность.

Математическое определение функция такое: это отображение каждого элемента из множества независимых переменных $\boldsymbol{X}$ в множество

значений $\boldsymbol{F}$ с помощью некоторого алгоритма или некоторой формулы, называемых функцией $\boldsymbol{Y}$. Кратко это записывается в виде отображения:

$$\boldsymbol{Y: X \rightarrow F}. \qquad (1)$$

Множество независимых переменных $\boldsymbol{X}$ в зубчатой передаче это фаза зацепления, т.е. угол поворота **ведущего** колеса из некоторого начального положения. Множество значений $\boldsymbol{F}$ – это угол поворота **ведомого** колеса. Но в зубчатой передаче зависимость угла поворота ведомого колеса относительно ведущего зависит и от функции погрешности зубьев ведущего колеса и от функции погрешности ведомого колеса. Поэтому определение отображения (1) уточним следующим приемом. Для каждой фазы зацепления, т.е. элемента $x \in X$ сначала определим погрешность и профиля и шага зубьев двух колес, находящихся в зацеплении, при этом важно, чтобы функции погрешности профиля были определены не в одной точке, а по всему профилю. Кратко это запишется в виде:

$$A : x \in X \Rightarrow \aleph \left\{ \begin{array}{c} f_{1i}(\nu_{1i}) \\ i \in 1,...,Z_1 \\ f_{2j}(\nu_{2j}) \\ j \in 1,...,Z_2 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{c} p_k(\nu_1) \\ k \in 1,...,(Z_1 \cdot Z_2) \end{array} \right\} \rightarrow \sup \left\{ \begin{array}{c} \bigcup p_k(x) \\ k \in 1,...,(Z_1 \cdot Z_2) \end{array} \right\} \rightarrow F \,. \qquad (2)$$

Полученная в результате отображения (2) функция $F(x) \in \boldsymbol{F}$ это функция кинематической погрешности зубчатой передачи. Формируется функция $F(x)$ из множества функций $p_k(x)$. В работе [8] совокупность функций $p_k(x)$ названа термином «многозначная функция кинематической погрешности», а совокупность функции $f_{1i,2j}(x)$, ранее, работе [9] была названа термином «прерывная кинематическая погрешность».

На рис. 1 показаны графики функций, входящих в отображение (2).

Функция кинематической погрешности F(x) показана на рис. 2.

На рис. 1*d* показано сечение, для которого определены функции $f_{1i,2j}(x)$, $p_k(x)$, $\cup p_k(x)$. В других сечениях перечисленные функции будут иметь другое изображение.

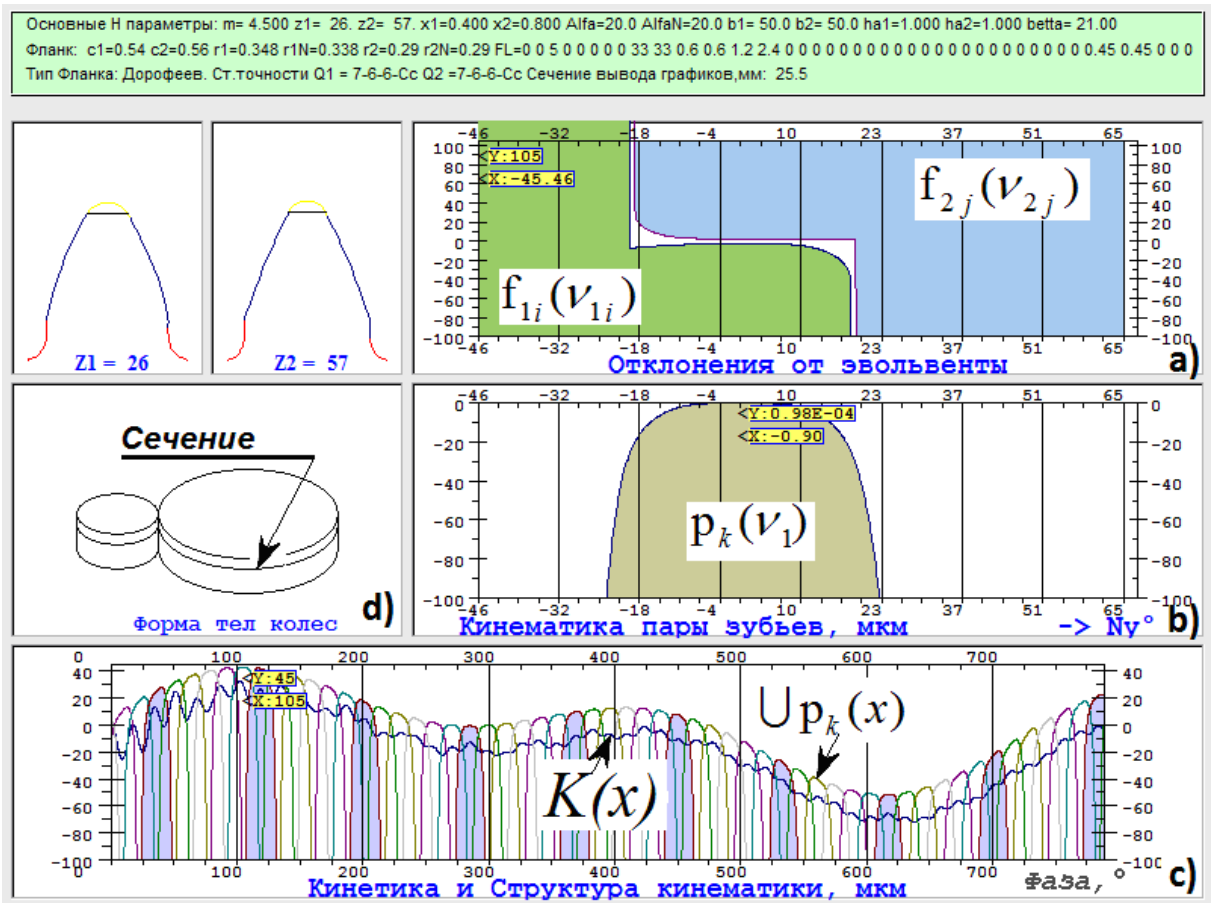


Рис. 1. Графики функций погрешности, входящих в отображение (2)

Отображение (2) описывает общую структуру алгоритма расчета. Конкретные формулы приведены авторами в работах [8,10,11].

Функциональный подход позволил решить ряд не только метрологических задач, но и задач расчета динамических напряжений и вибраций [10-12]. Причина в том, что отображение (2) привязано к конкретным точкам контакта зубьев, а значит, в этих точках можно определить и контактные напряжения, и толщину слоя смазки и многие другие характеристики зубчатой передачи, которые также будут рассчитываться и отображаться многозначными функциями (рис. 2).

Впоследствии, термин «функция кинематической погрешности» стал применяться и другими исследователями зубчатых передач [13,14], хотя и очень ограничено.

Прежде чем переходить к описанию отображений погрешностей, контактных и изгибных напряжений в зубчатых передачах многолистными функциями, рассмотрим некоторые терминологические проблемы.

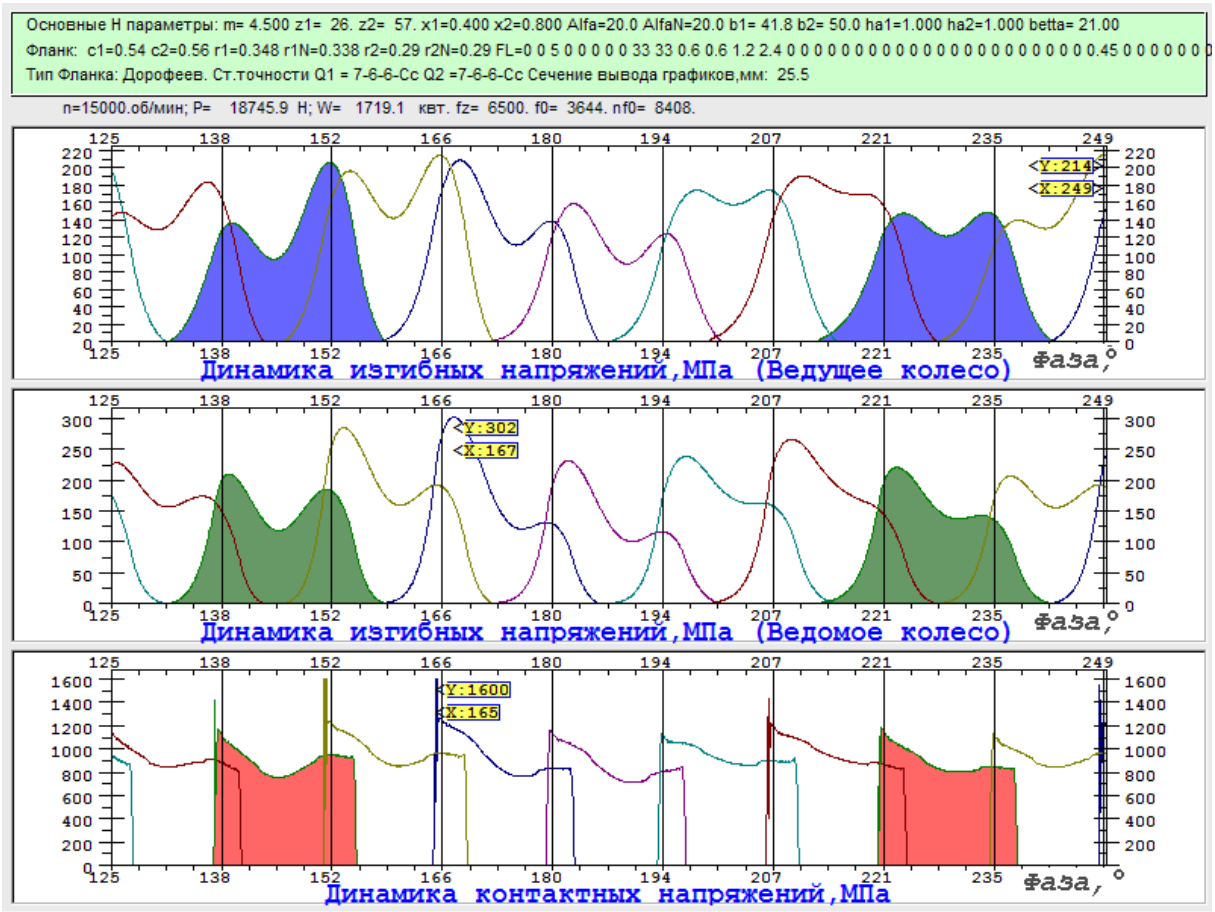


Рис. 2. Графики многозначных функций изменения изгибных напряжений (для каждого зуба), и контактных напряжений (для каждой пары зубьев), действующих в среднем сечении колес

На рис. 3*a* показаны два графика. Верхний график построен с помощью отображения (2) в российской терминологии – это кинематическая погрешность. По стандарту ISO 1328-1 это *Total tangential composite deviation* (полное тангенциальное суммарное отклонение). По стандарту DIN 3960 это *Einflanken-Walzabweihung* (Однопрофильное отклонение обката). Но на рис. 3*a* показан и второй график, расположенный ниже – эта погрешность образуется на только погрешностями геометрии, но и упругими деформациями зубьев и тел колес.

Как видно из рис. 3*a*, характер погрешностей существенно отличается. Чтобы отличить одну функциональную погрешность от использован термин «кинетическая погрешность». На рис. 1*c* эта функция обозначена символом $K(x)$. На рис. 3*a* кинетическая погрешность это второй нижний график. Расстояние между двумя графиками определяет величину прогибы зубьев в зацеплении.

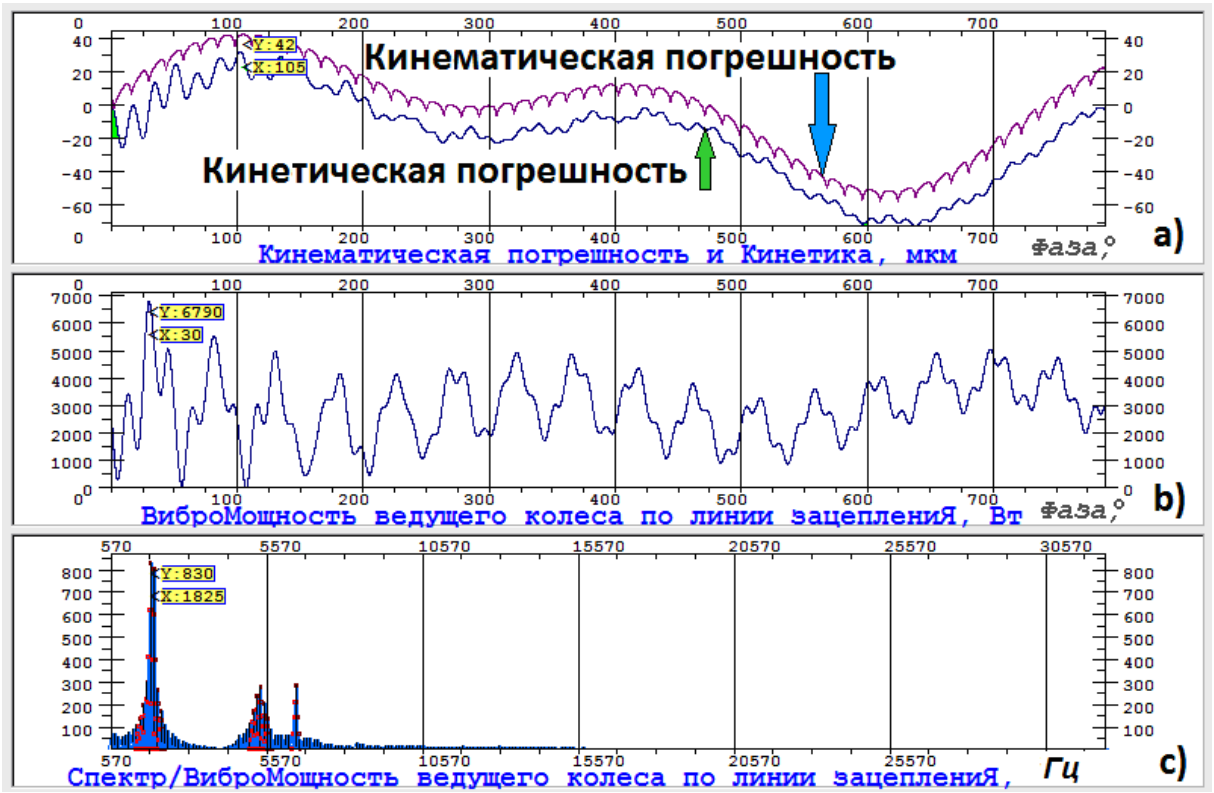


Рис. 3. Процессы, протекающие в зубчатой передаче

В зарубежной практике [13,14] часто используется термин *transmission error* (трансмиссионная погрешность) но при использовании такого термина, непонятно – это погрешность кинематики или погрешность от деформаций.

Если в эксперименте или расчетом получена кинетическая погрешность как функция угла поворота ведущего колеса, то легко получить много других полезных показателей качества зубчатой передачи. Так на рис. 3*b* показан график функции мгновенной мощности, затрачиваемой на деформацию элементов зубчатой передачи, а на рис. 3*c* показан спектр этой мощности.

Процесс нагружения зубьев зубчатой передачи часто сопровождается концентрацией напряжений, которые могут быть причиной преждевременного разрушения колес. Некоторые из таких концентраторов контактных напряжений были предсказан д.т.н, проф. В.Н.Кудрявцевым [154, с. 179-181, 193-194] задолго до того как появилась возможность их рассчитывать и измерять.

В настоящее время с помощью компьютерной программы AEROFLANK концентраторы контактных напряжений В.Н.Кудрявцева могут быть строго рассчитаны; пример такого расчета показан на рис. 4.

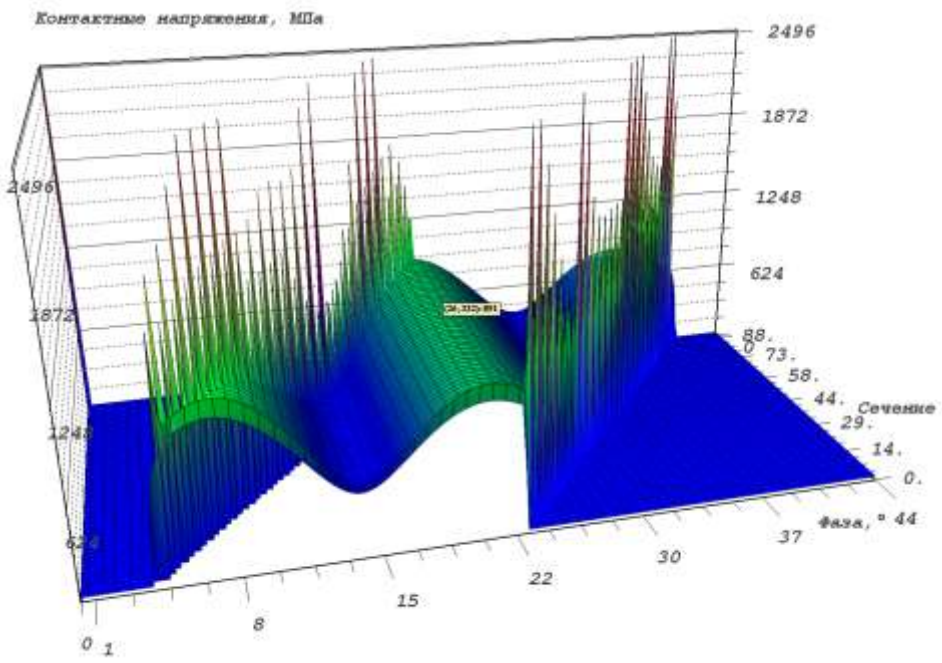


Рис. 4. Концентраторы контактных напряжений Кудрявцева В.Н. на зубьях косозубой передачи

Если ширина зубьев ведущего и ведомого колес различна, то наблюдается концентрация напряжений у торцов зубьев. В эксперименте этот вид концентраторов хорошо виден на рис. 5.

Рис. 5. Следы концентрации контактных напряжений

Аналогичный результат получается расчетом (рис. 6).

Для получения результатов расчета, показанных на рис. 4 и рис.6 необходимо увеличить размерность отображения (2). Введем дополнительную переменную – сечение, как расстояние вдоль ширины зубьев колес. Тогда отображение (2) примет вид:

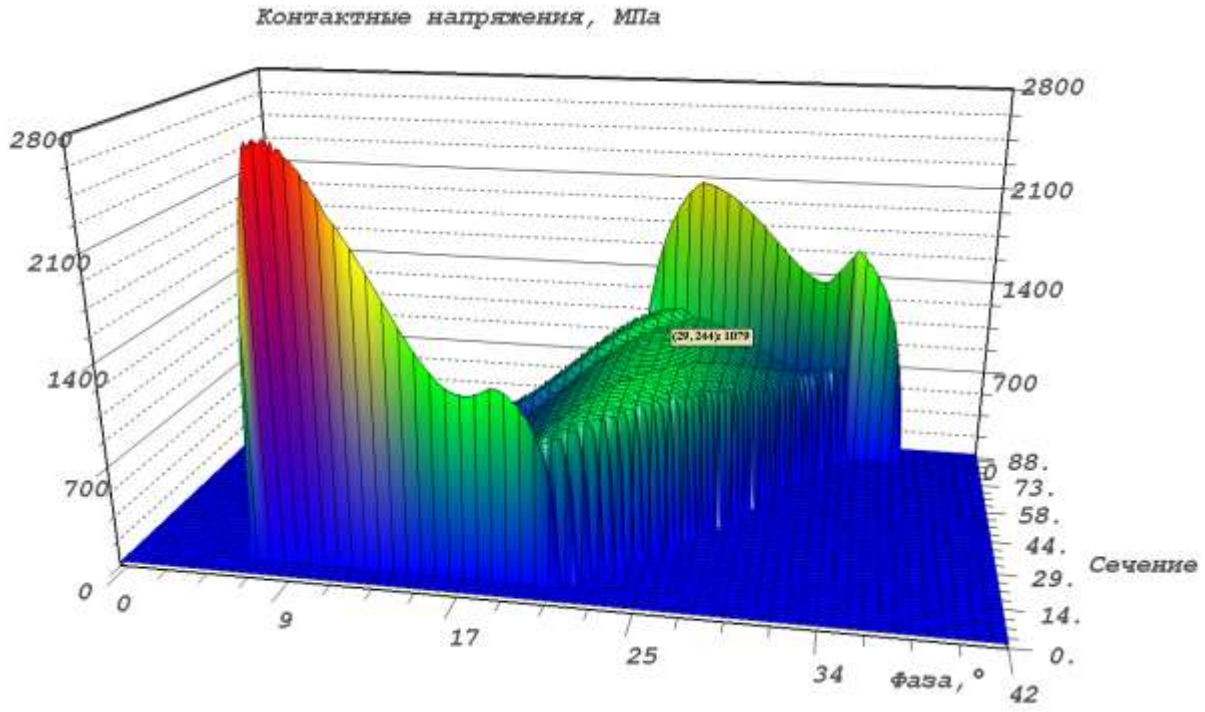


Рис. 6. Концентрации контактных напряжений на зубьях косозубой передачи

$$\mathrm{A}:\mathrm{x},\mathrm{c}\in\mathrm{X}\Rightarrow\aleph\left\{\begin{array}{c}\mathrm{f}_{1i}(c,\nu_{1i})\\ i\in 1,\ldots,Z_1\\ \mathrm{f}_{2j}(c,\nu_{2j})\\ j\in 1,\ldots,Z_2\end{array}\right\}\rightarrow\left\{\begin{array}{c}\mathrm{p}_k(c,\nu_1)\\ k\in 1,\ldots,(Z_1\cdot Z_2)\end{array}\right\}\rightarrow\sup\left\{\begin{array}{c}\bigcup\mathrm{p}_k(c,x)\\ k\in 1,\ldots,(Z_1\cdot Z_2)\end{array}\right\}\rightarrow F\,. \quad (3)$$

Введение дополнительной размерности приводит к тому, что графические изображения составляющих функций будут выражаться листовыми поверхностями, их будем называть «многолистная функция»

На рис. 7 показан возможный вид многолистной функции погрешности $p_k(c,x)$. Если спроецировать многолистную функцию кинематической погрешности на координатную плоскость и взять верхнюю грань проекции, получим функцию кинематической погрешности $F(x)$ (рис. 7).

Результаты расчета, показанные на рис. 4 и 6, получены как многолистные. Вследствие наложения графиков результаты выводятся отдельно для каждой пары зубьев. На рис. 8 показаны графические изображения результатов расчета мгновенной температуры во всех точках контакта 3-й и 4-ой пар зубьев, находящихся в зацеплении.

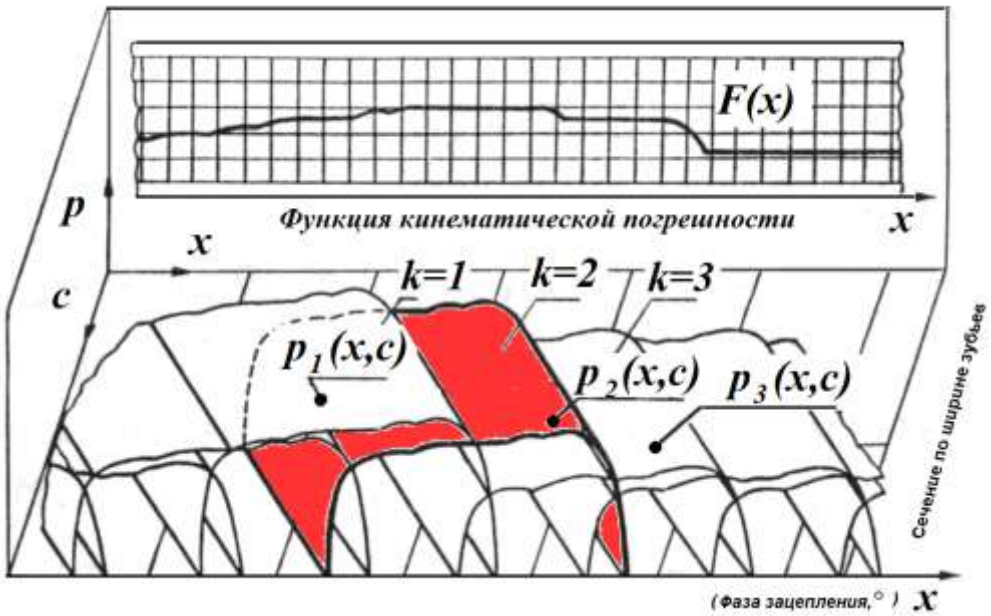


Рис. 7. Многолистная функция кинематической погрешности

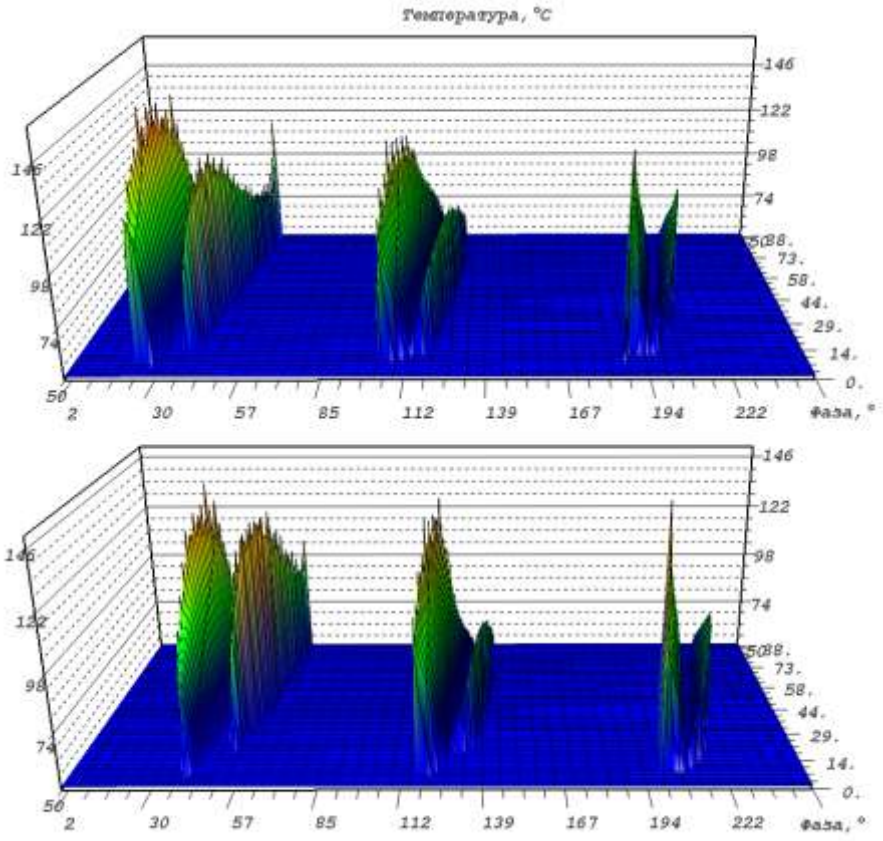


Рис. 8. Многолистная функция мгновенной температуры в зацеплении 3-ей (верхний рисунок) и 4-ой пары зубьев (нижний рисунок)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 6336, Calculation of load capacity of spur and helical gears, International Standardization Organization, 2006
2. DIN 3990: Tragfahigkeitsberechnung von Stirnradern, Teil 1 bis 5, Beuth Verlag, Dezember 1987.
3. GOST 21354-87, Cylindrical involute gears of external gearing. Strength calculation, Russia Standardization Organization, 1987
4. BDS 17108-89, Cylindrical involute gears of external gearing. Strength calculation, Sofia. Sofia. Committee on quality, 1990.
5. ГОСТ 1643-81ПЕРЕДАЧИ ЗУБЧАТЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ. Допуски. М.: Издательство стандартов, 1981
6. DIN 3961 Toleranzen für Stirnradverzahnungen , Beuth Verlag Gmbh, Berlin und Köln Aug 1978.
7. ISO 1328-1:1995(E) Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth. Genöve, 1995.
8. Дорофеев В.Л. Основы расчета нагрузок и напряжений, действующих в зацеплении цилиндрических зубчатых передач //Вестник машиностроения, 1983, № 3, с. 14-16.
9. Нежурин И.П. Кинематическая точность зубчатых колес и ее контроль //Стандарты и качество, - 1963, - N 6, - с. 8-14.
10. Дорофеев В.Л. Учет геометрических отклонений профиля зубьев в расчетах цилиндрических передач // Вестник машиностроения. 1986.- № 12.-С. 11-12.
11. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Гукасян С. Г. Модификация авиационных зубчатых передач с целью уменьшения износа контактной поверхности // 4-я Международная научно-практическая конференция "Современное машиностроение. Наука и образование".19-20 июня 2014 г. Санкт-Петербург, 2014, с.173-183.
12. Дорофеев В. Л. Уточненное определение динамических нагрузок в зубчатых передачах // Вестник машиностроения. 1985 №8. С. 45 – 47.
13. F.L. Litvin, Gear Geometry and Applied Theo, Prentice Hall, Englewood Gliffs, NJ (1994); Development of Gear Technology and Theory of Gearing, NASA (1997). 114 p.
14. F.L. Litvin, A.Fuentes. Gear Geometry and Applied Theory. Second edition. Cambride University Press. 2004. 800p.
15. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи, М.-Л.: МАШГИЗ. – 1957. - 264 с.

V.L.Dorofeyev

DISPLAY OF ERRORS AND CONTACT PRESSURE IN GEARING WITH THE HELP OF MULTIPLE VALUED FUNCTIONS - AND MULTIVALENT FUNCTIONS

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia.

Abstract

The paper deals with errors and display the contact stresses in gears multivalent functions. It is shown that the existing methods do not reflect important to analyze the quality of information transmission gear. The concept of multi-valued and multivalent functions, allowing each to each phase of engagement and section put in line, the values of engagement errors, and the calculated values of the dynamic contact stresses.

Keywords: Gears, an error, contact stresses, functional performance, multi-valued function, multivalent functions

REFERENCES

[1] ISO 6336, Calculation of load capacity of spur and helical gears, International Standardization Organization, 2006
[2] DIN 3990: Tragfahigkeitsberechnung von Stirnradern, Teil 1 bis 5, Beuth Verlag, Dezember 1987.
[3] GOST 21354-87, Cylindrical involute gears of external gearing. Strength calculation, Russia Standardization Organization, 1987
[4] BDS 17108-89, Cylindrical involute gears of external gearing. Strength calculation, Sofia. Sofia. Committee on quality, 1990.
[5] GOST 1643-81. Peredachi zubchatye cilindricheskie. Dopuski. M.: Iizdatel'stvo standartov, 1981 (rus).
[6] DIN 3961. Toleranzen für Stirnradverzahnungen , Beuth Verlag Gmbh, Berlin und Köln Aug 1978.
[7] ISO 1328-1:1995(E). Cylindrical gears — ISO system of accuracy — Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth. Genöve, 1995.
[8] V.L. Dorofeev. The Fundumentals of Loads and Stress Computation For Cylindrical Gearing Engagements, Vestnik Mashinostroeniya, 1983, №3, pp. 14-16.
[9] I.P. Negurin. Kinematic accuracy of cogwheels and its control, Standards and quality, - 1963, - N 6, pp 8-14.
[10] V.L. Dorofeev. The account of geometrical deviations of a profile of teeths in calculations of cylindrical transfers. / Vestnik Mashinostroeniya, 1986, №12, pp. 11-12.
[11] V.L. DorofeevV.L., Golovanov V.V., Gukasian S.G. Profile modification of aviation gears for the pur-pose of contact surface area destruction reduction //4th International scientific conference “Modern Mechanical Engineering: Science and Education"19-20 June 2014, pp. 173-183.
[12] V.L. Dorofeev. The specified definition of dynamic loadings in tooth gearings/ Vestnik Mashinostroeniya, 1985, №8, pp. 45-47.
[13] F.Litvin Gear Geometry and Applied Theo, Prentice Hall, Englewood Gliffs, NJ (1994);... Development of Gear Technology and Theory of Gearing, NASA (1997). 114 p.
[14] F.L. Litvin, A.Fuentes. Gear Geometry and Applied Theory. Second edition. Cambride University Press. 2004. 800p.
[15] V.N. Kudriavcev, Tooth gearings, M.-L.: MASHGIZ. 1957. 264p.

УДК 621.438; DOI 10.1872/MMF-2016-40

В.В. Елисеев[1], А.А. Москалец[2]

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ КЕМПБЕЛЛА ДЛЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

[1]Владимир Васильевич Елисеев, д. физ.-мат. н., профессор.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: yeliseyev@inbox.ru
Россия, Санкт-Петербург

[2]Артем Анатольевич Москалец, аспирант.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: artem.moskalec@gmail.com
Россия, Санкт-Петербург

Аннотация

Разработана методика построения диаграмм Кемпбелла для турбинных лопаток средствами математического моделирования. Выведены уравнения колебаний лопаток как естественно-закрученных стержней в поле центробежных сил. Численное решение задач на собственные значения для систем обыкновенных дифференциальных уравнений дает искомую зависимость частот колебаний от угловой скорости ротора. Расчеты выполнены методом стрельбы в пакете Mathcad. Представлены результаты расчета конкретной турбинной лопатки.

Ключевые слова: турбинная лопатка, диаграмма Кемпбелла, естественно-закрученные стержни, система ОДУ, метод стрельбы, собственные частоты и формы, Mathcad.

Постановка вопроса

При вращении ротора турбины установленные на нем лопатки подвергаются силовому воздействию струи пара или газа, меняющемуся во времени по периодическому закону с частотой вращения Ω. При этом лопатка на роторе как колебательная система имеет набор собственных частот ω_k (теоретически их бесконечно много). Поскольку резонансы недопустимы, должно быть обеспечено условие $\Omega \neq \omega_k$. Но это условие нуждается в двойной коррекции.

Во-первых, от разложения нагрузки в ряд Фурье появляются высшие гармоники с частотами $2\Omega, 3\Omega, \ldots$ Во-вторых, собственные частоты зависят

от угловой скорости, поскольку центробежные силы увеличивают жесткость на прогиб. Поэтому возникает условие

$$n\Omega \neq \omega_k(\Omega) \qquad (1)$$

для всех натуральных значений n, k. Графической иллюстрацией этого соотношения является диаграмма Кемпбелла [1-3]. Имеем два семейства графиков функций от Ω: левой части (1) соответствуют прямые лучи из начала координат, а правой – кривые линии от значений $\omega_k(0)$. Последние определяются обычным модальным анализом для лопатки на неподвижном роторе [4-8].

Практическая важность соблюдения условия (1) настолько велика, что создаются громоздкие и дорогие кемпбелл-машины [2] для определения правой части (1) из эксперимента. **Цель данной работы** – определение этих зависимостей путем математического моделирования.

Для лопатки на роторе можно использовать одномерные, двумерные или трехмерные модели – в зависимости от соотношения трех размеров лопатки. В данной работе рассматривается одномерная модель прямолинейного естественно-закрученного стержня переменного сечения [9]. Представлений в духе сопротивления материалов недостаточно, необходимо использовать нелинейную теорию стержней [10]. Современные подходы к расчету колебаний лопаток как естественно-закрученных стержней представлены в статьях [11,12]. Они опираются на компьютерную математику [13].

Уравнения теории стержней

Эти уравнения были получены Кирхгофом, и затем обобщены Коссера. В современном изложении уравнения теории без растяжения и сдвига имеют вид [10]:

$$\begin{gathered}\mathbf{Q}' + \mathbf{q} = \rho\ddot{\mathbf{r}},\ \mathbf{M}' = \mathbf{Q} \times \boldsymbol{\tau}, \\ \boldsymbol{\kappa} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M},\ \boldsymbol{\tau} = \mathbf{P} \cdot \boldsymbol{\tau}_0\end{gathered} \qquad (2)$$

Здесь $\mathbf{Q}, \mathbf{M}$ – векторы силы и момента в сечении, штрих и точка означают дифференцирование по дуговой координате s и времени t; $\boldsymbol{\tau}_0, \boldsymbol{\tau}$ – орты касательной к оси стержня до и после деформации, $\boldsymbol{\kappa}$ – вектор деформации изгиба-кручения; $\mathbf{A}$ – тензор податливости, $\mathbf{P}$ – тензор поворота, ρ – масса на единицу длины, $\mathbf{q}$ – распределенная нагрузка.

Нелинейные уравнения (2) необходимы при больших деформациях. Также они являются основой в случае наложения малой деформации на конечную, когда величины получают малые приращения (обозначаемые волной): $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{u}, \mathbf{P} = \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{P}, \mathbf{q}, \ldots$ Здесь появились векторы перемещения $\mathbf{u}$ и малого поворота $\boldsymbol{\theta}$. Варьирование (2) приводит к следующей системе:

$$\begin{gathered}\tilde{\mathbf{Q}}' + \tilde{\mathbf{q}} = \rho\ddot{\mathbf{u}},\ \tilde{\mathbf{M}}' = \tilde{\mathbf{Q}} \times \boldsymbol{\tau} + \mathbf{Q} \times (\boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{\tau}), \\ \boldsymbol{\theta}' = \mathbf{A} \cdot (\tilde{\mathbf{M}} - \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{M}),\ \mathbf{u}' = \boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{\tau}\end{gathered} \qquad (3)$$

Это линейная система, но ее коэффициенты определяются состоянием перед варьированием.

Лопатка в поле центробежных сил

Будем считать лопатку прямолинейным естественно-закрученным стержнем [9], растянутым центробежными силами. Тогда в случае гармонических колебаний с частотой ω получим из (3) следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в компонентах

$$\begin{aligned} &Q_x' + q_x = -\omega^2 \rho u_x,\ Q_y' + q_y = -\omega^2 \rho u_y, \\ &M_x' = -Q_y + Q\theta_x,\ M_y' = Q_x + Q\theta_y, \\ &\theta_x' = A_{xx} M_x + A_{xy} M_y,\ \theta_y' = A_{xy} M_x + A_{yy} M_y, \\ &u_x' = -\theta_y,\ u_y' = \theta_x \end{aligned} \qquad (4)$$

Здесь опущена волна (знак варьирования). Используются декартовы координаты x, y, z: ось z – вдоль стержня, оси x, y – в сечении. Изгибные податливости A_{xx}, A_{yy}, A_{xy} вычисляются как в курсах сопротивления материалов. Растягивающая сила Q определяется очевидной формулой

$$Q(z) = \Omega^2 \int_z^L \rho\left(R_1 + \xi\right) d\xi, \qquad (5)$$

где L – длина лопатки, R_1 – радиус ротора. Для конкретной лопатки, изготовленной на одном из заводов РФ, зависимость (5) показана на рис. 1 ($\Omega = 3000$ об/мин):

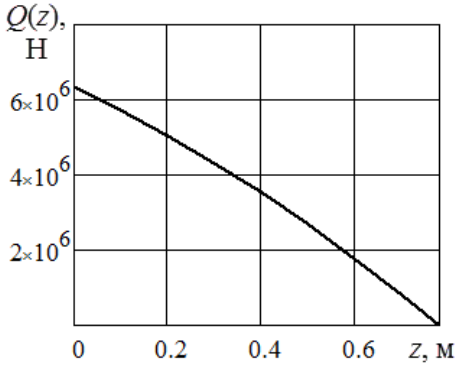


Рис. 1. Растягивающая сила

К системе ОДУ (4) ставятся восемь граничных условий. На заделанном конце $z = 0$ равны нулю перемещения и повороты, а на свободном конце $z = L$ – перерезывающие силы и изгибающие моменты.

Поставленную краевую задачу можно решить лишь численно. Однако необходимо уточнение: задача имеет восьмой порядок только при вынужденных колебаниях (с нагрузками q_x, q_y).

В случае же свободных колебаний порядок повышается до девяти: частота колебаний ω неизвестна, к системе добавляется уравнение $\omega' = 0$. Дополнительное граничное условие – заданное на одном из концов

значение какой-либо из восьми неизвестных. В конце расчета лучше ввести нормирующий множитель, как это принято в теории колебаний [4,10].

Расчеты в пакете Mathcad

Система (4) переписывается в матричном виде:

$$Y' = F(s,Y), Y = \left(Q_x \quad Q_y \quad M_x \quad M_y \quad \theta_x \quad \theta_y \quad u_x \quad u_y \quad \omega^2\right)^T \qquad (6)$$

Вид столбца F ясен из (4). Краевая задача для системы (6) решается методом стрельбы в пакете Mathcad с встроенной функцией sbval-rkfixed [13].

Результаты расчета первых пяти частот для конкретной лопатки следующие:

$$\omega_1 = 741,\ \omega_2 = 1{,}59 \cdot 10^3,\ \omega_3 = 3{,}95 \cdot 10^3,$$

$$\omega_4 = 7{,}47 \cdot 10^3,\ \omega_5 = 1{,}28 \cdot 10^4$$

На рис. 2 представлены графики соответствующих форм колебаний:

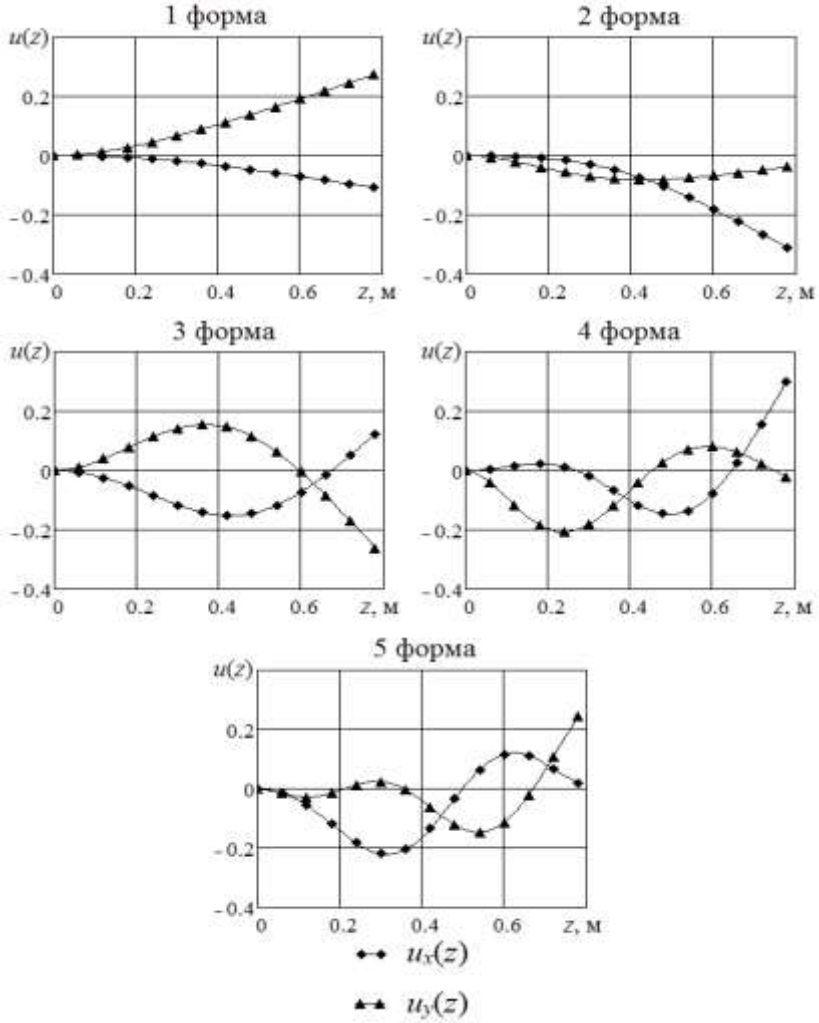


Рис. 2. Нормированные собственные формы

Эти графики визуально такие же, как и без центробежной силы. Малое отличие показано на рис. 3:

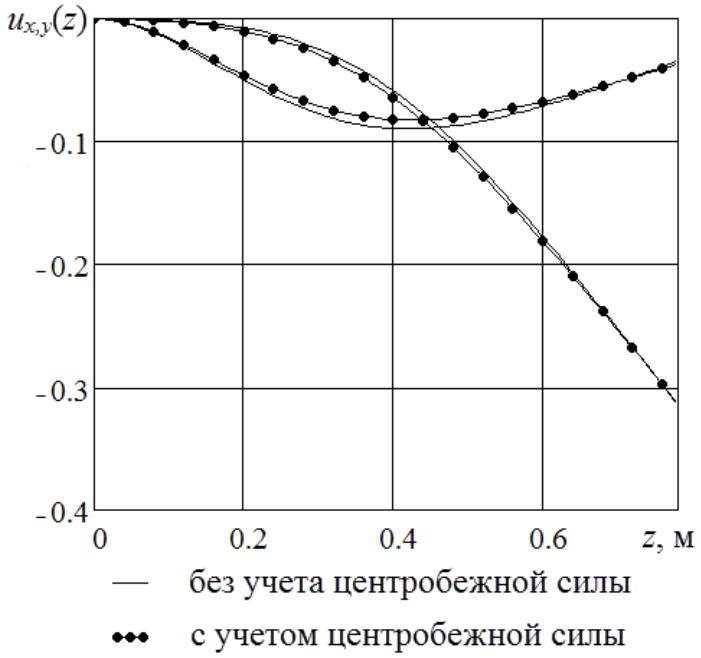


Рис. 3. Влияние центробежной силы на вторую форму

Однако учет центробежной силы существенное влияет на низшие частоты:

$$\frac{\Omega_{cf} - \Omega}{\Omega_{cf}} \cdot 100\% = (35{,}6 \quad 9{,}4 \quad 5{,}5 \quad 3{,}3 \quad 1{,}2)\%,$$

где Ω_{cf}, Ω – собственные частоты с учетом и без учета центробежной силы.

Диаграмма Кемпбелла

Важной частью проектирования турбины является построение диаграммы Кемпбелла, показывающей зависимость частот колебаний от скорости вращения ротора. Эта диаграмма позволяет определить области возможных резонансов. Сначала диаграммы Кемпбелла строились по результатам испытаний лопаток в кемпбелл-машине. Внешне установка представляет собой вакуумную камеру, в которой находится исследуемый диск с лопатками [2]. Возбуждение колебаний осуществляется с помощью струи пара или воды, но могут быть использованы и электромагниты.

В последнее время, с развитием компьютерных технологий, появилась возможность построения диаграмм Кемпбелла расчетным методом [14]. В данной работе для построения диаграмм использована изложенная выше теория и пакет Mathcad [13].

На рис. 4 показаны результаты расчета – диаграмма для конкретной лопатки:

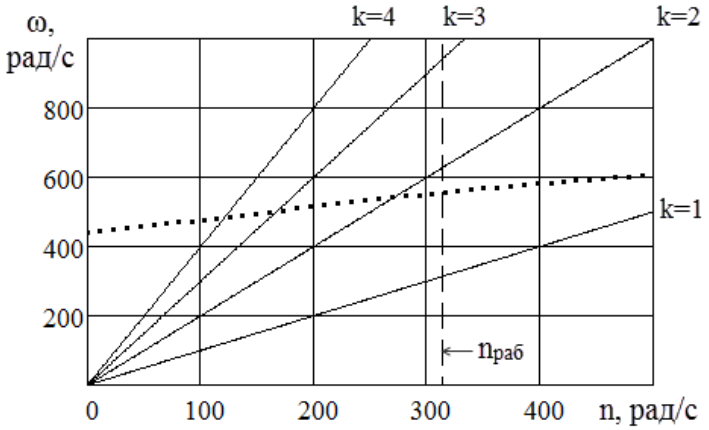


Рис. 4. Вибрационная диаграмма для 1-ой собственной частоты

Для построения областей возможных резонансов кривую собственной частоты представляют как полосу, поскольку собственные частоты имеют разброс. Допускаемая относительная разница между максимальным и минимальным значением собственной частоты регламентируется соответствующими документами. По точкам пересечения полосы собственных частот с лучами возбуждающих гармоник можно получить область скоростей ротора, на которой возможен резонанс. Таких режимов следует избегать с помощью отстройки от резонанса. В случае неустановившегося движения нужно обеспечить достаточно быстрый проход через резонанс [12]. Иногда возможна работа на резонансе благодаря демпфированию.

Заметим следующее. Диаграмма Кемпбелла предназначена для графического определения резонансных режимов по точкам пересечения. Однако предложенная в данной работе методика позволяет сразу находить эти режимы. Полагая в системе (4) $\omega = n\Omega$, можно далее сразу определить резонансные значения скорости Ω. При этом необходимость в диаграмме, казалось бы, исчезает. Однако это не так: множество резонансных скоростей достаточно «плотное», и непосредственное определение его методом стрельбы оказывается трудоемким. Так что диаграммы Кемпбелла все-таки весьма полезны.

Заключение

Итак, разработана простая методика построения диаграмм Кемпбелла для турбинных лопаток как естественно-закрученных стержней. Теоретической основой являются уравнения малой деформации от напряженного состояния. Вычислительные средства – пакет Mathcad с методом стрельбы для краевых задач на собственные значения систем ОДУ девятого порядка.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России (коды проектов: № 933-2014, № 1972-2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин А.В., Боришанский К.Н., Консон Е.Д. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин. Л.: Машиностроение, 1981.-710 с.
2. Kirillov O.N. Campbell diagrams of weakly anisotropic flexible rotors // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2009. Т. 465. № 2109. Pp. 2703-2723.
3. Машиностроение. Энциклопедия / Под ред. Фролова К.В. Том 1-3, Книга 2. Динамика и прочность машин. Теория машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1995. – 622 с.
4. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
5. Вибрации в технике; Справочник. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. / Под ред. Диментберга Ф.М. и Колесникова К.С. М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
6. Воробьев Ю.С., Шульженко Н.Г. Исследование колебаний систем элементов турбоагрегатов. Киев: Наукова думка, 1978. – 134 с.
7. Жирицкий Г.С., Струнки́н В.А. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. М.: Машиностроение, 1968. 520с.
8. Бауэр В.О., Биргер И.А., Шорр Б.Ф. и др. Динамика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
9. Воробьев Ю.С., Шорр Б.Ф. Теория закрученных стержней. Киев: Наукова Думка, 1983. – 188 с.
10. Елисеев В. В. Механика упругих тел. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.
11. Елисеев В.В., Москалец А.А., Оборин Е.А. Анализ деформаций турбинных лопаток на основе полной одномерной модели // Тяжелое машиностроение, 2015. – № 5 – С. 35–39.
12. Елисеев В.В., Москалец А.А., Оборин Е.А. Применение уравнений Лагранжа для расчета колебаний лопаток // Справочник. Инженерный журнал с приложением, 2015.– №8. – С. 21–24.
13. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
14. Игумнов Л.А., Говоров А.А., Мартиросов М.И. Изучение взаимодействия лопаточного венца с набегающим дозвуковым потоком при возникновении флаттера // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013. – № 1(3). – С. 11–18.

V.V. Eliseev[1], A.A. Moskalets[2]

COMPUTATIONAL TECHNIQUE OF PLOTTING CAMPBELL DIAGRAMS FOR TURBINE BLADES

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Technique of plotting Campbell diagrams for turbine blades is developed by means of mathematical modeling. Equations of blade oscillations in the field

of centrifugal forces are derived. Turbine blade is supposed to be a naturally twisted rod. Numerical equation of eigenvalue problem gives required dependencies of oscillation frequency on angular velocity. Calculations are performed using shooting method in MathCAD. Computational results for concrete turbine blade are presented.

Key words: turbine blade, Campbell diagram, naturally twisted rods, system of ODEs, shooting method, natural frequencies and modes, Mathcad.

REFERENCES

[1] Levin A.V., Borishanskiy K.N., Konson E.D. Prochnost' i vibratsiya lopatok i diskov parovyh turbin. L.: Mashinostroenie, 1981. 710 p.
[2] Kirillov O.N. Campbell diagrams of weakly anisotropic flexible rotors // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2009. T. 465. – № 2109. Pp. 2703-2723.
[3] Mashinostroenie. EHntsiklopediya / Pod red. Frolova K.V. Tom 1-3, Kniga 2. Dinamika i prochnost' mashin. Teoriya mashin i mehanizmov. M.: Mashinostroenie, 1995. 622 p.
[4] Biderman V.L. Teoriya mehanicheskih kolebaniy. M.: Vysshaya shkola, 1980. 408 p.
[5] Vibratsii v tehnike; Spravochnik. T. 3. Kolebaniya mashin, konstruktsiy i ih ehlementov. / Pod red. Dimentberga F.M. i Kolesnikova K.S. M.: Mashinostroenie, 1980. 544 p.
[6] Vorob'ev Yu.S., Shul'zhenko N.G. Issledovanie kolebaniy sistem ehlementov turboagregatov. Kiev: Naukova dumka, 1978. 134 p.
[7] Zhiritskiy G.S., Strunkin V.A. Konstruktsiya i raschet na prochnost' detaley parovyh i gazovyh turbin. M.: Mashinostroenie, 1968. 520 p
[8] Bauehr V.O., Birger I.A., Shorr B.F. i dr. Dinamika aviatsionnyh gazoturbinnyh dvigateley. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p.
[9] Vorob'ev Yu.S., Shorr B.F. Teoriya zakruchennyh sterzhney. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 188 p.
[10] Eliseev V. V. Mehanika uprugih tel. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. – 336 p.
[11] Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. Analiz deformatsiy turbinnyh lopatok na osnove polnoy odnomernoy modeli // Tyazheloe mashinostroenie, 2015. № 5 Pp. 35-39.
[12] Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. Primenenie uravneniy Lagranzha dlya rascheta kolebaniy lopatok // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem, 2015. №8. Pp. 21-24.
[13] Kir'yanov D.V. Mathcad 14. SPb.: BHV-Peterburg, 2007. 704 p.
[14] Igumnov L.A., Govorov A.A., Martirosov M.I. Izuchenie vzaimodeystviya lopatochnogo ventsa s nabegayushchim dozvukovym potokom pri vozniknovenii flattera // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2013. № 1(3). Pp. 11-18.

УДК 621.5.09 ; DOI 10.1872/MMF-2016-41

В.В. Елисеев[1], В.А. Пискунов[2]

ВЫСТРЕЛ ИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЛИНЕМЁТА: ТРИ ЭТАПА ПРОЦЕССА

[1]Владимир Васильевич Елисеев, д. физ.-мат. н. профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: yeliseyev@inbox.ru

[2]Владимир Александрович Пискунов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: vildan.05@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены проблемы динамики и прочности пневматического линемёта, принцип его действия и процесс выстрела. Для описания трех этапов выстрела использован метод уравнений Лагранжа. Получены численные решения в пакете MathCad. Полет снаряда описан как движение тела с переменной массой. Результатами работы являются рассчитанные законы движения, значения длительности этапов, скоростей тел и сил взаимодействия.

Ключевые слова: пневматический линемёт, спасательная техника, быстродействующий клапан, уравнения Лагранжа, переменная масса, внутренняя баллистика, компьютерная математика.

Пневматические линемёты служат для подачи выстрелом тонкого каната (линя) к цели при спасении на море. Выстрел линемёта осуществляется за счет энергии сжатого газа [5]. В таких пневматических приборах применяется быстродействующий клапан [5], аналогичный используемым для создания ударных волн [1, 5]. Изучение процессов при выстреле линемета [8, 12] требует математического моделирования, поскольку измерения сложны из-за кратковременности (3 мс) [13].

Исследуемый прибор ИСТА-240 (рис.1) разработан и производится компанией ИСТА; он сертифицирован Российским морским регистром судоходства. Его внешний вид показан на рис. 1, а.

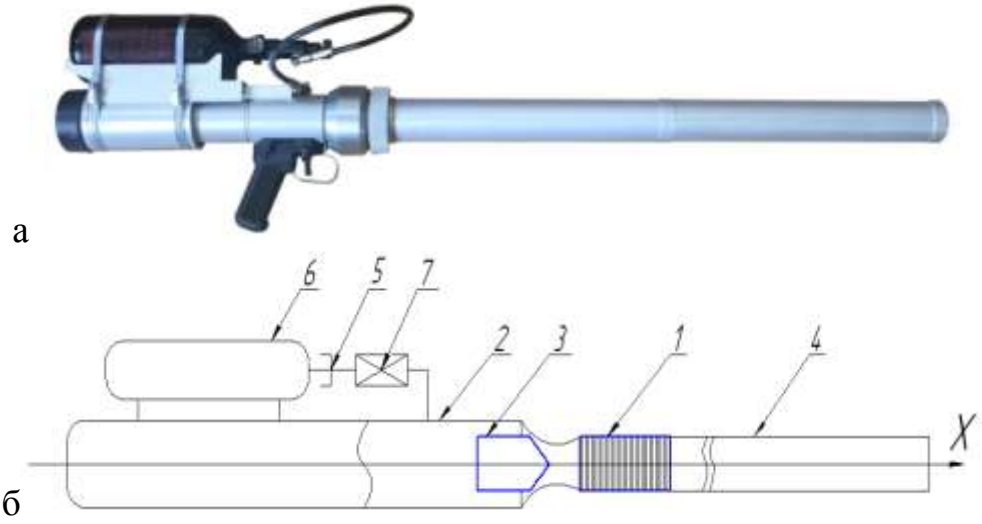


Рис.1. Внешний вид (а) и схема (б) линемёта ИСТА-240

Устройство и работа линемета

После открытия вентиля 5, сжатый воздух из баллона 6 под давлением 21 МПа поступает на редукционный клапан 7 (рис. 1, б). На редукторе происходит понижение давления до 6 МПа, и по гибкому шлангу воздух поступает в управляющую полость под колпак 3. Колпак запирает основной клапан линемёта, опираясь на резиновое кольцевое седло. Воздух по кольцевому зазору между колпаком и направляющей начинает поступать в рабочую камеру пускового устройства 2 (ПУ). Гильза ПУ отходит в крайнее правое положение, запирая систему сброса остаточного давления, то есть систему гашения отдачи. Когда давление воздуха в управляющей и рабочей полостях уравниваются, процесс накачки воздуха прекращается. Прибор готов к выстрелу.

Для запуска снаряда стрелок нажимает на предохранитель и спусковой крючок. Открывается сбросовый клапан в корпусе ПУ, и воздух из управляющей полости начинает сбрасываться в атмосферу. Когда давление под колпаком становится равным 1/3 от давления в рабочей камере, открываться основной клапан. Газ давит на торец снаряда 1, разгоняя его в стволе 4. ПУ начинает двигаться по штоку, открывается кольцевое отверстие между гильзой и стаканом ПУ, и остаток газа сбрасывается в атмосферу, создавая воздушную подушку. Происходит гашение отдачи [11]. В донной части снаряда уложена небольшая часть линя, а один конец защемлен в казеннике. При разгоне в стволе можно считать массу контейнера постоянной. Поскольку время открытия клапана малое (0,0005 с), процессы можно считать адиабатическими, а сложными эффектами газовой динамики в стволе можно пренебречь.

После вылета снаряда из ствола срывается дно контейнера, и начинает разматываться линь. Согласно рекомендации, выстрел производится примерно под углом 30 градусов.

Первый этап выстрела

На первом этапе происходит открытие основного клапана. Участвуют три тела снаряд, колпак, ПУ. Для составления уравнений обратимся к расчетной схеме на рис. 2.

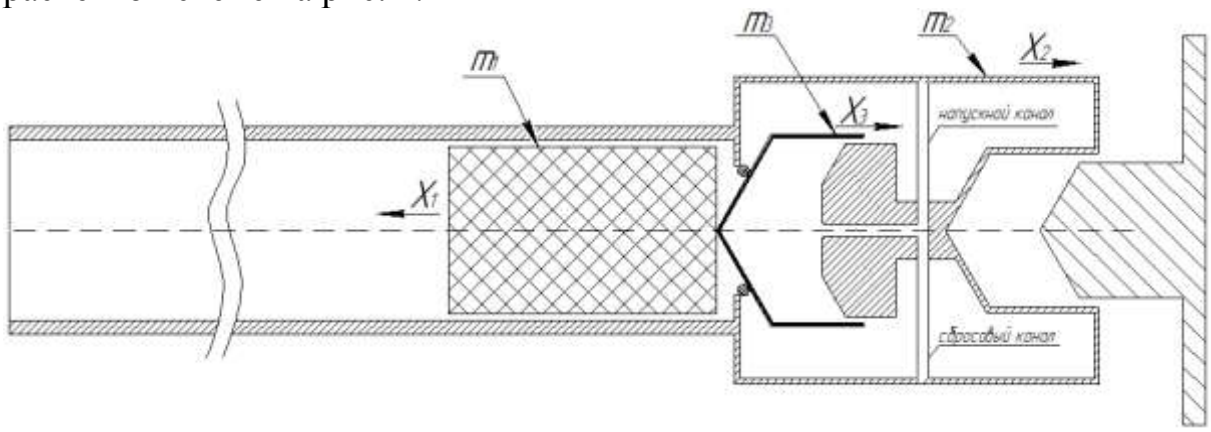


Рис. 2. Расчетная схема линемёта

В линемёте на первом этапе имеем три независимо движущихся тела: снаряд, пусковое устройство (ПУ) и колпак клапана (КК) с массами m_1, m_2, m_3 соответственно. В снаряде уложен линь – нерастяжимая нить с погонной массой ρ и длиной l. Массы m_1, m_2 переменны из-за выхода линя из контейнера снаряда.

Для описания движения используем уравнения Лагранжа 2-го рода [4, 7, 9]:

$$(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i})^{\square} - \frac{\partial K}{\partial q_i} = Q_i^* - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} \qquad (1)$$

где K – кинетическая энергия как функция обобщенных координат, скоростей и явно входящего времени (при нестационарных связях), Q_i^* – непотенциальные обобщенные силы, П – потенциальная энергия. Эти уравнения имеют минимальный порядок и содержат только независимые обобщенные координаты.

Для схемы линемета на рис. 2 обобщенные координаты $q_i = x_i$ – это абсолютные перемещения тел налево (x_1) и направо (x_2, x_3). Левые части уравнений (1) определяются выражением кинетической энергии

$$K(q_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{2}[m_1(x_i)\dot{x}_1^2 + m_2(x_i)\dot{x}_2^2 + m_3\dot{x}_3^2], \qquad (2)$$
$$m_1 = m_{10} + \rho(l - x_1 - x_2),\ m_2 = m_{20} + \rho(x_1 + x_2)$$

Здесь m_{10}, m_{20} – массы снаряда и пускового устройства без линя. Вышедшая из контейнера снаряда часть линя считается неподвижной относительно ПУ.

В правых частях уравнений (1) – обобщенные силы с выделенными потенциальными слагаемыми. Для движения под действием только

давления сжатого газа будем иметь $Q_i^* = 0, \Pi = \Pi(V)$ – функция от объема газа. Потенциальную энергию Π определим из следующих соотношений [4, 9]:

$$\Pi = -\frac{p_0 V_0^\gamma}{1-\gamma} V^{1-\gamma},\ p = -\frac{\partial \Pi}{\partial V},\ pV^\gamma = p_0 V_0^\gamma; \qquad (3)$$
$$V(x_i) = V_0 + S_1(x_1 + x_2) + S_3(x_3 - x_2)$$

В геометрическое соотношение для объема V системы (3) входит начальный объем V_0 и площади сечения ствола S_1 и колпака S_3. Формулы содержат давление p и соответствуют адиабатическому процессу с показателем $\gamma = 1.4$.

Однако из-за отдачи при выстреле необходима опора – «плечо». Ей соответствует обобщенная сила со свойствами упругости и демпфирования. Положим

$$Q_2^* = -cx_2 - b\dot{x}_2;\ Q_1^* = Q_3^* = 0 \qquad (4)$$

Приходим к следующей системе уравнений Лагранжа:

$$m_1\ddot{x}_1 - \rho\left(\frac{1}{2}\dot{x}_1^2 + \dot{x}_1\dot{x}_2\right) = p(V)S_1,$$
$$m_2\ddot{x}_2 + \rho\left(\frac{3}{2}\dot{x}_2^2 - \dot{x}_1\dot{x}_2\right) = p(V)(S_1 + S_3) + Q_2, \qquad (5)$$
$$m_3\ddot{x}_3 = -p(V)S_3$$

где объем V определяется выражением (3). Система нелинейная, шестого порядка. При заданных начальных условиях она интегрируется средствами компьютерной математики [6]. При этом вводим скорости $v_i = \dot{x}_i$ и получаем шесть уравнений.

На рис. 3 представлены функции $x_i(t)$ – результаты численного интегрирования с встроенной функцией *rkfixed* [6]. Значения параметров: $m_{10} = 0.508$ кг, $\rho = 1.13 \cdot 10^{-3}$ кг/м, $m_{20} = 7.07$ кг, $m_3 = 0.008$ кг, $S_1 = 0.002$ м^2, $S_3 = 0.001$ м^2, $V_0 = 0.562 \cdot 10^{-3}$ м^3, $l = 260$ м, $c = 100$ Н/м, $b = 100$ Н·с/м. Рассчитанные законы изменения координат почти точно соответствуют равноускоренному движению – ускорения не успевают измениться на рассматриваемом начальном этапе.

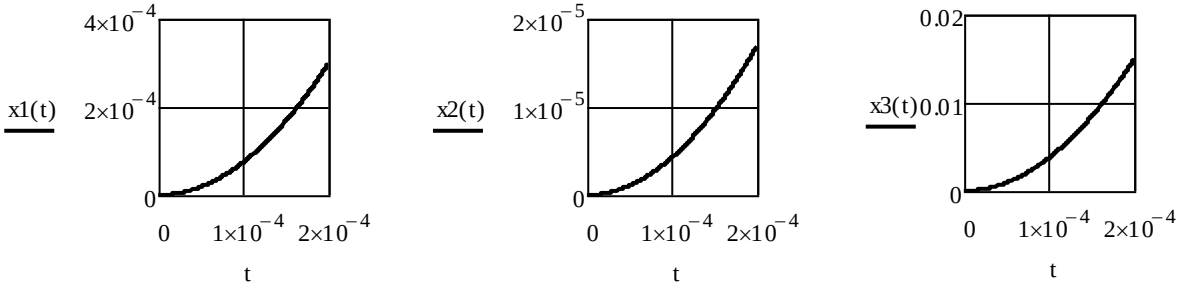


Рис. 3. Перемещения на первом этапе

Моделируемый первый этап процесса заканчивается соударением колпака с направляющей на пусковом устройстве в некоторый момент времени t_1. При этом выполняется условие

$$x_3(t_1) - x_2(t_1) = \Delta \qquad (6)$$

где $\Delta = 0.008$ мм – заданный начальный зазор. Из уравнения (5) численно определяется время $t_1 = 1.46 \cdot 10^{-4}$ с. Графики на рис. 3 построены в более широком интервале.

Важнейшей расчетной величиной является скорость соударения колпака клапана линемета (КК) с направляющей пускового устройства

$$v^* = v_3(t_1) - v_2(t_1) = 108.9\,\text{м/с} \qquad (7)$$

Расчет этой величины важен для прогнозирования прочности КК [2]. При испытаниях и эксплуатации линемета были случаи разрушения КК. Поэтому проводились поиски особых прочных материалов для КК. Специально для клапана был выбран композиционный материал Хостаформ С27021 с полиформальдегидной матрицей и включениями в виде микросфер [8, 11].

Второй этап

Далее начинается второй этап процесса выстрела. Колпак и пусковое устройство составляют одно целое, координата x_3 как независимая исчезает, количество уравнений Лагранжа уменьшается до двух

$$\begin{aligned} & m_1\ddot{x}_1 - \rho\left(\frac{1}{2}\dot{x}_1^2 + \dot{x}_1\dot{x}_2\right) = p(V)S_1, \\ & (m_2 + m_3)\ddot{x}_2 + \rho\left(\frac{3}{2}\dot{x}_2^2 - \dot{x}_1\dot{x}_2\right) = p(V)S_1 + Q_2^*. \\ & V = V_0 + S_3(x_1 + x_2) + S_3\Delta \end{aligned} \qquad (8)$$

Начальные условия определяются значениями координат и скоростей в конце первого этапа:

$$t = t_1 : x_1 = 1.6 \cdot 10^{-4},\ x_2 = 9.08 \cdot 10^{-6}\ (\text{м}),\ v_1 = 2.18,\ v_2 = 0.124\ (\text{м/с}).$$

Численное интегрирование не вызывает проблем. Графики представлены на рис. 4.

Заканчивается этап вылетом снаряда из ствола в момент времени t_2 с выполнением условия

$$x_1(t_2) + x_2(t_2) = L, \qquad (9)$$

где L=0.75 м – длина ствола. Численное решение уравнения $t_2 = 0.012$ с.

Определяем важные расчетные величины: скорость вылета снаряда $v_1(t_2)$=87.6 м/с, сила отдачи $Q(t_2)$=1585 Н.

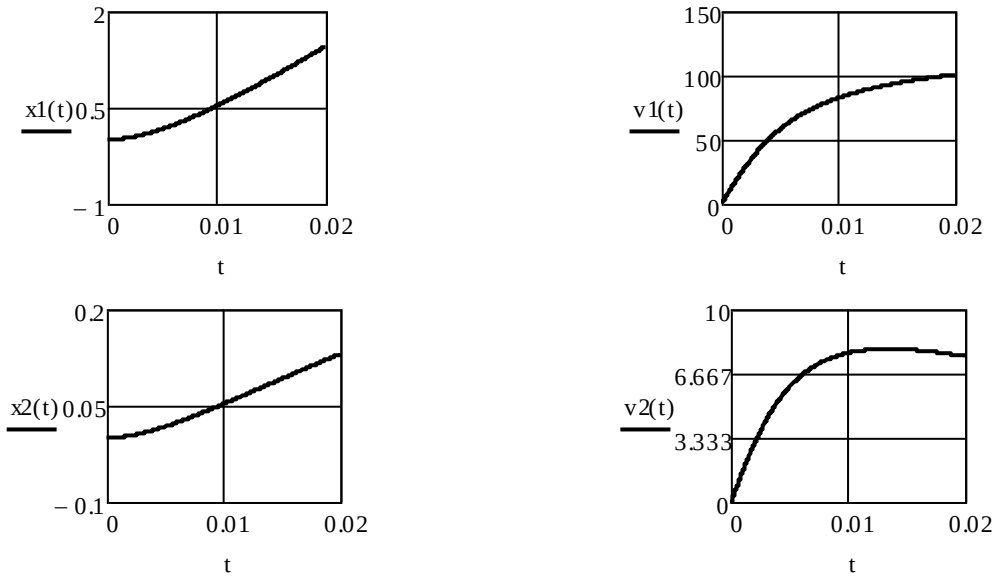


Рис. 4. Координаты и скорости на втором этапе

Третий этап

Последний третий этап – полет в пространстве. Его нетрудно моделировать, только пренебрегая силой тяжести [9]. Тогда расчет в Mathcad будет еще проще, чем на втором этапе. Но практического интереса это не представляет.

Рассмотрим возможную схему расчета полета снаряда-контейнера и линя в вертикальной плоскости (рис. 5). Теперь необходимо вводить дополнительные координаты по вертикали и учитывать изгиб линя.

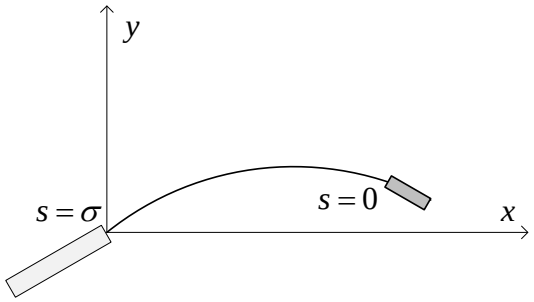


Рис. 5. Полет в вертикальной плоскости

Примем во внимание известные уравнения полета тела, брошенного с начальной скоростью v_0 под углом γ к горизонту (g – ускорение свободного падения):

$$x = v_0 t \cos\gamma,$$

$$y = v_0 t \sin\gamma - gt^2/2 = \mathrm{tg}\gamma\, x - gx^2/2v_0^2\cos^2\gamma$$

Это параметрические уравнения параболы.

Для линя со снарядом примем аналогичную аппроксимацию с тремя обобщенными координатами

$$x(q_i, s) = \sigma - s,\ y(q_i, s) = \alpha(\sigma - s) - \beta(\sigma - s)^2 \qquad (10)$$

Здесь s – материальная (Лагранжева) координата частиц линя. На конце линя, где снаряд, $s=0$. На дульном срезе линемета $s=\sigma$. Обобщенные координаты $q_1=\sigma, q_2=\alpha, q_3=\beta$ – искомые функции времени.

Далее надо определить кинетическую энергию системы $K(q_i,\dot{q}_i)$ и потенциальную энергию $\Pi(q_i)$, чтобы составить уравнения Лагранжа [4, 9]. Рассмотрим структуру этих уравнений:

$$K(q_i,\dot{q}_i)=\frac{1}{2}\sum_{i,k} m_{ik}(q)\dot{q}_i\dot{q}_k$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i}=\sum_k m_{ik}\dot{q}_k,\ \frac{\partial K}{\partial q_i}=\frac{1}{2}\sum_{s,k}\partial_i m_{sk}\dot{q}_s\dot{q}_k \qquad (11)$$

$$(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i})^{\square}=\sum_{s,k}\partial_s m_{ik}\dot{q}_s\dot{q}_k+\sum_k m_{ik}\ddot{q}_k=\frac{\partial K}{\partial q_i}+Q_i$$

В матричной форме уравнения Лагранжа можно записать так:

$$M\ddot{q}+\sum_s \dot{q}_s\partial_s M\dot{q}+\frac{1}{2}(\dot{q}^T\partial_i M\dot{q})=Q=-\frac{\partial \Pi}{\partial q} \qquad (12)$$

Здесь $M(q)=(m_{ik})$ – матрица инерции, а выражения в скобках – это матрицы с выписанными компонентами.

Для радиус-вектора частиц линя, скорости частиц и кинетической энергии имеем

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(s,t),\ 0\le s\le\sigma(t),\ \mathbf{r}=\mathbf{r}(s,q_i)$$

$$\mathbf{v}=\sum_i\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q_i}\dot{q}_i,\ K=\frac{1}{2}(\rho\int_0^\sigma v^2 ds+m_1v_1^2),\ \mathbf{v}_1=\mathbf{v}(0,t) \qquad (13)$$

Вычисления проводятся в *Mathcad*, причем для максимальной точности – в символьном виде[6].

Обратимся к потенциальной энергии. Вклад в нее от сил тяжести следующий:

$$\Pi_g(q_i)=\mathrm{g}(\rho\int_0^\sigma y(q_i,s)ds+m_1y(q_i,0)) \qquad (14)$$

Но есть и второе слагаемое в потенциальной энергии, связанное с растяжением линя:

$$\Pi_\varepsilon(q_i)=\frac{B}{2}\int_0^\sigma\varepsilon^2(q_i,s)ds,\ \Pi=\Pi_g+\Pi_\varepsilon \qquad (15)$$

где B – жесткость на растяжение (произведение модуля Юнга на площадь сечения), а ε – деформация растяжения. Последняя принимается в форме Коши [4]

$$\varepsilon=\frac{1}{2}(|\mathbf{r}'|^2-1)\ne|\mathbf{r}'|-1 \qquad (16)$$

При аппроксимации [4] энергию $\Pi(q_i)$ можно вычислить в символьном виде – но только с деформацией Коши.

Заметим, что нетрудно задать и такую другую аппроксимацию, в которой $\varepsilon = 0$:

$$x' = \cos(\alpha + \beta s),\ x = \int_{\sigma}^{s} x' ds = \frac{1}{\beta}\sin(\alpha + \beta s)\Big|_{\sigma}^{s}$$
$$y' = \sin(\alpha + \beta s),\ y = \int_{\sigma}^{s} y' ds = -\frac{1}{\beta}\cos(\alpha + \beta s)\Big|_{\sigma}^{s} \qquad (17)$$

Однако вычисления при этом значительно усложняются.

Осталось задать начальные условия: значения $q_i, \dot{q}_i$ в начале этапа полета. Но этот вопрос оказывается сложным и не имеет однозначного ответа. Очевидно, $\sigma(0) = 0, \dot{\sigma}(0) = v_0 \cos\gamma, \alpha(0) = \mathrm{tg}\gamma$. Также естественно принять $\beta(0) = g/2v_0^2 \cos^2\gamma$. Но нет оснований для задания $\dot{\alpha}(0), \dot{\beta}(0)$ оставшихся двух начальных условий.

Вычислительная сложность рассматриваемой задачи – вырождение матрицы инерции при $\sigma = 0$ (определитель обращается в ноль). А сложность по существу – особенность задачи как «кембриджской», о чем написано в [9]. Практическая же ценность расчета полета на расстояние более 200 м сомнительна без сил сопротивления.

Заключение

В статье описана схема и принцип работа линемёта и представлена эффективная методика расчета двух этапов выстрела: в стволе до соударения с колпаком клапана и после этого соударения. Определены законы движения, длительности этапов, скорости и силы. Расчет третьего этапа, полета в вертикальной плоскости, пока не удается довести до конца даже средствами компьютерной математики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакута В.Г., Завадская О.Н., Карпенко Л.Н., Синтез элементов быстродействующих импульсных газовых клапанов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 1991. - №7. - С. 68-74.
2. Воротов А.В., Бусыгина Е.Л., Митюков Н.В. Расчет типовых элементов пневмогидравлических систем // Вестник КИГИТ. - 2011. - № 5 (18). - С. 32-36.
3. Газодинамическое исследование пневматического линемёта / Исаков С.Н. [и др.] // Журнал технической физики. - 2006. - Т.76. - №3. - С.75-80.

4. Елисеев В.В. Механика упругих тел. СПб. Изд-во СПбГПУ. 2003. - С. 336.
5. Исаков С.Н., Пакин П.А., Смирнов Г.В., Пусковой клапан для ударных труб // А.с. СССР №496405. - 1975. - Бюл. №47.
6. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. - СПб.: БХВ - Петербург. - 2007. - С. 704.
7. Колесников К.С., Александров Д.А., Асташев В.К.. Машиностроение. Энциклопедия. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. - М.: Машиностроение. - Т. 1-3. - Кн. 1. - 1994. - С. 534.
8. Внутренняя баллистика дульнозарядных гладкоствольных орудий / Митюков Н.В. [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. - 2012. - Т. 14. - № 3. - С. 371-375.
9. Пановко Я.Г. Механика деформируемого твердого тела. - М.: Наука. - 1985. - С. 288.
10. Пискунов В.А. Елисеев. В.В. Испытательный стенд для пневматического линемёта // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2016. - С. 74-79.
11. Пискунов В.А. О прочности конструктивных элементов пневматического линемета // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2014. - С. 308.
12. Трофимов В.Н. Пневматическое оружие. Справочник. - М.: ДАИРС. - 2006. - С. 175.
13. Kharitonov A.M., Adamov N.P., Chirkashenko V.F., Mazhuli.I., Shpak S.I., Shiplyuk A.N., Vasenyov L.G., Zvegintsev V.I., Muylaert M. Aerothermodynamics of expert ballistic vehicle at hypersonic speeds// Progress in flight physics. - 2011. - P. 608.

V.V. Eliseev[1], V.A. Piskunov[2]

SHOT FROM PNEUMATIC LINE – THROWER: THREE STAGES OF PROCESS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The problems of dynamics and strength of a pneumatic line-thrower, its principle of action and the process of shot are studied. To model three stages of shot, the method of the Lagrange equations is used. The numerical solutions are obtained in the computer mathematics package MathCad. The shell flight is described as the motion of a body with variable mass. The results of work are the calculated laws of motion, the values of the duration of the stages, of the velocities of the bodies, and of the interaction forces.

Key words: pneumatic line-thrower, lifesaving technics, high-speed valve, Lagrange equations, variable mass, internal ballistics, computer mathematics.

REFERENCES

[1] Bakuta V.G., Zavadskaya O.N., Karpenko L.N., Sintez elementov bistrodeystvuyshih impulsnih gazovih klapanov // Izvestiya visshih uchebnih zavedeniy. Elektromehanika. 1991. N7. Pp. 68-74.
[2] Vorotov A.V., Busigina E.L., Mitykov N.V., Raschet tipovih elementov pnevmogidravlicheskih system // Vestnik KIGIT. 2011. N5 (18). Pp. 32-36.
[3] Gazodinamicheskoe issledovanie pnevmaticheskogo linemeta / Isakov S.N. [i dr.] // Gurnal tehnicheskoy fiziki. 2006. Vol..76. N3. Pp.75-80.
[4] Eliseev V.V. Mehanika uprugih tel. SPb. Izd-vo SPbGPU. 2003. 336 p.
[5] Isakov S.N., Pakin P.A., Smirnov G.V., Puskovoy klapan dlya udarnih trub // A.c. SSSR N496405. 1975. N47.
[6] Kiryanov D.V. Mathcad 14. – SPb.: BHV – Peterburg. 2007. 704 p.
[7] Kolesnikov K.S., Aleksandrov D.A., Astashev V.K., Mashinostroenie. Enciklopedia. Dinamika I prochnost' mashin. Teoria mehanizmov i mashin. - M.: Mashinostroenie. - Vol. 1-3. Kn. 1. 1994 534 p.
[8] Vnutrennya ballistika dul'nozaryadnih gladkostvol'nih orudiy / Mitykov N.V. [i dr.] // Himicheskaya fizika I mezoskopiya. 2012. Vol. 14. N 3. Pp. 371-375.
[9] Panovko Y.G. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. M.: Nauka. 1985. 288 p.
[10] Piskunov V.A., Eliseev V.V., Ispitatel'niy stend dlya pnevmaticheskogo linemeta // Nedelya nauki SPbPU: Materiali nauchnogo foruma s megdunarodnim uchastiem. Luchshie dokladi. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. - 2016. Pp. 74-79.
[11] Piskunov V.A., O prochnosti konstruktivnih elementov pnevmaticheskogo linemeta // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka I obrazovanie: Materiali 4 Megdunarodnoy naychno-practicheskoy konferencii. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 2014. 308 p.
[12] Trofimov V.N. Pnevmaticheskoe orugie. Spravochnik. M.: DAIRS. 2006. 175 p.
[13] Kharitonov A.M., Adamov N.P., Chirkashenko V.F., Mazhuli.I., Shpak S.I., Shiplyuk A.N., Vasenyov L.G., Zvegintsev V.I., Muylaert M. Aerothermodynamics of expert ballistic vehicle at hypersonic speeds// Progress in flight physics. 2011. 608 p.

УДК 620.171.2: 539.431.2 ; DOI 10.1872/MMF-2016-42

В.А. Жуков

ДИСЛОКАЦИОННО-ФОНОННЫЙ МЕХАНИЗМ И ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Владимир Андреевич Жуков, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-6429, E-mail: v.zhukoff2011@yandex.ru

Аннотация

На основе модели суперпозиции фононов получена зависимость между амплитудой напряжения, эквивалентной пластической деформацией и числом циклом при усталостном повреждении. На примере сварных элементов металлоконструкций показана возможность использования данного подхода при сравнительной оценке различных вариантов.

Ключевые слова: суперпозиция фононов, усталостное повреждение, эквивалентная циклическая пластическая деформация, дислокации.

Испытания материалов и элементов металлоконструкций при переменных напряжениях требуют значительных временных и материальных затрат. При решении задачи отбора по принятым критериям наилучшего из исследуемых материалов, вариантов технологий или элементов конструкций целесообразно, используя минимум экспериментальных данных, отсеять наихудшие из них. Однако при этом необходимо обеспечить достаточную адекватность интерполяционных зависимостей, которая обусловлена, прежде всего, наличием единого для сравниваемых вариантов механизмом деформирования и деструкции испытуемых материалов.

Согласно [1, 2] в интервале от 1 до 10^{10} циклов перемен напряжений выделены четыре области усталости металлов: квазистатической пластической деформации (I), упругопластической деформации (II), микропластичности (III) и нанопластичности (IV). Образование субмикроскопических повреждений в переходной области от микропластической деформации (порядка $5\cdot10^4$ циклов перемен напряжений) к упругопластической деформации связывают с концентрацией напряжений в вершине группы дислокаций, задержанных у различных препятствий [3]. Экспериментально установлено, что усталостные трещины в переходной области от микропластичности (порядка нескольких млн. циклов перемен напряжений) к нанопластичности образуются в результате слияния пор, первоначально случайным образом рассеянных в объёме деформируемого металла.

При анализе повреждаемости металлов в процессе циклического деформирования, как правило, не учитывается скачкообразный характер перемещения дислокаций. Однако каждый скачок дислокации возбуждает колебания на атомарном уровне. Распространение и суперпозицию этих колебаний принято рассматривать как процесс взаимодействия квазичастиц фононов. Фононы относятся к бозе-частицам, в отличие от электронов и других ферми-частиц для них нет ограничений как на общее число фононов, так и на число фононов в одном том же квантовом состоянии. Энергия суперпозиции фононов может достигать значений, при которых в данном месте утрачивается стабильность кристаллического кристалла [4].

Впервые представление о том, что разрыв межатомных связей обусловлен флуктуациях энергии фононов теплового движения, было использовано в термофлуктуационной теории повреждения материалов [5, 6]. Однако в рамках термофлуктуационной теории не рассматривается возможность возникновения фононов в процессе деформирования материала. Представление о возможности разрывов межатомных связей в результате суперпозиции фононов, возникающих при пластическом деформировании металлов, было рассмотрено в работе [7]. Предполагается, что циклическое движение дислокаций многократно воспроизводит условия образования и суперпозиции фононов при переменных напряжениях, значительно меньше предела текучести. Используя представление о возможности повреждения металла в результате суперпозиции фононов, возникающих при сдвиге дислокаций, оценим область циклического деформирования, в котором суперпозицию фононов может считаться ведущим механизмом повреждения.

Отметим, что возможность суперпозиции фононов зависит не только условий деформирования, но и от структуры металла. Максимальная длина свободного пробега фононов $\Lambda_{\text{анг}}$, обусловленная ангармонизмом бездефектной кристаллической решётки, зависит от физических свойств металла и температуры [8]. Для железа при комнатной температуре $\Lambda_{\text{анг}}$ порядка 600 a, где a – среднее межатомное расстояние. Дефекты (дислокации, границы блоков и кристаллов, поры и т.п.) способствуют рассеянию фононов и уменьшают длину свободного пробега Λ по сравнению с $\Lambda_{\text{анг}}$.

Энергия, излучаемая при скачке дислокации на одно межатомное расстояние b в направлении сдвига, составляет τb^2 на 1 см длины линейной дислокации, где τ – напряжение сдвига. Максимальное значение флуктуации энергии при суперпозиции фононов, порождённых при скачке единичной дислокации, равно $\tau b^2 \Lambda$. Энергия образования вакансии составляет около половины энергии сублимации. Из равенства энергий суперпозиции фононов и энергии образования вакансий $\tau b^2 \Lambda = 0{,}5\, E_{\text{субл}}$ получим оценку минимального значения напряжения образования вакансий $\tau_{\text{вак}}$ при скачке дислокации. Минимальное значение Λ равно расстоянию между дислокациями; значение $\Lambda = \Lambda_{\text{анг}} = 600\, b$ соответствует плотность дислокаций порядка 10^9 см$^{-2}$, характерной для малоуглеродистых нормализо-

ванных сталей. Для железа $E_{\text{субл}} \approx 6{,}8 \cdot 10^{-19}$ Дж/атом, при $\Lambda_{\text{анг}} = 600\ a$ значения $\tau_{\text{вак}}$ порядка 25 МПа.

Заметим, что $\tau\Lambda = 0{,}5E_{\text{субл}}/b^2$ есть величина, инвариантная для данного металла. Это означает, что при напряжении $\tau > 0{,}5E_{\text{субл}}/(b^2\Lambda)$ возможно самопроизвольное изменения структуры металла в направлении уменьшения Λ; напротив, при $\tau < 0{,}5E_{\text{субл}}/(b^2\Lambda)$ значение Λ возрастает. Такие процессы самоорганизации структур называются автомодельными. В первом случае плотность структурных дефектов, в том числе дислокаций увеличивается, имеет место циклическое упрочнение металла. Во втором случае происходит циклическое разупрочнение.

Суперпозиция фононов при скольжении дислокаций, задержанных у препятствий, достаточна также для образования субмикроскопических трещин. Напряжение в вершине скопления из n дислокаций равно $n\tau$. При смещении головной дислокации на расстояние b суммарная энергия фононов может достигать значения $n\tau b^2\Lambda$. Исходя из равенства энергии фононов и энергии образования двух свободных поверхностей, запишем условие образования субмикротрещины при скачке только одной дислокации, задержанной препятствием, в виде $n\tau b^2\Lambda = 2E_{\text{п}}S$, где $E_{\text{п}}$ – поверхностная энергия металла, S – площадь субмикротрещины. Приняв значения $\Lambda = 600\ b$ и $n = 10$, в случае малоуглеродистой стали при $E_{\text{п}} \approx 2$ Дж/м^2 и $\tau = 100$ МПа получим значение площади субмикротрещины $S \approx 40\ b^2$. Таким образом, образование субмикротрещин возможно, если плотность дислокаций в полосе сдвига на порядок выше, чем в исходной структуре малоуглеродистой нормализованной стали. В работе [9] показано, что значение критической плотности дислокаций при зарождении субмикроскопических усталостных трещин равно порядка 10^{10} см$^{-2}$. По порядку величин полученная нами оценка согласуется с этим значением.

Увеличение плотности дислокаций возможно, если дислокации под действием напряжений преодолевают препятствия, тормозящие их скольжение (пересечения с другими дислокациями, кристаллы упрочняющих фаз). Оценим значение $\varepsilon_{\text{пл}}$амплитуды пластической деформации, при которой имеет место скольжение единичных дислокаций без отрыва их от препятствий, исходя из простейшей модели: распределение дислокаций и мест их закрепления равномерно по всему объёму материала, напряжение сдвига одинаково для всех дислокаций.

Предположим, что сопротивление сдвигу обеспечивается в основном наличием мелкодисперсных частиц вторичных фаз с высоким сопротивлением сдвигу. Тогда при напряжениях меньше предела текучести максимальное смещение дислокаций в направлении действия напряжения τ не превышает $0{,}5\lambda_{\text{ч}}$ (рис. 1, *а*). В этом случае предельная деформация сдвига $\gamma = \pi b/(8\lambda_{\text{ч}})$. Увеличение предела текучести при наличии твёрдых частиц $\tau_{\text{ч}} = Gb/\lambda_{\text{ч}}$, где G – модуль сдвига. Таким образом, $\gamma = \pi\tau_{\text{ч}}/(8G)$ и

$\varepsilon_{\text{пл}} = \pi\tau_{\text{ч}}/(16G) \approx 0{,}196\ \tau_{\text{ч}}/G$. Для конструкционной стали средней прочности при $\tau_{\text{ч}}$ = 250 МПа и $\varepsilon_{\text{пл}} = 50 \cdot 10^{-5}$; для малоуглеродистой стали порядка $\varepsilon_{\text{пл}} = 15 \cdot 10^{-5}$. Согласно полученной выше оценке для образования субмикротрещины в малоуглеродистой стали необходима пластическая деформация на порядок больше. Это возможно в результате прохождения дислокаций между частицами упрочняющей фазы и увеличения плотности дислокаций.

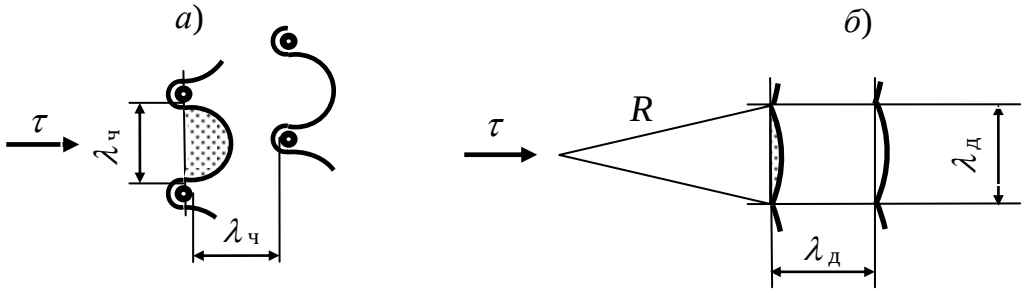


Рис. 1. Схема структуры металла при микропластической деформации:
а – упрочнённого мелкодисперсными частицами высокой твёрдости;
б – упрочнённого повышенной плотностью дислокаций.

Предположим, что сопротивление сдвигу обеспечивается в основном высокой плотностью дислокаций, расположенных равномерно по объёму металла. Обозначим расстояние между точками пересечения дислокаций символом $\lambda_{\text{д}}$ (рис. 1, *б*). До отрыва от закреплений в точках пересечения дислокаций имеет место соотношение $\tau_{\text{д}} = Gb/R$, где R – радиус кривизны дислокации. Наибольшее значение $\tau_{\text{д}} \approx 0{,}5Gb/\lambda_{\text{д}}$. Отрыв дислокации произойдёт при минимальном значении $R = 2\lambda_{\text{д}}$ и пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}} \approx 0{,}043\ \tau_{\text{д}}/G \approx 3 \cdot 10^{-5}$. После отрыва от закреплений дислокация может свободно переместиться на расстояние $\lambda_{\text{д}}$; в этом случае значение $\varepsilon_{\text{пл}} = \tau_{\text{д}}/G$, или порядка $70 \cdot 10^{-5}$ для малоуглеродистой стали.

Заметим, что циклическая пластическая деформация без отрыва дислокаций от мест закрепления существенно меньше, чем после отрыва. Возможно, уменьшением на порядок амплитуды пластической деформации при переходе от минимального напряжения, вызывающего отрыв дислокации, к ещё меньшим напряжениям, не достаточным для отрыва дислокации от мест закрепления, объясняется многократное увеличение числа циклов до разрушения и наличие «физического» предела усталости малоуглеродистых конструкционных сталей.

При оценке значений пластической деформации, которая соответствует образованию «разрывов» межатомных связей с образованием вакансий и субмикротрещин, не учитывалась неоднородность строения материала. Тем не менее, как показала оценка значений $\varepsilon_{\text{пл}}$ есть основания считать, что в области циклических пластических деформаций при напряжениях меньше технического предела текучести ведущим механизмом поврежде-

ний на атомарном уровне является суперпозиция фононов, возникающих в процессе скольжения дислокаций.

Полагая, что предельная степень повреждения металла в области многоцикловой усталости достигается в результате суммирования всех повреждений, возникающих при каждом цикле деформирования, запишем соотношение

$$\sum_N \tau b^2 \Lambda_{\text{анг}} \varepsilon_{\text{пл}}^p = C, \text{ или } \tau \varepsilon_{\text{пл}}^p N = C_\tau, \qquad (1)$$

где символ Σ_N означает суммирование субмикроскопических повреждений некоторого микрообъёма за N циклов его деформирования;

$\tau b^2 \Lambda_{\text{анг}}$ – максимальная энергия суперпозиции фононов;

$\varepsilon_{\text{пл}}$– амплитуда циклической пластической деформации;

p и C_τ – постоянные величины;

$b^2 \Lambda_{\text{анг}}$– активационный объём в термофлуктуационной теории.

Экспериментальное определение τ и $\varepsilon_{\text{пл}}$ отдельных микрообъёмов в каждом цикле перемены напряжения – задача практически неразрешимая. При переходе к параметрам процесса повреждения материала образца или конструкции приходится использовать «усреднённые» значения τ и $\varepsilon_{\text{пл}}$.

Установлено, что при постоянной амплитуде напряжения после некоторого числа циклов деформирования образца амплитуда остаточной деформации остаётся практически постоянной либо скорость изменения деформации минимальна в течение большей части от общего числа циклов до полного разрушения образца. Согласно теореме Пригожина - Гленсдорфа [10] это свидетельствует о самоорганизации, обеспечивающей переход объекта к состоянию с минимальным производством энтропии при данных условиях. В нашем случае – к состоянию с минимальной скоростью накопления повреждений материала.

Примем в качестве расчётного значения $\varepsilon_{\text{пл}}$ некоторое усреднённое и условно постоянное в данном испытании значение циклической пластической деформации, которое при действии данного напряжения τ по суммарному повреждению за N циклов эквивалентно фактическому повреждению испытуемого материала за то же число циклов. Решение вопроса о том, что считать предельной степенью повреждения металла при переменных напряжениях, имеет исключительное значение, так как от этого зависит, в конечном счёте, безопасность работы машин. В некоторых отраслях машиностроения (энергетическое оборудование, оборудование атомных станций [11], подъёмно-транспортное оборудование) принято считать предельным состояние, при котором протяжённость образовавшегося дефекта составляет 0,5 …2,0 мм. С одной стороны, такие дефекты могут быть обнаружены при контроле оборудования, с другой, они не вызывают быстрое развитие усталостного разрушения и тем более хрупкое разрушение конструкционных сталей средней прочности. При определении числа циклов N,

соответствующего предельной степени повреждения, далее принималось число циклов, при котором длина визуально наблюдаемого дефекта на поверхности испытуемого образца (без специальной подготовки его поверхности) находилась в пределах 1,0 … 2,0 мм.

Значение эквивалентной циклической пластической деформации $\varepsilon_{\text{пл}}$ определялось нами следующим способом.

1. По результатам испытаний плоских образцов при постоянной амплитуде симметричного цикла растяжения-сжатия были определены параметры зависимости

$$\sigma^m N = C_\sigma, \qquad (2)$$

где σ – амплитуда напряжения;

m и C_σ – постоянные величины.

2. По результатам испытаний плоских образцов с отверстием при постоянной амплитуде симметричного цикла растяжения-сжатия были определены параметры зависимости

$$\sigma_{\text{к}}^n N = C_{\text{к}}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{\text{к}}$ – амплитуда условного напряжения при испытании образца с концентратором;

n и $C_{\text{к}}$ – постоянные величины.

3. Согласно (1) каждому значению N соответствуют определённые значения τ (или σ при растяжении-сжатии образца без концентратора) и $\varepsilon_{\text{пл}}$. Для оценки значения $\varepsilon_{\text{пл}}$ было принято, что при малых деформациях суммарная упругопластическая деформация в основании концентратора в первом приближении равна $\alpha_\sigma \varepsilon_{\text{к}}$, где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, $\varepsilon_{\text{к}}$ – номинальное расчётное значение упругой деформации, $\varepsilon_{\text{к}} = \sigma_{\text{к}}/E$. Значение упругой деформации в основании концентратора принималось равным $\varepsilon = K_\sigma \varepsilon_{\text{к}}$, где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, $K_\sigma = \sigma/\sigma_{\text{к}} = \varepsilon/\varepsilon_{\text{к}}$ при данном N. Соответственно, оценка значения амплитуды пластической деформации в зоне концентратора равна $\varepsilon_{\text{пл.к}} \approx (\alpha_\sigma - K_\sigma)\varepsilon_{\text{к}}$.

Так как в основании концентратора плоского образца напряжённое состояние практически линейное, согласно (1) для образца без концентратора значение амплитуды пластической деформации было принято, равным $\varepsilon_{\text{пл}} \approx \varepsilon_{\text{пл.к}} \approx (\alpha_\sigma - K_\sigma)\varepsilon_{\text{к}}$ при одном и том же значении числа циклов N. Результаты испытаний плоских образцов из листа толщиной 12 мм и шириной 50 .. 60 мм без концентратора с отверстием диаметром 18 мм сталей Ст3 и 09Г2Т ($\alpha_\sigma = 2{,}33$) и расчётные значения $\varepsilon_{\text{пл}}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов и расчётные значения $\varepsilon_{пл}$

N, млн.	Сталь Ст3, m =8,30						Сталь 09Г2Т, m =6,10					
	σ, МПа	ε, $\times10^5$	$\sigma_к$, МПа	$\varepsilon_к$, $\times10^5$	K_σ	$\varepsilon_{пл}$, $\times10^5$	σ, МПа	ε, $\times10^5$	$\sigma_к$, МПа	$\varepsilon_к$, $\times10^5$	K_σ	$\varepsilon_{пл}$, $\times10^5$
0,1	226,6	113,3	176,6	88,3	1,28	92,4	270,9	135,4	194,2	97,1	1,40	90,8
0,5	185,4	92,7	132,4	66,2	1,40	61,6	208,1	104	137,3	68,6	1,52	55,8
1,0	171,7	85,8	117,7	58,8	1,46	51,2	185,7	92,8	119,8	59,9	1,55	49,7
2,0	157,9	79	104	52	1,52	42,2	165,8	82,9	104	52	1,60	38,3

4. Показатель степени p определён по соотношению, полученному из (1) на (2) при замене в (1) $\tau = 0{,}5\sigma$:

$$\varepsilon_{пл}^{p}/\sigma^{m-1} = C_\Sigma, \qquad (4)$$

$$\text{или } p\lg\varepsilon_{пл} = (m-1)\lg\sigma + \lg C_\Sigma .$$

Для стали Ст3 показатель степени p = 3,37; для стали 09Г2Т p = 2,96.

Из равенства $\varepsilon_{пл}^{p} = C_\Sigma\sigma^{m-1}$ следует, что соотношения (1) и (2) тождественны, если $\varepsilon_{пл} = C_\Sigma\sigma^{r}$ и $pr = m - 1$.

Значения p конструкционных сталей оценивались нами также по результатам, представленным в работе [12]. Образцы диаметром от 4 до 24 мм испытывались при круговом изгибе с записью диаграмм прогиба. Качественно диаграммы прогиба образцов подобны зависимости ширины петли гистерезиса, но при этом существенно упрощается фиксация момента появления микротрещин длиной порядка двух-пяти десятков микрометров. В качестве косвенной оценки $\varepsilon_{пл}$ нами было принято значение приращения прогиба образца Δf от начала испытания до момента обнаружения микротрещины. На рис. 2, *а* представлены зависимости между Δf и отношением амплитуды напряжения к пределу выносливости на базе $5\cdot10^6$ циклов, а на рис. 2, *б* – зависимости между амплитудой напряжения и числом циклов до момента образования микротрещин для образцов диаметром 8 мм.

Значение показателя степени r = 6,03 для стали 10Х18Н10Т, r = 5,66 для 40Х после нормализации и r = 6,45 для 40Х после закалки и высокого отпуска (рис. 2, *а*). Соответственно, значение m = 19,13; 17,45 и 19,47 (рис. 2, б). Из соотношения $pr = m - 1$ значения p = 3,01; 2, 91 и 2,86, сопоставимые со значениями p для сталей Ст3 и 09Г2Т, полученными другим способом и при большем повреждении материала.

При анализе усталостной прочности сварных соединений желательно оценить раздельно влияние технологии и конструкции. Усталостная трещина в сварных соединениях, как правило, образуется вблизи границы зоны термического влияния сварки. Кроме конструктивного концентратора здесь есть остаточные напряжения. Поэтому полученные по данным эксперимента расчётные значения $\alpha_{\sigma-эк} \approx K_\sigma + \varepsilon_{пл}/\varepsilon_к$ при наличии остаточных напряжений должны зависеть от уровня переменного напряжения.

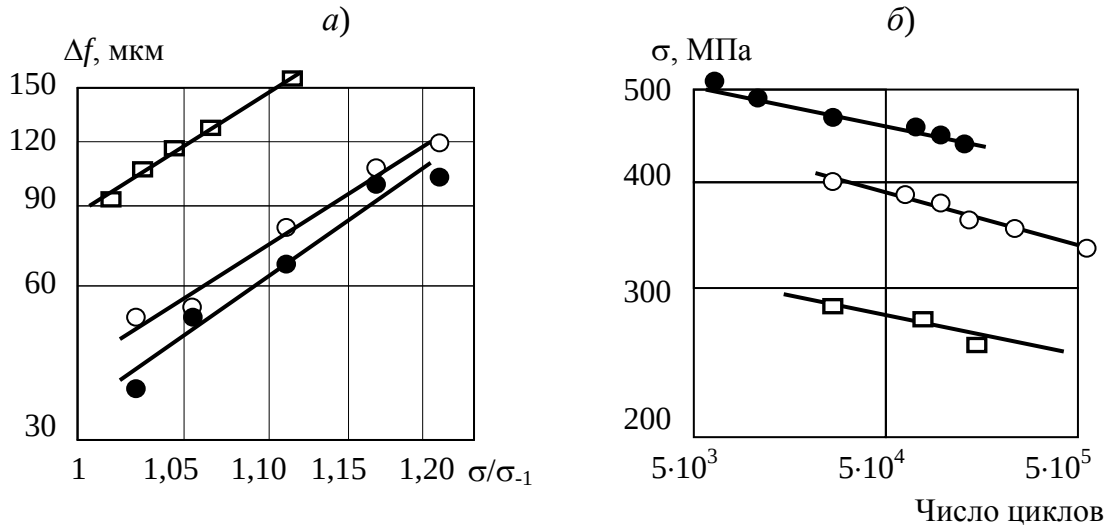


Рис. 2. Зависимости

а – приращения прогиба образца Δf от σ/σ_{-1};

б – числа циклов до момента обнаружения микротрещин:

□ – сталь 10Х18Н10Т; ● – сталь 40Х (улучшение);

○ – сталь 40Х (нормализация)

Испытания, результаты которых использованы при оценке значений условного коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{\sigma-эк}$(таблица 2), были проведены сотрудниками лаборатории Подъёмно-транспортных машин Санкт-Петербургского политехнического университета по договорам с промышленными предприятиями. Как и следовало ожидать, чем выше амплитуда напряжений и, соответственно, больше пластическая деформация материала в зоне сварного шва, тем меньше влияние остаточных напряжений на сопротивление усталостному повреждению и меньше расчётное значение $\alpha_{\sigma-эк}$ (серия I, III, VI). Частичное снятие остаточных напряжений и уменьшение концентрации напряжений при подварке корня сварного шва способствует меньшему изменению значения $\alpha_{\sigma-эк}$ (серия II, IV). При практически полном снятии остаточных напряжений высоким отпуском значение $\alpha_{\sigma-эк}$ сварного соединения не зависит от амплитуды переменного напряжения (серия V), это значение можно считать равным α_{σ}.

Снижение затрат на проведение испытаний элементов металлоконструкции с целью отбора наиболее рациональных по сопротивлению усталостному повреждению достигается благодаря тому, что по результатам испытаний плоских образцов можно оценить значения $\varepsilon_{пл}$ данного материала при различных напряжениях и в дальнейшем использовать их для оценки влияние исследуемых факторов без экспериментального определения остаточных напряжений. Учитывая некоторую неопределённость оценки значения эквивалентной пластической деформации в основании концентратора, данный подход можно использовать для сравнительной оценки и первичном отборе вариантов конструкции и технологии.

Таблица 2

Значения $\alpha_{\sigma-эк}$ сварных элементов металлоконструкций

Серия, материал, образец	N, 10^{-6}	$\sigma_к$, МПа	$\varepsilon_к$, 10^5	$K_\sigma = \sigma/\sigma_к$	$\alpha_{\sigma-эк}$
I. Сталь Ст. 3. Тавровое соединение без разделки кромок под сварку, с неполным проваром корня сварного шва	0,1	117,9	59	1,92	3,49
	0,5	71,6	35,8	2,59	4,31
	1,0	60,8	30,4	2,82	4,50
	2,0	49	24,5	3,22	4,94
II. Сталь Ст. 3. Тавровое соединение с разделкой кромок под сварку и подваркой корня сварного шва	0,1	145,2	72,6	1,56	2,81
	0,5	107,9	54	1,72	2,75
	1,0	94,2	47,1	1,82	2,88
	2,0	84,4	42,2	1,87	2,78
III. Сталь 09Г2Т. Образец с двумя продольными рёбрами на противоположных плоскостях	0,1	160	80	1,69	2,82
	0,5	78,5	39,3	2,65	4,07
	1,0	60	30	3,1	4,76
	2,0	45,1	22,5	3,68	5,38
IV. Сталь 09Г2Т. Образец с двумя продольными рёбрами на противоположных плоскостях и с механической обработкой сварного шва	0,1	179,5	89,8	1,51	2,52
	0,5	117,7	58,9	1,77	2,72
	1,0	98,1	49	1,89	2,90
	2,0	82,4	41,2	2,01	2,94
V. Сталь 09Г2Т. Образец с двумя продольными рёбрами на противоположных плоскостях и высоким отпуском после сварки	0,1	176,6	88,3	1,53	2,56
	0,5	127,5	63,8	1,63	2,50
	1,0	112,8	56,4	1,65	2,53
	2,0	98	49	1,66	2,44
VI. Сталь 09Г2Т. Образец с двумя поперечными рёбрами на противоположных плоскостях с разделкой кромок под сварку	0,1	184,4	92,2	1,47	2,45
	0,5	118,7	59,4	1,75	2,69
	1,0	95,2	47,6	1,95	2,99
	2,0	78,5	39,2	2,11	3,09

Выводы

1. На основе предположения о суперпозиции фононов, возникающих при скольжении дислокаций, предложена обобщённая зависимость числа циклов до момента появления повреждений металлов, переменного напряжения и циклической пластической деформации в области ограниченной усталостной выносливости при симметричном цикле растяжения-сжатия.

2. Теоретически определены значения амплитуды пластической деформации, соответствующей образованию вакансий и субмикротрещин в результате суперпозиции фононов при скольжении дислокаций.

3. Предложен способ оценки значений эквивалентной циклической пластической деформации по результатам сравнительных испытаний плоских образцов без концентратора и с концентратором.

4. Показана возможность сравнительной оценки различных вариантов на примере сварных элементов металлоконструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. О полной кривой усталости // Заводская лаборатория, 1995. –№ 5. – С.33-34.
2. Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Troshchenko V.T. Evolution of ideas on fatigue of metals by volume loading and friction // Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября - 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / Ред.колл.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. Минск: БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 77-84.
3. Феng Р.Ч., Руй Ж.Й., Жанг П.Т., Ян Ч.Ф., Йи С.Ф. Усовершенствованный метод оценки усталостной долговечности TiAl сплавов //Проблемы прочности, 2014. – №2 (428). – С.37-44.
4. Рейсленд Дж. Физика фононов / Пер. с анг. Под ред. Г.С. Жданова. М.: Мир, 1975. – 365 с.
5. Журков С. Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твёрдых тел // Доклад АН СССР, 1978. – Т.239. – №6. – С. 1316- 1319.
6. Петров В.А. Тепловые флуктуации как генератор зародышевых трещин//Физика прочности и пластичности. Л., 1986. – С. 11-17.
7. Жуков В.А. Квантовомеханический подход к анализу явлений при деформировании и разрушении металлов// Металлы, 1994. – №6. – С. 93-97.
8. Гуревич В.Л. Кинетика фононных систем. М.: Наука, 1980. – 400 С.
9. Терентьев В.Ф. Стадийность процесса усталостного разрушения металлических материалов // Металлы, 1996. - №6. – С. 14 -20.
10. В. Эбелинг. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур / Пер. с нем. Под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Мир, 1979. – 279 с.
11. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
12. Виноградова Н.В. Исследование кинетики усталостного разрушения сталей. Диссертация на соискание к.т.н. Л.: ЛПИ им. М.И. Калинина, 1972. – 201 с.

V.A. Zhukov

DISLOCATION-PHONON MECHANISM AND INTERPOLATION THE DEPENDENCE OF FATIGUE DAMAGE STRUCTURAL STEELS

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Based on the model of the superposition of phonons the dependence between the amplitude of the stress, equivalent plastic strain and the number of cycle in fatigue damage is obtained. The availability of this approach in the comparative evaluation of the various options is demonstrated in the example welded metal elements.

Key words: superposition of phonons, a fatigue damage, equivalent cyclic plastic deformation, dislocation.

REFERENCES

[1] Sosnovskij L.A., Mahutov N.A. O polnoj krivoj ustalosti // Zavodskaya laboratoriya, 1995. № 5. Pp.33-34.
[2] Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A., Troshchenko V.T. Evolution of ideas on fatigue of metals by volume loading and friction // Tr. VI-go Mezhdunarodnogo simpoziuma po tribofatike (ISTF 2010), 25 oktyabrya - 1 noyabrya 2010 g., Minsk (Belarus') / Red.koll.: M.A. ZHuravkov (pred.) [i dr]. Minsk: BGU, 2010. Vol. 1. Pp. 77-84.
[3] Feng R.CH., Ruj ZH.J., ZHang P.T., YAn CH.F., Ji S.F. Usovershenstvovannyj metod ocenki ustalostnoj dolgovechnosti TiAl spla-vov //Problemy prochnosti, 2014. №2 (428). Pp.37-44.
[4] Rejslend Dzh. Fizika fononov / Per. s ang. Pod red. G.S. ZHda-nova. Moscow. Mir, 1975. 365p.
[5] ZHurkov S. N., Petrov V.A. O fizicheskih osnovah temperaturno-vremennoj zavisimosti prochnosti tvyordyh tel // Doklad AN SSSR, 1978. Vol. 239. №6. Pp. 1316- 1319.
[6] Petrov V.A. Teplovye fluktuacii kak generator zarodyshevyh treshchin//Fizika prochnosti i plastichnosti. Leningrad. 1986. Pp. 11-17.
[7] ZHukov V.A. Kvantovomekhanicheskij podhod k analizu yavlenij pri deformirovanii i razrushenii metallov// Metally, 1994. – №6. – S. 93-97.
[8] Gurevich V.L. Kinetika fononnyh sistem. Moscow. Nauka, 1980. – 400 s.
[9] Terent'ev V.F. Stadijnost' processa ustalostnogo razrusheniya metallicheskih materialov // Metally, 1996. - №6. – S. 14 -20.
[10] V. EHbeling. Obrazovanie struktur pri neobratimyh proces-sah: Vvedenie v teoriyu dissipativnyh struktur / Per. s nem. Pod red. YU.L. Klimontovicha. Moscow. Mir, 1979. – 279 s.
[11] Normy raschyota na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh ehnergeticheskih ustanovok (PNAEH G-7-002-86). Moscow. EHnergoatomizdat, 1989. 525 p.
[12] Vinogradova N.V. Issledovanie kinetiki ustalostnogo razru-sheniya stalej. Dissertaciya na soiskanie k.t.n. L.: LPI im. M.I. Kalinina, 1972. – 201 p.

УДК 539.3; DOI 10.1872/MMF-2016-43

Т. В. Зиновьева

РАСЧЕТ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ МЕРИДИАНОМ

Татьяна Владимировна Зиновьева, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7770,
E-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com

Аннотация

Получена система уравнений и ее численное решение для вынужденных колебаний оболочек вращения с произвольным меридианом. Использован вариант классической теории оболочек, построенный на основе аналитической механики Лагранжа. Для оболочек вращения с различным меридианом методом конечных разностей определены амплитуды и формы колебаний.

Ключевые слова: упругие оболочки, вынужденные колебания, метод конечных разностей.

Расчеты колебаний тонкостенных конструкций – актуальная задача современного машиностроения; форма многих технических объектов, испытывающих динамическую нагрузку, представляет собой оболочку вращения, например, корпус парогенератора или турбины энергетической установки, фюзеляж самолета, трубопровод, цистерны и пр. Интерес представляет определение амплитуды и формы колебаний таких оболочек под действием заданных сил.

Обычно полную систему уравнений для оболочек получают из уравнений трехмерной теории упругости, вводя те или иные упрощающие допущения, это привело к возникновению различных теорий оболочек [2-4,7,9,11,12]. Однако использование прямого подхода к оболочкам как к деформируемым поверхностям и использование современных аналитических технологий позволяет построить точную теорию.

В работе использован вариант классической теории оболочек как поверхностей с материальными нормалями, построенный на основе механики Лагранжа с использованием принципа виртуальной работы [5,6,14,15].

Получена система уравнений и ее численное решение для вынужденных колебаний оболочек вращения. Представленные результаты обобщают исследования, проведенные в работе [8], где были рассмотрены расчеты статики оболочек вращения под действием осесимметричных нагрузок.

1. Уравнения теории тонких оболочек

Оболочка рассматривается как материальная поверхность, частицы которой обладают пятью степенями свободы: тремя трансляциями и двумя поворотами. Движение определяется вектором малых перемещений $\underline{u}$ и вектором малого поворота $\underline{\vartheta}$ в касательной плоскости. Для удобства введем вектор изменения нормали к оболочке: $\underline{\varphi} \equiv \underline{\vartheta} \times \underline{n} = \dot{\underline{n}}$ (точка означает малое приращение при деформации). По выражению работы внешнего распределенного момента вводится соответствующая $\underline{\varphi}$ обобщенная сила: $\underline{m} \cdot \underline{\vartheta} = \underline{m}^{\times} \cdot \underline{\varphi}, \quad \underline{m}^{\times} \equiv \underline{m} \times \underline{n}$.

Деформация поверхности может быть определена тензорами

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \left(\nabla \underline{u}\right)_{\perp}^{S}, \ \underline{\underline{\kappa}} = -\left(\nabla \underline{\varphi}\right)_{\perp} + \underline{\underline{b}} \cdot \nabla \underline{u}^{T}, \ \left(\underline{\underline{b}} \equiv -\nabla \underline{n}\right). \tag{1}$$

Здесь и далее $(...)_{\perp}$ обозначает составляющую тензора в касательной плоскости; значки $(...)^{S}, (...)^{T}$ указывают на симметризацию и транспонирование. Согласно кинематической гипотезе Кирхгофа, поворот связан с перемещением

$$\underline{\varphi} = -\nabla \underline{u} \cdot \underline{n} \tag{2}$$

Принцип виртуальной работы позволяет вывести всю систему уравнений, характеристики внутренних усилий в оболочке вводятся как множители Лагранжа: $\underline{\underline{\tau}}$ и $\underline{\underline{\mu}}$ – симметричные тензоры напряжений и моментов, $\underline{Q}$ – вектор перерезывающей силы; все они лежат в касательной плоскости. Из вариационной постановки следуют уравнения баланса сил и моментов:

$$\nabla \cdot \left(\underline{\underline{\tau}} + \underline{\underline{\mu}} \cdot \underline{\underline{b}} + \underline{Q}\underline{n}\right) + \underline{q} = 0, \quad \left(\nabla \cdot \underline{\underline{\mu}}\right)_{\perp} + \underline{Q} = \underline{m}^{\times}, \tag{3}$$

и граничные условия на контуре в общем виде:

$$\left[\underline{P}^{0} - \underline{\nu} \cdot \left(\underline{\underline{T}} + \underline{Q}\underline{n}\right) + \partial_{l}\left(\underline{A} \cdot \underline{l}\underline{n}\right)\right] \cdot \delta \underline{u} - \underline{A} \cdot \underline{\nu}\underline{n} \cdot \partial_{\nu} \delta \underline{u} = 0, \underline{A} \equiv \underline{M}^{0} \times \underline{n} + \underline{\nu} \cdot \underline{\underline{\mu}}, \tag{4}$$

где $\underline{q}$ и $\underline{m}^{\times}$ – внешняя распределенная нагрузка и момент на поверхности, $\underline{P}^{0}$ и $\underline{M}^{0}$ – на контуре. Всего в компонентах имеем пять уравнений равновесия и четыре скалярных условия на контуре оболочки.

На отрезке внутреннего контура длиной dl с нормалью $\underline{\nu}$ действует (со стороны $\underline{\nu}$) сила и момент

$$d\underline{F} = \underline{\nu}\cdot\left(\underline{\underline{T}} + \underline{Q}\underline{n}\right)dl, \quad d\underline{M} = \underline{\nu}\cdot\left(\underline{\underline{\mu}}\times\underline{n}\right)dl\,,\ \left(\underline{\underline{T}} \equiv \underline{\underline{\tau}} + \underline{\underline{\mu}}\cdot\underline{\underline{b}}\right).$$

Для изотропного материала соотношения упругости имеют вид

$$\underline{\underline{\tau}} = C_1\varepsilon\underline{\underline{a}} + C_2\underline{\underline{\varepsilon}}, \quad \underline{\underline{\mu}} = D_1\kappa\underline{\underline{a}} + D_2\underline{\underline{\kappa}}, \tag{5}$$

$$\underline{\underline{a}} \equiv \nabla\underline{r}\,,\ \varepsilon \equiv \mathrm{tr}\left(\underline{\underline{\varepsilon}}\right),\ \kappa \equiv \mathrm{tr}\left(\underline{\underline{\kappa}}\right),$$

$$C_1 = Eh\nu\big/\left(1-\nu^2\right), \quad C_2 = Eh\big/\left(1+\nu\right), \quad D_1 = C_1h^2/12, \quad D_2 = C_2h^2/12\,.$$

Коэффициенты $C_1 - D_2$ взяты как в пластине Кирхгофа; E – модуль упругости материала оболочки, h – ее толщина, ν – коэффициент Пуассона. Соотношений упругости для вектора перерезывающих сил $\underline{Q}$ в классической теории нет, вместо него имеем соотношение (2).

2. Система уравнений для оболочек вращения

Рассмотрим оболочку, поверхность которой образована вращением меридиана вокруг оси x [5]. Меридиан задается зависимостью цилиндрических координат от дуговой координаты: $x = x(s)$, $\rho = \rho(s)$, его положение на поверхности определяется углом θ (Рисунок 1).

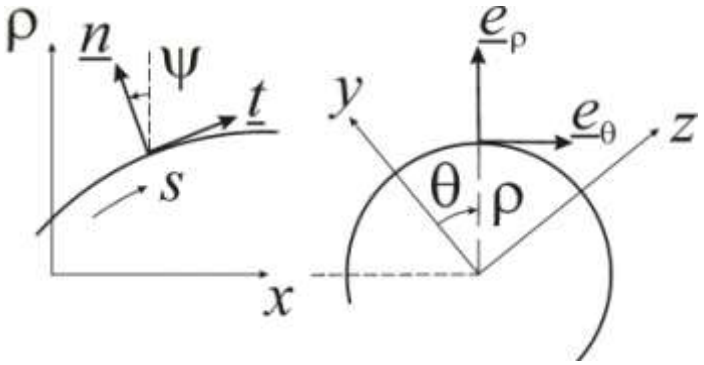


Рис. 1. Поверхность вращения

Радиус-вектор точек поверхности задается равенством

$$\underline{r}\left(\theta, s\right) = x\left(s\right)\underline{i} + \rho\left(s\right)\underline{e}_\rho\left(\theta\right),\ \underline{e}_\rho = \underline{j}\cos\left(\theta\right) + \underline{k}\sin\left(\theta\right),$$

где $\underline{i}$, $\underline{j}$, $\underline{k}$ – орты декартовой системы координат вдоль осей x, y, z соответственно.

Орт касательной к параллели: $\underline{e}_\theta = -\underline{j}\sin\left(\theta\right) + \underline{k}\cos\left(\theta\right) = \underline{e}'_\rho$. Для ортов касательной и нормали к меридиану в его плоскости имеем

$$\underline{t} = \partial\underline{r}/\partial s = x'\left(s\right)\underline{i} + \rho'\left(s\right)\underline{e}_\rho\left(\theta\right),\ x' = \cos\psi,\ \rho' = \sin\psi,$$

$$\partial \underline{t}/\partial s = \omega \underline{n},\ \ \omega \equiv \psi'(s),\ \underline{n} \equiv -\underline{i}\sin\psi + \underline{e}_\rho \cos\psi,$$

здесь ω – кривизна меридиана, а ρ^{-1} – параллели.

Вектор перемещений оболочки имеет три компоненты: $\underline{u} = u_\vartheta \underline{e}_\vartheta + u_t \underline{t} + u_n \underline{n}$. По формулам (1), (2) определим компоненты вектора поворота и тензоров деформации

$$\varepsilon_\theta = \rho^{-1}\left(\partial_\theta u_\theta + u_\rho\right),\ u_\rho \equiv u_t \sin\psi + u_n \cos\psi,\ \varepsilon_t = \partial_s u_t - \omega u_n,$$

$$\varepsilon_{\theta t} = \varepsilon_{t\theta} = \frac{1}{2}\left[\rho^{-1}\left(\partial_\theta u_t - u_\theta \sin\psi\right) + \partial_s u_\theta\right],$$

$$\varphi_\theta = \rho^{-1}\left(u_\theta \cos\psi - \partial_\theta u_n\right),\ \varphi_t = -\omega u_t - \partial_s u_n,$$

$$\kappa_\theta = -\rho^{-1}\left(\partial_\theta \varphi_\theta + \varphi_t \sin\psi\right) - \rho^{-2}\cos\psi\left(\partial_\theta u_\theta + u_\rho\right),\ \kappa_t = \omega\left(\partial_s u_t - \omega u_n\right) - \partial_s \varphi_t,$$

$$\kappa_{\theta t} = -\rho^{-1}\left(\partial_\theta \varphi_t - \varphi_\theta \sin\psi + \partial_s u_\theta \cos\psi\right),\ \ \kappa_{t\theta} = \omega\rho^{-1}\left(\partial_\theta u_t - u_\theta \sin\psi\right) - \partial_s \varphi_\theta. \quad (6)$$

С использованием уравнений (5) запишем соотношения сил и моментов

$$\mu_\theta = \left(D_1 + D_2\right)\kappa_\theta + D_1 \kappa_t,\ \mu_t = \left(D_1 + D_2\right)\kappa_t + D_1 \kappa_\theta,\ \mu_{\theta t} = D_2 \kappa_{\theta t},\ \mu_{t\theta} = D_2 \kappa_{t\theta},$$

$$T_\theta = \left(C_1 + C_2\right)\varepsilon_\theta + C_1 \varepsilon_t - \rho^{-1}\mu_\theta \cos\psi,\ T_t = \left(C_1 + C_2\right)\varepsilon_t + C_1 \varepsilon_\theta + \omega\mu_t,$$

$$T_{\theta t} = C_2 \varepsilon_{\theta t} + \omega\mu_{\theta t},\ T_{t\theta} = C_2 \varepsilon_{\theta t} - \rho^{-1}\mu_{t\theta}\cos\psi. \quad (7)$$

Систему в компонентах замыкают уравнения баланса (3)

$$\rho^{-1}\left[\partial_\theta T_\theta + \left(T_{\theta t} + T_{t\theta}\right)\sin\psi\right] + \partial_s T_{t\theta} + \rho^{-1} Q_\theta \cos\psi + q_\theta - \beta \ddot{u}_\theta = 0,$$

$$\rho^{-1}\left[\left(T_t - T_\theta\right)\sin\psi + \partial_\theta T_{\theta t}\right] + \partial_s T_t - \omega Q_t + q_t - \beta \ddot{u}_t = 0,$$

$$-\rho^{-1} T_\theta \cos\psi + \omega T_t + \rho^{-1}\left(\partial_\theta Q_\theta + Q_t \sin\psi\right) + \partial_s Q_t + q_n - \beta \ddot{u}_n = 0,$$

$$\rho^{-1}\left[\partial_\theta \mu_\theta + \left(\mu_{\theta t} + \mu_{t\theta}\right)\sin\psi\right] + \partial_s \mu_{t\theta} + Q_\theta = m_\theta^\times.$$

$$\rho^{-1}\left[\left(\mu_t - \mu_\theta\right)\sin\psi + \partial_\theta \mu_{\theta t}\right] + \partial_s \mu_t + Q_t = m_t^\times, \quad (8)$$

где β – масса оболочки на единицу площади.

Из (4) следуют четыре скалярных условия на контуре оболочки. В случае заделки: $u_\theta = u_t = u_n = 0,\ \ \gamma_\theta \equiv \partial_s u_n = 0$. На свободном контуре с нормалью $\underline{\nu} = \underline{t}$ задается растягивающая сила $T_t = P_t^0$, изгибающий момент $\mu_t = M_\theta^0$ и две комбинации, связывающие крутящий момент с компонентами силы:

$$F_\theta \equiv T_{t\theta} - \rho^{-1}\cos\psi\mu_{t\theta} = P_\theta^0 + \rho^{-1}\cos\psi M_t^0,$$

$$F_n \equiv Q_t - \rho^{-1}\partial_\theta \mu_{t\theta} = P_n^0 + \rho^{-1}\partial_\theta M_t^0.$$

3. Вынужденные колебания

Уравнения (6) – (8) могут быть сведены к системе вида

$$\partial_s Y(\theta,s,t) = f(Y), \quad Y = (u_\theta, u_t, u_n, \gamma_\theta, F_\theta, T_t, F_n, \mu_t)^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

для столбца неизвестных, задаваемых на краях оболочки.

Будем рассматривать вынужденные колебания под действием периодической нагрузки

$$\begin{pmatrix} q_\theta \\ m_\theta^\times \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{q}_\theta(s) \\ \bar{m}_\theta^\times(s) \end{pmatrix} \sin n\theta \sin \Omega t, \quad \begin{pmatrix} q_t \\ q_n \\ m_t^\times \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{q}_t(s) \\ \bar{q}_n(s) \\ \bar{m}_t^\times(s) \end{pmatrix} \cos n\theta \sin \Omega t,$$

где n – целое число, Ω – частота нагрузки. Решение системы (9) ищем в аналогичном виде, u_θ, F_θ пропорциональны $\sin n\theta$, а неизвестные $u_t, u_n, \gamma_\theta, T_t, F_n, \mu_t$ – $\cos n\theta$.

Для амплитуд получим систему

$$\bar{u}_\theta' = \rho^{-1} \sin\psi \bar{u}_\theta + \frac{C_2}{C_2 + 4D_2\rho^{-2}\cos^2\psi} \bar{G},$$

$$\bar{G} \equiv \frac{2}{C_2}\bar{F}_\theta + \rho^{-1} n \bar{u}_t + \frac{4D_2}{C_2}\rho^{-2}\cos\psi\left(-n\omega\bar{u}_t + \rho^{-1} n \sin\psi \bar{u}_n - n\bar{\gamma}_\theta\right),$$

$$\bar{u}_t' = \bar{\varepsilon}_t + \omega\bar{u}_n, \ \bar{\varepsilon}_t = \frac{1}{C_1 + C_2}\left(\bar{T}_t - C_1\bar{\varepsilon}_\theta - \omega\bar{\mu}_t\right), \ \bar{\varepsilon}_\theta = \rho^{-1}\left(n\bar{u}_\theta + \sin\psi\bar{u}_t + \cos\psi\bar{u}_n\right),$$

$$\bar{u}_n' = \bar{\gamma}_\theta, \ \bar{\gamma}_\theta' = -\omega'\bar{u}_t - \omega^2\bar{u}_n - 2\omega\bar{\varepsilon}_t + \bar{\kappa}_t, \ \bar{\kappa}_t = \frac{1}{D_1 + D_2}\left(\bar{\mu}_t - D_1\bar{\kappa}_\theta\right),$$

$$\bar{\kappa}_\theta = -\rho^{-1}\left(n\bar{\varphi}_\theta + \sin\psi\bar{\varphi}_t\right) - \rho^{-2}\cos\psi\left(n\bar{u}_\theta + \sin\psi\bar{u}_t + \cos\psi\bar{u}_n\right),$$

$$\bar{\varphi}_\theta = \rho^{-1}\left(\cos\psi\bar{u}_\theta + n\bar{u}_n\right), \ \bar{\varphi}_t = -\omega\bar{u}_t - \bar{\gamma}_\theta,$$

Оставшиеся 4 уравнения следуют из уравнений баланса (8)

$$\bar{F}_\theta' = \rho^{-2}\cos\psi\left[-n\bar{\mu}_\theta + \left(\bar{\mu}_{\theta t} + \bar{\mu}_{t\theta}\right)\sin\psi\right] -$$

$$-\rho^{-1}\left[-n\bar{T}_\theta + \left(\bar{T}_{\theta t} + \bar{F}_\theta - \omega\bar{\mu}_{t\theta}\right)\sin\psi\right] - \bar{q}_\theta - \rho^{-1}\cos\psi\bar{m}_\theta^\times - \beta\Omega^2\bar{u}_\theta,$$

$$\bar{T}_t' = \omega\left(\bar{F}_n + \rho^{-1}n\bar{\mu}_{t\theta}\right) - \rho^{-1}\left[\left(\bar{T}_t - \bar{T}_\theta\right)\sin\psi + n\bar{T}_{\theta t}\right] - \bar{q}_t - \beta\Omega^2\bar{u}_t,$$

$$\bar{F}_n' = \rho^{-2}\sin\psi n\left(\bar{\mu}_{\theta t} + \bar{\mu}_{t\theta}\right) + \rho^{-1}\cos\psi\bar{T}_\theta - \omega\bar{T}_t - \rho^{-1}\sin\psi\bar{F}_n -$$

$$-\rho^{-2}n^2\bar{\mu}_\theta - \bar{q}_n - \rho^{-1}n\bar{m}_\theta^\times - \beta\Omega^2\bar{u}_n,$$

$$\bar{\mu}_t' = -\rho^{-1}\left[\left(\bar{\mu}_t - \bar{\mu}_\theta\right)\sin\psi + n\left(\bar{\mu}_{\theta t} + \bar{\mu}_{t\theta}\right)\right] - \bar{F}_n + \bar{m}_t^\times, \tag{10}$$

коэффициенты в них определяются аналогично с использованием уравнений (6) – (7), здесь они не приводятся по причине их громоздкости.

Заметим, что при $n = 0$ из (10) получим систему для амплитуд осесимметричных колебаний, а при $\Omega = 0$ – уравнения статики оболочки.

Система ОДУ (10) дополняется четырьмя граничными условиями на каждом крае оболочки, либо восемью условиями периодичности для

замкнутой оболочки. Эта краевая задача решается методом конечных разностей на промежутке $s \in [0, L]$. Дифференциальные уравнения аппроксимируется разностными с равномерным шагом $\delta = L / N$; функции $\bar{u}_\theta \ldots \bar{\mu}_t$ непрерывного аргумента s заменяются сеточными функциями $(\bar{u}_\theta)_i \ldots (\bar{\mu}_t)_i \quad (i = 0,..., N)$. Численная схема позволяет вычислить приближенные значения функций в узлах. Функции затем восстанавливается посредством интерполяции.

При аппроксимации системы (10) используется неявная симметричная одношаговая разностная схема, имеющая второй порядок точности [1,10]:

$$\bar{Y}'(s) = \bar{f}(\bar{Y}) \Rightarrow \frac{\bar{Y}_{i+1} - \bar{Y}_i}{\delta} = \frac{\bar{f}_i + \bar{f}_{i+1}}{2}, \ i = 0,..., N, \qquad (11)$$

для этого вводится один дополнительный узел с номером $i = N + 1$, и решение продолжается вне области определения $[0, L]$ еще на один интервал δ справа от границы. Таким образом, неизвестными становятся $8N + 16$ значений.

Разностные уравнения (11) – это система $8(N + 1)$ алгебраических уравнений, которая дополняется разностными аналогами восьми граничных условий в узлах с номерами $i = 0, N$. Всего имеем $8N + 16$ уравнений для такого же количества неизвестных, система может быть решена стандартными алгоритмами. После ее решения значения неизвестных функций в дополнительном узле откидываются и не используются при интерполяции. Изложенная схема была реализована в пакете Mathematica [13].

4. Расчеты оболочек вращения

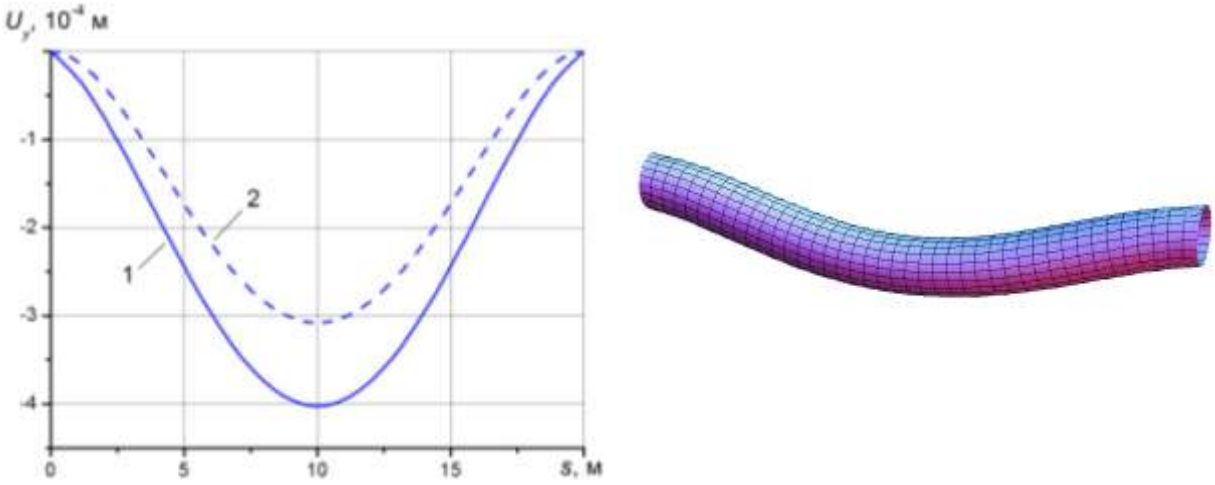
Приведенный алгоритм может быть использован для анализа статики и колебаний оболочек вращения произвольного меридиана, приведем несколько примеров расчета.

Рассмотрим задачу о статическом прогибе оболочки под действием собственного веса при силе тяжести направленной перпендикулярно оси вращения. В этом случае распределенная нагрузка $\underline{q} = -\beta g \underline{j}$, где $g -$ ускорение свободного падения, в компонентах для амплитуд при $n = 1$ имеем $\bar{q}_\theta = \beta g, \bar{q}_t = -\beta g \sin\psi, \bar{q}_n = -\beta g \cos\psi$.

Для круговой цилиндрической оболочки радиуса R и длины l положим $\psi \equiv 0$, меридиан задается равенствами: $x(s) = s$, $\rho(s) = R$.

Расчеты проводились для оболочки радиуса $R = 1$ м, длины $l = 20$ м и толщины $h = 0,01$ м защемленной на обоих краях. Материал оболочки – сталь с модулем упругости $E = 210$ Гпа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,28$, объемной плотностью 7800 кг/м^3.

На рисунке 2*а* показано смещение меридиана оболочки вдоль оси y. Деформированная форма оболочки показана на рисунке 2*б*, при ее построении смещения были промасштабированы.



(*а*) (*б*)

Рис. 2. Перемещение под собственным весом (*а*): 1– цилиндрической оболочки, 2– балки; деформированная форма цилиндрической оболочки (*б*)

Нетрудно посчитать смещение тонкостенного цилиндра под собственным весом, используя балочную модель. Краевая задача

$$u_y^{\mathrm{IV}} + \beta_1 g = 0, \quad u_y(0) = u_y(l) = 0, \quad u_y'(0) = u_y'(l) = 0$$

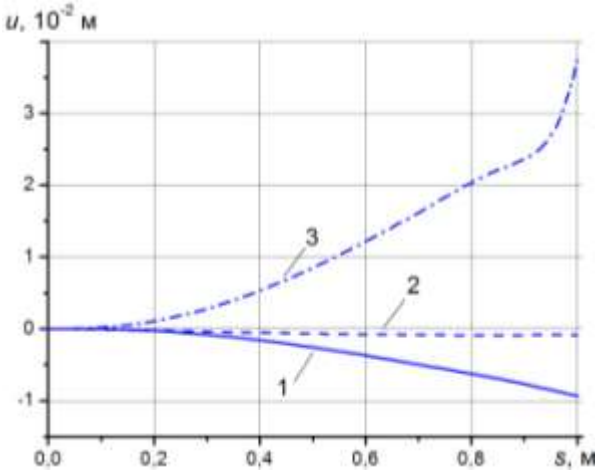
имеет решение

$$u_y(s) = -\frac{\beta_1 g}{24EI}\left(s^4 - 2ls^3 + l^2 s^2\right),$$

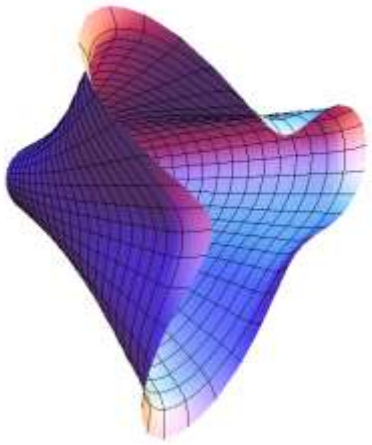
где β_1 – масса балки на единицу длины, EI – жесткость балки на изгиб. Результат представлен на рисунке 2*а*, расхождение перемещения с оболочечной моделью составило 23%. С увеличением относительной длины оболочки это расхождение уменьшается, так для $l = 40$ м оно составило 7%.

Для конической оболочки длины l зададим наклон нормали $\psi \equiv \mathrm{const}$ и меридиан равенствами $x(s) = x_0 + s\cos\psi$, $\rho(s) = y_0 + s\sin\psi$, координаты x_0, y_0 определяют положение начальной точки меридиана.

К оболочке с параметрами $\psi = 20^\circ$, $x_0 = 0$ м, $y_0 = 0{,}1$ м, $l = 1$ м, толщиной $h = 0{,}01$ м, защемленной на одном крае прикладывалось давление $q_n = 1$ МПа, $q_\theta = 0{,}01$ МПа, на краю – распределенная сила $P_t^0 = 2$ МН/м и изгибающий момент $M_\theta^0 = 0{,}1$ МН; материал – сталь с указанными выше свойствами. На рисунке 3 представлены вычисленные перемещения и деформированная форма при $n = 3$ и $\Omega = 100$ рад/сек; на рисунке 4 – усилия и изгибающий момент на внутреннем контуре оболочки.



(*а*)



(*б*)

Рис. 3. Перемещения конической оболочки (*а*): 1 – окружное $\bar{u}_\theta$, 2 – осевое $\bar{u}_t$, 3 – нормальное $\bar{u}_n$; деформированная форма конической оболочки (*б*)

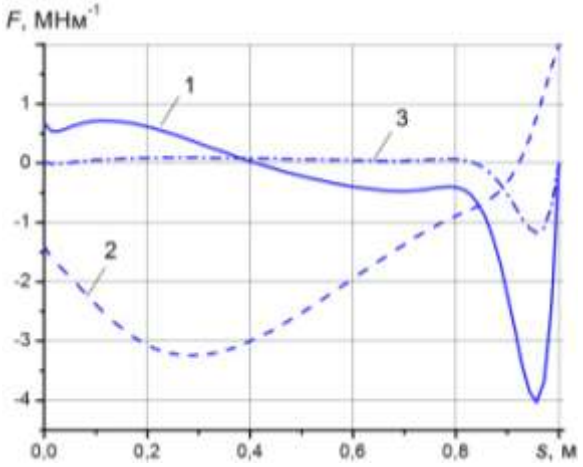
Для оболочек сложной формы целесообразно задавать меридиан массивом координат x и ρ. Тогда, построив интерполяционную функцию, можно вычислить для каждой пары дуговую координату по формуле

$$s(x)=\int_0^x \sqrt{1+(\rho'_x)^2}\,dx,$$

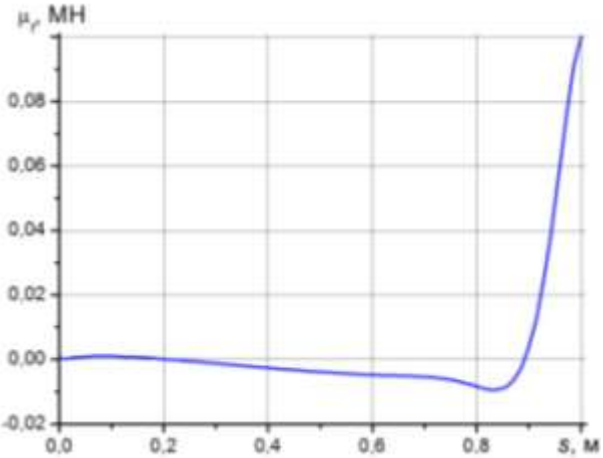
а затем построить интерполяции $x(s)$ и $\rho(s)$.

Эти функции должны быть гладкими, т.к. по ним восстанавливаются остальные коэффициенты системы (10):

$$\cos\psi = x'_s,\ \ \sin\psi=\rho'_s,\ \ \ \omega=\rho''_s\left(x'_s\right)^{-1}.$$



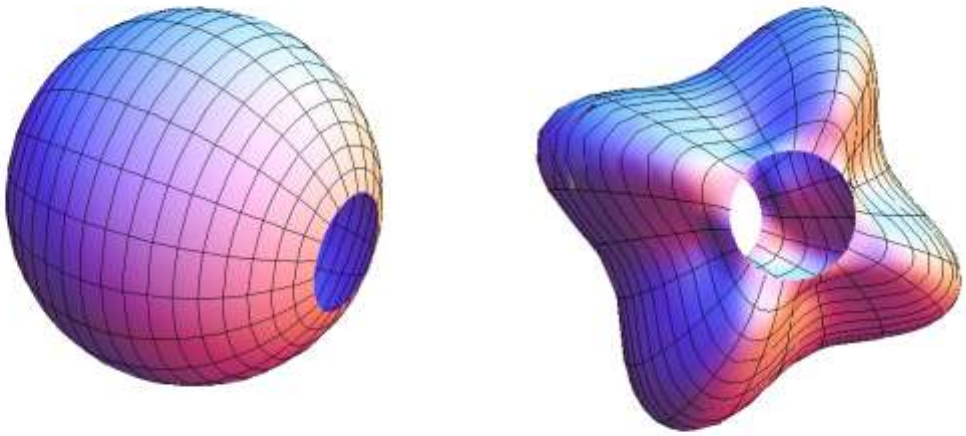
(*а*)



(*б*)

Рис. 4. Усилия в конической оболочке (*а*): 1 – $\bar{F}_\theta$, 2 – $\bar{T}_t$, 3 – $\bar{F}_n$; изгибающий момент $\bar{\mu}_t$ (*б*)

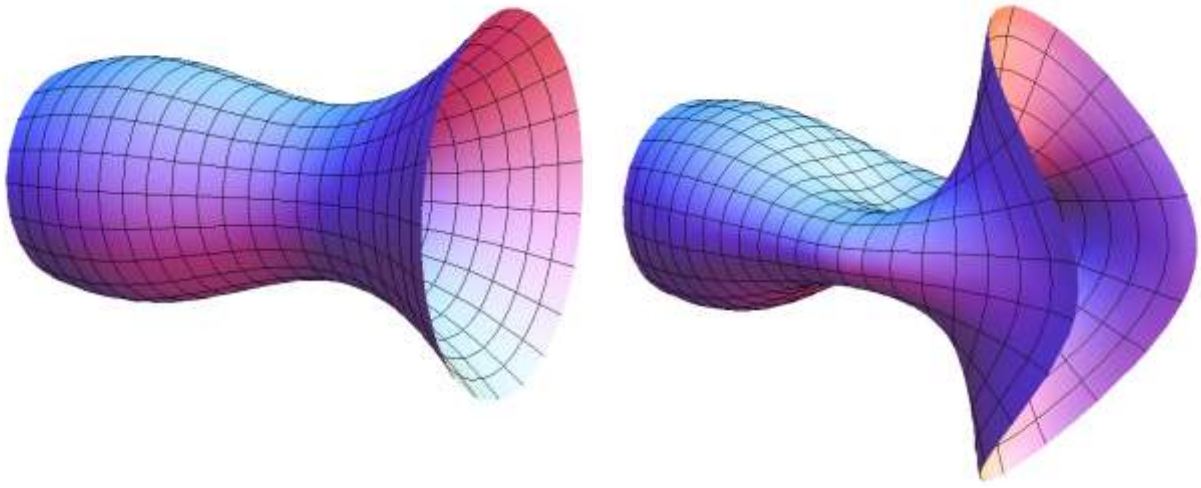
Далее показаны примеры таких расчетов: на рисунке 5*а* форма оболочки в виде усеченной сферы до деформации, на 5*б* – после под действием нормального давления при $n=4$, края оболочки закреплены.



(*а*) (*б*)

Рис. 5. Усеченная сфера до деформации (*а*), после деформации (*б*)

На рисунке 6 показаны формы волнообразной оболочки под осевой распределенной нагрузкой при $n=2$, один край оболочки закреплен, а ко второму приложены осевая и нормальные компоненты силы.



(*а*) (*б*)

Рис. 6. Волнообразная оболочка до деформации (*а*), после деформации (*б*)

Полученные в работе уравнения и разработанный алгоритм расчета колебаний оболочек вращения могут служить основой анализа динамики оболочек вращения под произвольной нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 640 с.
2. Биргер И.А. Стержни, пластинки, оболочки. – М.: Наука, 1992.-392 с.
3. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. –М.: Наука, 1976. – 512 с.
4. Доннелл Л.Г. Балки, пластины и оболочки. – М.: Наука, 1982. – 568 с.
5. Елисеев В.В. Механика упругих тел. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.
6. Елисеев В.В. К нелинейной теории упругих оболочек // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. – № 3. – С. 35-39.
7. Еремеев В.А., Зубов Л.М.: Механика упругих оболочек. М.: Наука, 2008. – 280 с.
8. Зиновьева Т.В. Вычислительная механика упругих оболочек вращения в машиностроительных расчетах. Материалы 2-й международной научно-практической конференции “Современное машиностроение. Наука и образование”. 14-15 июня 2012. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012, С. 335-343.
9. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.М. Линейная теория тонких оболочек. Л., Политехника, 1991. – 656 с.
10. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
11. Чернина В.С. Статика тонкостенных оболочек вращения. – М.: Наука, 1968. – 456 с.
12. Berdichevsky V.L. Variational principles of continuum mechanics. V.2. Applications.–Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 1014 p.
13. Borwein J.M., Skerritt M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica. – Springer, 2012. – Vol. XVI. – 224 p.
14. Eliseev V., Vetyukov Yu. Finite deformation of thin shells in the context of analytical mechanics of material surfaces // Acta Mechanica. – 2010. – Vol. 209, Issue 1-2. – pp. 43-57. doi: 10.1007/s00707-009-0154-7
15. Eliseev V., Vetyukov Yu. Theory of shells as a product of analytical technologies in elastic body mechanics // Shell Structures: Theory and Applications. – 2014. – Vol. 3. – pp. 81-85.

T.V. Zinovieva

COMPUTATION OF FORCED OSCILLATIONS OF SHELLS OF REVOLUTION WITH ARBITRARY MERIDIAN

Dr. Tatiana V. Zinovieva, Ass. Prof.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29,
St-Petersburg, 195251, Russia
Phone: 812-552-7770

Abstract

The system of the equations and its numerical solution for forced oscillations of shells of revolution with arbitrary meridian is obtained. A variant of the classical theory of shells developed on the basis of Lagrangian mechanics is used. The amplitudes and forms of oscillations of shells of revolution with a various meridian are defined by the finite difference method.

Key words: elastic shells, numerical modeling, finite difference method.

REFERENCES

[1] Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.G. Chislennye metody. Moscow. Binom. Laboratoriya znanij, 2011. 640 p. (rus.)
[2] Birger I.A. Sterzhni, plastinki, obolochki. Moscow. Nauka, 1992. 392 p. (rus.)
[3] Goldenvejzer A.L. Teoriya uprugih tonkih obolochek. Moscow. Nauka, 1976. 512 p. (rus.)
[4] Donnell L.G. Balki, plastiny i obolochki. Moscow. Nauka, 1982. 568 p. (rus.)
[5] Eliseev V.V. Mekhanika uprugih tel. St.Petersburg. Izd-vo SPbGPU, 2003. 336 p. (rus.)
[6] Eliseev V.V. K nelinejnoj teorii uprugih obolochek // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU. 2006. № 3. Pp. 35-39. (rus.)
[7] Eremeev V.A., Zubov L.M.: Mekhanika uprugih obolochek. Moscow. Nauka, 2008. 280 p. (rus.)
[8] Zinovieva T.V. Vychislitelnaya mekhanika uprugih obolochek vrashheniya v mashinostroitelnyh raschetah. Materialy 2-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie". 14-15 iyunya 2012. – SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012, pp. 335-343. (rus.)
[9] Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhajlovskij E.M. Linejnaya teoriya tonkih obolochek. L., Politekhnika, 1991. 656 p. (rus.)
[10] Samarskij A.A., Gulin A.V. Chislennye metody. Moscow. Nauka, 1989. 432 p. (rus.)
[11] Chernina V.S. Statika tonkostennyh obolochek vrashheniya. Moscow. Nauka, 1968. 456 p. (rus.)
[12] Berdichevsky V.L. Variational principles of continuum mechanics. V.2. Applications.–Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 1014 p.
[13] Borwein J.M., Skerritt M.B. An introduction to modern mathematical computing: with Mathematica. – Springer, 2012. – Vol. XVI. – 224 p.
[14] Eliseev V., Vetyukov Yu. Finite deformation of thin shells in the context of analytical mechanics of material surfaces // Acta Mechanica. 2010. Vol. 209, Issue 1-2. – pp. 43-57. doi: 10.1007/s00707-009-0154-7
[15] Eliseev V., Vetyukov Yu. Theory of shells as a product of analytical technologies in elastic body mechanics // Shell Structures: Theory and Applications. 2014. Vol. 3. Pp. 81-85.

УДК 621.81 ; DOI 10.1872/MMF-2016-44

А.С. Иванов[1], М.М. Ермолаев[2], С.К. Руднев[3]

РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ НАГРУЖЕНИЯ

[1]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[2]Михаил Михайлович Ермолаев, к.т.н., ассистент;
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
E-mail: mmermolaev@gmail.com

[3]Сергей Кириллович Руднев, аспирант
МГТУ им Н.Э. Баумана, Россия, Москва
E-mail: skrudnev@bk.ru

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 1403

Аннотация

Предложен метод аналитического расчета соединения с натягом, нагруженного осевой и радиальными силами, крутящим и изгибающими моментами, учитывающий податливость вала, втулки и контактного слоя между ними. Приведены формулы для оценки распределения нагрузок на валу, перемещений вала относительно втулки, напряжений и перемещений в контактном слое.

Ключевые слова: соединения с натягом, контактная податливость.

Во многих областях промышленности широкое применение получили соединения с натягом. С натягом устанавливаются внутренние кольца подшипников, зубчатые колеса и шкивы ременных передач.

Широкое использование соединений с натягом [1] в различных конструкциях приводит к тому, что общая методика расчета соединения должна учитывать множество силовых факторов, которые оно может передавать. Фактическая площадь контакта в соединениях с натягом меньше номинальной площади из-за наличия микронеровностей на поверхностях сопрягаемых деталей. Фактическая площадь зависит от давления в стыке. Это обуславливает специфические механические свойства контактного слоя [2]

– области, находящейся около поверхности контакта деталей, толщиной порядка высоты микронеровностей контактирующих поверхностей.

Рассмотрим соединение с натягом, образованное валом и втулкой, нагруженное произвольной системой сил и моментов (рис. 1). В общем случае нагружения, кроме нагрузок, указанных на рис. 1, соединение может передавать радиальную силу и изгибающий момент в горизонтальной плоскости, и все силовые факторы могут быть как сосредоточенные, так и распределенные. В данной работе предлагается методика расчета цилиндрического соединения с натягом в наиболее общем случае нагружения.

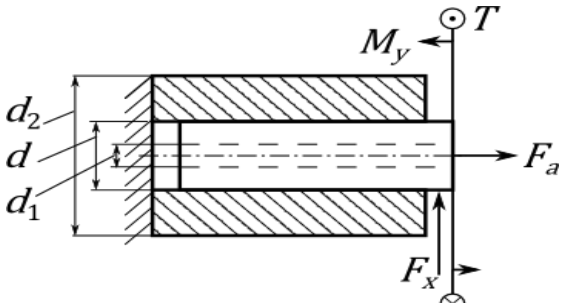


Рис. 1. Соединение с натягом.

Принимаем следующие допущения:

1. Контактный слой деформируется упруго. Такое допущение справедливо для повторных нагружений.
2. Материал деталей деформируется упруго.
3. В контактном слое не происходит локальных проскальзываний. Такое допущение справедливо, если в каждой точке контактного слоя выполняется условие $\tau < pf$, где τ – касательное напряжение в данной точке, p – давление в данной точке, f – коэффициент трения.
4. Не учитываем концентрацию напряжений на концах соединения, возникающую из-за резкого изменения геометрии деталей.
5. При изгибе соединения поперечные сечения вала и втулки сохраняют кольцевую форму, но поворачиваются в горизонтальной и вертикальной плоскостях.
6. Деформации соединения невелики, поэтому перемещением мест приложения нагрузки можно пренебречь. В частности, не происходит потери устойчивости вала и втулки.
7. Давление в каждой точке контактного слоя после запрессовки одинаково, предварительные касательные напряжения в контактном слое отсутствуют. Фактически, предварительные касательные напряжения в контактном слое обуславливаются методом сборки: расчет касательных напряжений в прессовой посадке изложен в работе [3], термической посадки – в работе [4].

8. Изменения толщины вала и втулки, обусловленные действием растягивающих (сжимающих) сил, незначительны. Поэтому они не влияют на сближение в контактном слое.
9. Давление в некоторой точке контактного слоя можно считать линейно зависимым от сближения

После нагружения соединения системой сил и моментов изменится распределение давления и касательных напряжений в контактном слое. Выделим в контактном слое элементарный участок с размерами (dz, dγ) на расстоянии (z, γ) от начала координат. В общем случае, в каждой точке контактного слоя на вал действуют давление p(z, γ), окружная $\tau_\gamma(z, \gamma)$ и осевая $\tau_z(z, \gamma)$ составляющие касательного напряжения (рис. 2).

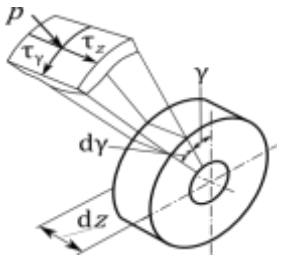


Рис. 2. Нагрузки, действующие на элементарный участок вала со стороны контактного слоя

В работе [5] исследована взаимосвязь между сближением и давлением в контактном слое, предложена формула, выражающая данную взаимосвязь:

$$\delta = Rac_0\varepsilon\sqrt{\frac{p}{E^*}}; \quad (1)$$

где c_0 – безразмерный параметр, зависящий от вида обработки поверхностей и направления следов обработки, для большинства видов обработки c_0=263 [5]; ε = f(Δ – Wmax) – коэффициент влияния масштаба, зависящий от допуска плоскостности Δ, определяемого степенью точности по ГОСТ 24643 – 81 и наибольшим размером контактной поверхности l, а также наибольшей высотой волны $W_{\max}$[5]; $E^* = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ – приведенный модуль упругости, E_1, E_2 – модули упругости сопрягаемых деталей; $Ra = (Ra_1^{\,2} + Ra_2^{\,2})^{0,5}$ – приведенная шероховатость, Ra_1, Ra_2 – средние арифметические высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей. Отметим, что формула (1) предполагает, что коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей составляют 0,3.

Согласно [5] давление в контактном слое перераспределяется незначительно.

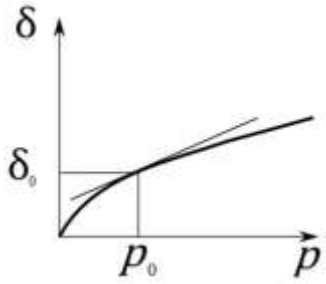


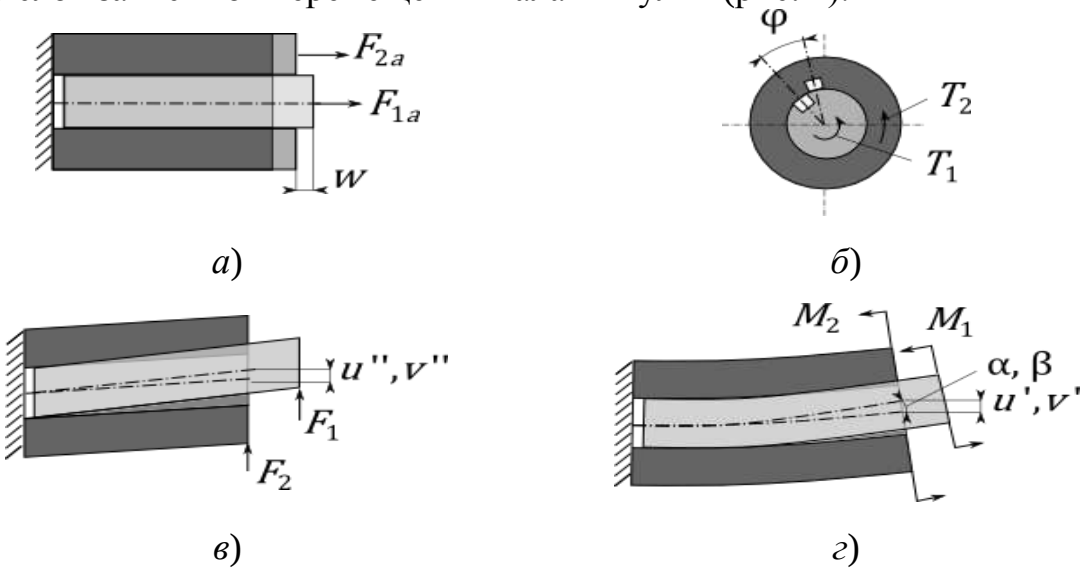
Рис. 3. Линеаризация зависимости $\delta(p)$

Линеаризуем зависимость (1) вокруг некоторого давления p_0 (см. рис. 3). Давления p, окружные τ_γ и осевые τ_z составляющие касательных смещений в контактном слое связаны со сближениями δ и касательными смещениями $\delta_{\tau\gamma}$, $\delta_{\tau z}$:

$$\begin{cases} p(z,\gamma) = \dfrac{\delta(z,\gamma) - \delta_0}{k} + p_0 \\ \tau_z(z,\gamma) = \dfrac{\delta_{\tau z}(z,\gamma)}{k} \\ \tau_\gamma(z,\gamma) = \dfrac{\delta_{\tau\gamma}(z,\gamma)}{k} \end{cases} \quad (2)$$

где k – коэффициент касательной податливости контактного слоя, который можно считать равным коэффициенту нормальной податливости контактного слоя k, получаемый при линеаризации зависимости (1).

Сближение δ и касательные смещения $\delta_{\tau\gamma}$, $\delta_{\gamma z}$ в каждой точке контактного слоя зависят от перемещений вала и втулки (рис. 4).



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 4. Перемещения вала относительно втулки при: растяжении-сжатии (*а*), кручении (*б*), сдвиге (влияние момента условно не показано) (*в*), изгибе (*г*)

Перемещения вала относительно втулки удобно описать шестью функциями: $u(z) = u'(z) + u''(z)$ – прогиб вала относительно втулки по вер-

тикальной оси x, состоящий из прогиба вследствие изгиба в вертикальной плоскости u' (рис. 4, *г*) и прогиба вследствие сдвига в вертикальной плоскости u'' (рис. 4, *в*); $v(z) = v'(z) + v''(z)$ – прогиб вала относительно втулки по горизонтальной оси y, состоящий из прогиба вследствие изгиба в горизонтальной плоскости v' (рис. 4, *г*) и прогиба вследствие сдвига в горизонтальной плоскости v'' (рис. 4, *в*); $\alpha(z)$ – угол поворота поперечных сечений вала относительно втулки вследствие изгиба в горизонтальной плоскости (рис. 4, *г*); $\beta(z)$ – угол поворота поперечных сечений вала относительно втулки вследствие изгиба в вертикальной плоскости (рис. 4, *г*); $\varphi(z)$ – угол закручивания вала относительно втулки (рис. 4, *б*); $w(z)$ – растяжение вала относительно втулки на оси вала (рис. 4, *а*).

Сближение в контактном слое δ зависит от прогибов u, v вала относительно втулки и начального сближения от запрессовки δ_0. Окружная составляющая касательного смещения в контактном слое $\delta_{\tau\gamma}$ зависит от прогибов u, v вала относительно втулки и угла закручивания φ вала относительно втулки. Осевая составляющая касательного смещения в контактном слое $\delta_{\tau z}$ зависит от относительного растяжения (сжатия) волокон вследствие изгиба вала и втулки, а также от удлинения вала w на его оси. Эти зависимости могут быть выражены формулами:

$$\begin{cases} \delta(z,\gamma) = \delta_0 + u(z)\cos\gamma + v(z)\sin\gamma\,; \\ \delta_{\tau\gamma}(z,\gamma) = u(z)\sin\gamma - v(z)\cos\gamma - \dfrac{d}{2}\varphi(z); \\ \delta_{\tau z}(z,\gamma) = \dfrac{d}{2}(\beta(z)\cos\gamma + \alpha(z)\sin\gamma) - w(z). \end{cases} \quad (3)$$

Сопоставляя уравнения описывающие элементарный участок вала и силовые факторы, действующие на него с уравнениями (3), после некоторых преобразований окончательно получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}z^2} - \lambda_M\left(\dfrac{1}{\lambda_F} + \dfrac{\pi d^3}{8k}\right)\alpha(z) + \dfrac{\lambda_M}{\lambda_F}\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z} = G_\alpha(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\beta}{\mathrm{d}z^2} - \lambda_M\left(\dfrac{1}{\lambda_F} + \dfrac{\pi d^3}{8k}\right)\beta(z) + \dfrac{\lambda_M}{\lambda_F}\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z} = G_\beta(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\pi d\lambda_F}{k}u(z) = G_u(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2v}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\pi d\lambda_F}{k}v(z) = G_v(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\pi d\lambda_w}{k}w(z) = G_a(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\pi d^3\lambda_\varphi}{4k}\varphi(z) = G_\varphi(z), \end{cases} \quad (4)$$

где $G_\alpha(z)$, $G_\beta(z)$, $G_u(z)$, $G_v(z)$, $G_a(z)$, $G_\varphi(z)$ – функции, зависящие от внешних нагрузок, действующих на соединение:

$$\begin{cases} G_\alpha(z) = \lambda_{M1}m_{x2}(z) - \lambda_{M2}m_{x1}(z) + \left(\lambda_{M2} - \dfrac{\lambda_M}{\lambda_F}\lambda_{F2}\right)F_{y\Sigma}(z); \\ G_\beta(z) = \lambda_{M1}m_{y2}(z) - \lambda_{M2}m_{y1}(z) + \left(\lambda_{M2} - \dfrac{\lambda_M}{\lambda_F}\lambda_{F2}\right)F_{x\Sigma}(z); \\ G_u(z) = \lambda_{F2}f_{x2}(z) - \lambda_{F1}f_{x1}(z); \\ G_v(z) = \lambda_{F2}f_{y2}(z) - \lambda_{F1}f_{y1}(z); \\ G_a(z) = \lambda_{w2}f_{a2}(z) - \lambda_{w1}f_{a1}(z); \\ G_\varphi(z) = \lambda_{\varphi2}t_2(z) - \lambda_{\varphi1}t_1(z), \end{cases}$$

$\lambda_{\psi1}$, $\lambda_{\psi2}$, λ_ψ – податливости вала, втулки и соединения в целом [6], приводящие к перемещению ψ.

В работе [5] описана система аналогичных дифференциальных уравнений, составленная с учетом нелинейной зависимости $\delta(p)$. В отличие от указанной системы уравнений, решение составленной системы возможно найти аналитически.

Как видно, система (4) разделяется на четыре независимых друг от друга части, соответствующие растяжению-сжатию, кручению и изгибу (со сдвигом) в двух плоскостях вала относительно втулки.

Дифференциальное уравнение кручения имеет решение в виде:

$$\varphi(z) = C_{1\varphi}e^{k_\varphi z} + C_{2\varphi}e^{-k_\varphi z} + s_\varphi(z), \quad (5)$$

где $k_\varphi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi d^3 \lambda_\varphi}{k}}$, $s_\varphi(z)$ – частное решение неоднородного уравнения, зависящее от G_φ. Аналогичное решение задачи о распределении угла закручивания в соединении с натягом получено в работах [7, 8].

Дифференциальное уравнение растяжения сжатия имеет решение в виде:

$$\mathrm{w}(z) = C_{1\mathrm{w}} e^{k_\mathrm{w} z} + C_{2\mathrm{w}} e^{-k_\mathrm{w} z} + s_\mathrm{w}(z), \tag{6}$$

где $k_\mathrm{w} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi d^3 \lambda_\mathrm{w}}{k_{\tau 0}}}$, $s_\mathrm{w}(z)$ – частное решение неоднородного уравнения, зависящее от G_w.

Дифференциальные уравнения сдвига и изгиба должны решаться совместно. Перепишем второе и третье уравнения системы (4) в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2\beta}{\mathrm{d}z^2} - A\beta(z) + B\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z} = 0; \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 u}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}z} - Cu(z) = 0, \end{cases} \tag{7}$$

где $A = \lambda_M \left(\frac{1}{\lambda_F} + \frac{\pi d^3}{8k_{\tau 0}}\right)$, $B = \frac{\lambda_M}{\lambda_F}$, $C = \frac{\pi d \lambda_F}{k_{\tau 0}}$;

перепишем второе и третье уравнения системы (4) в матричной форме: $\delta' = M\,\boldsymbol{\delta}$, где

$$\boldsymbol{\delta}' = \left(\frac{d^2\beta}{dz^2} \quad \frac{d^2u}{dz^2} \quad \frac{d\beta}{dz} \quad \frac{du}{dz}\right)^T; \quad \boldsymbol{\delta} = \left(\frac{d\beta}{dz} \quad \frac{du}{dz} \quad \beta \quad u\right)^T.$$

Матрица M определяется соотношением:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -B & A & 0 \\ 1 & 0 & 0 & C \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В такой форме система дифференциальных уравнений (7) линейна и однородна. Решения ее характеристического уравнения соответствуют собственным значениям k_i (где $i = 1\ldots4$) матрицы M:

$$|M - Ek_i| = \begin{vmatrix} -k & -B & A & 0 \\ 1 & -k & 0 & C \\ 1 & 0 & -k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -k \end{vmatrix} = k^4 - (A - B + C)k^2 + AC = 0, \tag{8}$$

где E – единичная матрица 4x4.

Каждому собственному значению k_i матрицы M будет соответствовать собственный вектор $\boldsymbol{\chi_i}$, определяемый с точностью до произвольного коэффициента из уравнения:

$$(M - Ek_i)\boldsymbol{\chi}_i = \mathbf{0}, \tag{9}$$

где $\mathbf{0}$ – нулевой вектор. Поскольку, согласно уравнению (8), матрица (M – Ek_i) вырожденная, систему уравнений (9) нужно изменить, добавив некоторое условие, накладываемое координаты собственных векторов. Предполагая, что прогиб u вала относительно втулки не может быть равным нулю на всей длине соединения, модифицируем систему (9) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -k & 0 & C \\ 1 & 0 & -k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -k \end{pmatrix} \boldsymbol{\chi_i} = \begin{pmatrix} k_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

Матрица в системе (10) невырожденная при λ_M / $k_{\tau 0} > 0$. Решая систему уравнений (10) получаем собственные векторы матрицы M:

$$\boldsymbol{\chi_i} = \begin{pmatrix} k_i(C - k_i^2) \\ -k_i^2 \\ C - k_i^2 \\ -k_i \end{pmatrix}.$$

В зависимости от соотношения податливостей вала, втулки и контактного слоя характеристическое уравнение (8) может иметь действительные, комплексные и кратные решения. В случае действительных и комплексных корней решения дифференциальных уравнений изгиба и сдвига имеют вид:

$$\begin{aligned} \beta(z) &= (C - k_1^2)(C_1 e^{k_1 z} + C_3 e^{-k_1 z}) + (C - k_2^2)(C_2 e^{k_2 z} + C_4 e^{-k_2 z}) + s_\beta(z); \\ u(z) &= -k_1(C_2 e^{k_1 z} - C_3 e^{-k_1 z}) - k_2(C_2 e^{k_2 z} - C_4 e^{-k_2 z}) + s_\alpha(z). \end{aligned} \tag{11}$$

Решение дифференциальных уравнений сдвига и изгиба в горизонтальной плоскости находится аналогично.

В качестве примера рассмотрим соединение с натягом (см. рис. 1) со следующими параметрами: диаметр вала d = 50 мм, диаметр втулки d_2 = 70 мм, длина соединения L = 50 мм, параметр шероховатости вала и втулки Ra_1 = Ra_2 = 3,2 мкм, модули упругости материалов вала и втулки E_1 = E_2 = 2,1·10^5 МПа.

На указанное соединение действует радиальная сила F_{xL} = 1 000 Н, изгибающий момент M_{yL} = 100 Н·м, крутящий момент T_L = 100 Н·м, F_a = 0 Н.

На рис. 5 приведены эпюры распределения изгибающих моментов на валу, построенные по предлагаемой методике.

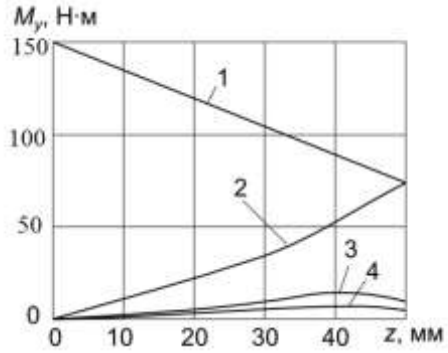


Рис. 5. Распределение изгибающих моментов в соединении с натягом.

Линия *1* соответствует распределению изгибающего момента $M_{y\Sigma}(z)$ по соединению в целом; *2* – распределение изгибающего момента $M_{y1}(z)$ по валу; *3* – распределение изгибающего момента, создаваемого перераспределением давления и окружными составляющими касательных напряжений в контактном слое, по валу; *4* – распределение изгибающего момента $M_{yp}(z)$, создаваемого только перераспределением давления в контактном слое, по валу. Как видно, перераспределением давления воспринимается меньшая часть изгибающего момента. Это подтверждают исследования Н. Хойслера [9].

В качестве примера возможностей расчета по предлагаемой методике, на рис. 6 приведено распределение касательных напряжений по поверхности контактного слоя. Сопоставляя это распределение с распределением максимальных касательных напряжений, допустимых в контактном слое (их величина ограничена произведением давления на коэффициент трения покоя в каждой точке контактного слоя), можно получить оценку формы и размеров областей, в которых возникают локальные проскальзывания и возможен фреттинг [10] при переменной нагрузке.

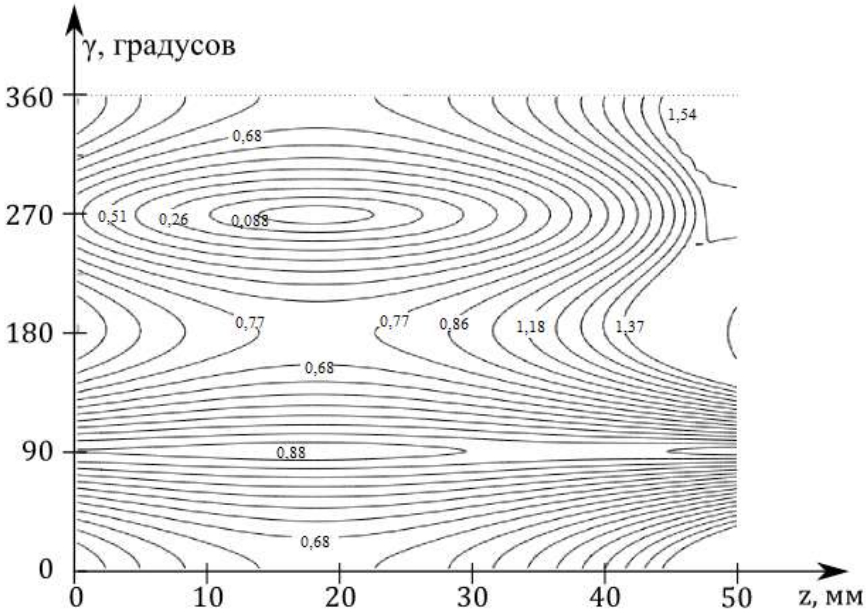


Рис. 6. Распределение касательных напряжений в контактном слое

Выводы

1. При передаче изгибающего момента перераспределение давлений в контактном слое соединения с натягом незначительно. Это позволяет рассчитывать подобные соединения, линеаризуя зависимость (1) между давлением и сближением в контактном слое.
2. При линеаризации зависимости (1) в окрестности начального давления, создаваемого во время запрессовки, без учета концентрации нагрузок на концах соединения, в пределах упругих деформаций задача о распределении нагрузки между валом и втулкой может быть решена аналитически.
3. Перемещения вала относительно втулки в соединении с натягом могут быть формализованы шестью функциями, которые определяются соотношениями (5), (6), (11).
4. Распределение перемещений в контактном слое может быть определено по формулам (3).
5. Распределение напряжений в контактном слое может быть определено по формулам (2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: расчеты, проектирование и изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
2. Максак В.И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. М.: Наука, 1975. 60 с.
3. Воронин М.И. Определение величин сил при продольном смещении деталей // Вестник машиностроения. 1962. №2. С. 69 – 70.
4. Гаффанов Р.Ф. Совершенствование расчета соединения с натягом, собираемого термическим методом: Автореф. дис. … к.т.н. (05.02.02). 2008. 16 с.
5. Ермолаев М. М. Разработка метода расчета неподвижных соединений деталей машин с учетом податливости контактного слоя: Автореф. дис. ... к.т.н. (05.02.02). Москва, 2015. 16 с.
6. Биргер И.А., Мавлютов М.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.
7. Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.
8. Максак В.И., Советченко Б.Ф. Расчет смещений в соединении с натягом при нагружении их крутящим моментом // Машиноведение, 1975. №5. С. 63-68.
9. Häusler N. ZumMechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpfverbindungen // Konstruktion. 1976. 28. № 3. P. 103 − 108.
10. Балацкий Л.Т. Прочность прессовых соединений. Киев: Техніка, 1982. 151 с.

A.S. Ivanov, M.M. Ermolaev, S.K. Rudnev

CALCULATION OF THE CONNECTION WITH TIGHTNESS IN THE GENERAL CASE OF LOADING

all: Moscow State Technical University, Russia

Abstract

The method of analytical calculation of load distribution in the contact layer of compounds with an interference fit, taking into account the effect of axial and radial forces, torque and bending moments.

Key words: connection with tightness, contact compliance

REFERENCES

[1] Grechishhev E.S., Il'jashenko A.A. Soedinenija s natjagom: raschety, proektirovanie i izgotovlenie. M.: Mashinostroenie, 1981. 247 p.
[2] Maksak V.I. Predvaritel'noe smeshhenie i zhestkost' mehanichesko-go kontakta. M.: Nauka, 1975. 60 p.
[3] Voronin M.I. Opredelenie velichin sil pri prodol'nom smeshhe-nii detalej // Vestnik mashinostroenija. 1962. №2. P. 69 – 70.
[4] Gaffanov R.F. Sovershenstvovanie rascheta soedinenija s natjagom, sobiraemogo termicheskim metodom: Avtoref. dis. … k.t.n. (05.02.02). 2008. 16 p.
[5] Ermolaev M. M. Razrabotka metoda rascheta nepodvizhnyh soedinenij detalej mashin s uchetom podatlivosti kontaktnogo sloja: Avtoref. dis. ... k.t.n. (05.02.02). Moscow, 2015. 16 p.
[6] Birger I.A., Mavljutov M.M. Soprotivlenie materialov. M.: Nauka, 1986. 560 p.
[7] Iosilevich G.B. Koncentracija naprjazhenij i deformacij v deta-ljah mashin. M.: Mashinostroenie, 1981. 224 p.
[8] Maksak V.I., Sovetchenko B.F. Raschet smeshhenij v soedinenii s natjagom pri nagruzhenii ih krutjashhim momentom // Mashinovedenie, 1975. №5. P. 63-68.
[9] Häusler N. ZumMechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpfverbindungen // Konstruktion. 1976. 28. № 3. P. 103 − 108.
[10] Balackij L.T. Prochnost' pressovyh soedinenij. Kiev: Tehnika, 1982. 151 p.

УДК 621.833.61; DOI 10.1872/MMF-2016-45

А. С. Иванов[1], М. М. Ермолаев[2], А. В. Чиркин[3], Ю. В. Синицына[4]

РАСЧЕТ ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ САТЕЛЛИТА

[1] Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[2] Михаил Михайлович Ермолаев, к.т.н., ассистент
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
E-mail: mmermolaev@gmail.com

[3] Александр Вадимович Чиркин, ассистент
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
E-mail: alexchick07@gmail.com

[4] Юлия Владимировна Синицына, студент
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
E-mail: J.Sinitcyna@gmail.com

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 1403

Аннотация

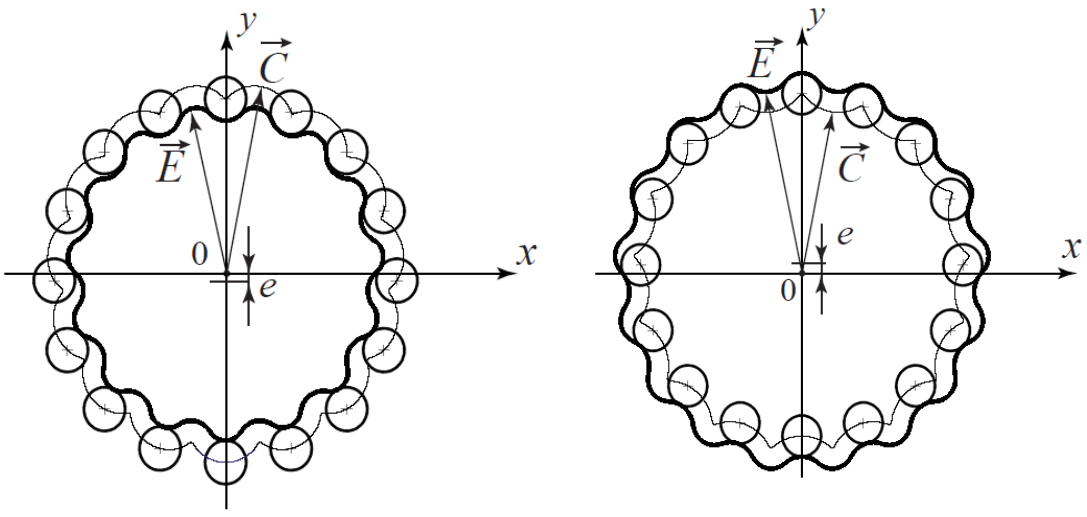
В работе предложен метод расчета нагрузочной способности планетарно-цевочной передачи с учетом упругих деформаций сателлита, контактных деформаций в подшипниках, цевках, пальцах механизма параллельных кривошипов и роликах муфты Ольдгейма. Приведена методика для оценки сил в зацеплении и максимальных напряжений в местах контакта. Приведен пример расчета передачи редуктора типа *KHV* и сравнение результатов с расчетом передачи в предположении абсолютно жесткого сателлита.

Ключевые слова: планетарно-цевочный редуктор, эпициклоидальная передача, гипоциклоидальная передача, метод конечных элементов, механика контактного взаимодействия.

В настоящее время в различных отраслях промышленности применяются планетарно-цевочные передачи [1], отличающиеся компактностью, высокой перегрузочной способностью, низким люфтом, высокой крутильной жесткостью. Эти качества планетарно-цевочных передач обусловлены многопарностью зацепления – одновременно работает более трети числа зубьев колеса (при отсутствии погрешностей изготовления – половина числа зубьев). В связи с этим, планетарно-цевочное зацепление образует статически неопределимую систему, что предъявляет особые требования по точности его изготовления и усложняет силовой расчет передачи.

В работе [1] предложена методика расчета нагрузочной способности планетарно-цевочной передачи в предположении, что контактные деформации в сопряжениях цевка-сателлит значительно превышают упругие деформации деталей редуктора. Однако в современных конструкциях [2] для уменьшения размера редуктора, циклоидальные сателлиты изготавливают с весьма тонкими «стенками» между профилем зацепления и внутренними карманами (являющимися расточками под подшипники и пазами для пропускания элементов несущей конструкции), что делает актуальным учет упругих деформаций сателлита при расчете распределения нагрузки между цевками. В данной работе предложен метод расчета нагрузочной способности планетарно-цевочного зацепления с учетом этих факторов.

Планетарно-цевочные передачи могут быть реализованы на базе эпициклоидального (Рис. 1, *а*) или гипоциклоидального (рис. 1, *б*) зацеплений [1]. В первом случае число зубьев сателлита z_1, как правило, на единицу меньше числа цевок z_2, а обойма с цевками находится снаружи сателлита. Во втором случае число зубьев сателлита, как правило, на единицу больше числа цевок, а обойма находится внутри сателлита.



а *б*

Рис. 1. Эпициклоидальное (*а*) и гипоциклоидальное (*б*) зацепление

Существующие расчеты [2, 3, 4] планетарно-цевочных передач, в основном, посвящены эпициклоидальному зацеплению. В данной работе предлагается обобщенный метод расчета передачи, подходящий как для эпи- так и для гипоциклоидального зацепления. Далее тип передачи определяется параметром s, равным 1 для гипоциклоидального зацепления и -1 для эпициклоидального зацепления. Таким образом, будем полагать, что $z_1 = z_2 + s$.

Геометрия планетарно-цевочной передачи определяется четырьмя параметрами: числом цевок z_2, делительным диаметром обоймы d_2, коэффициентом укорочения λ трохоиды (обобщенное название эпи- и гипоциклоиды), диаметром цевки d_p.

Профиль рабочей поверхности сателлита образован эквидистантой к укороченной эпи- или гипоциклоиде и может быть определен [1] радиус-вектором $\boldsymbol{E}$[1] в системе координат, построенной из центра сателлита, и определяется параметрическим уравнением (1).

$$\mathrm{E}(t) = \mathrm{C}(t) + \frac{d_p}{2}\mathrm{N}(t), \tag{1}$$

где $t = 0\ldots2\pi$ – свободный параметр, $\boldsymbol{C}(t)$ – радиус-вектор трохоиды, определяемый уравнениями (2) [1], $\boldsymbol{N}(t)$ – единичный вектор нормали к трохоиде, определяемый уравнениями (3) [4].

$$\begin{aligned} C_x(t) &= \frac{d_2}{2}\left[\sin(t) - \frac{\lambda}{z_2}\sin(z_2 t)\right]; \\ C_y(t) &= \frac{d_2}{2}\left[\cos(t) + s\frac{\lambda}{z_2}\cos(z_2 t)\right]. \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} N_x(t) &= \frac{s\sin(t) + \lambda\sin(z_2 t)}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda\cos(z_1 t)}}; \\ N_y(t) &= \frac{s\cos(t) - s\lambda\sin(z_2 t)}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda\cos(z_1 t)}}. \end{aligned} \tag{3}$$

Кроме профиля зацепления сателлит имеет ряд отверстий и пазов:

1. Отверстия под подшипники эксцентриковых валов. В передачах KHV это одно отверстие, проходящее через центр сателлита [5], в передачах 2KV их может быть от двух до шести [6]. Для обеспечения компактности редуктора, в эти отверстия целесообразно устанавливать роликовые радиальные подшипники без наружных колец. Диаметр этих отверстий определяется размерами выбранных подшипников.

2. Отверстия под пальцы механизма параллельных кривошипов (только в редукторах типа *KHV*). Диаметр этих отверстий $d_h = d_f + 2e$, где d_f – диаметр пальца механизма параллельных кривошипов.

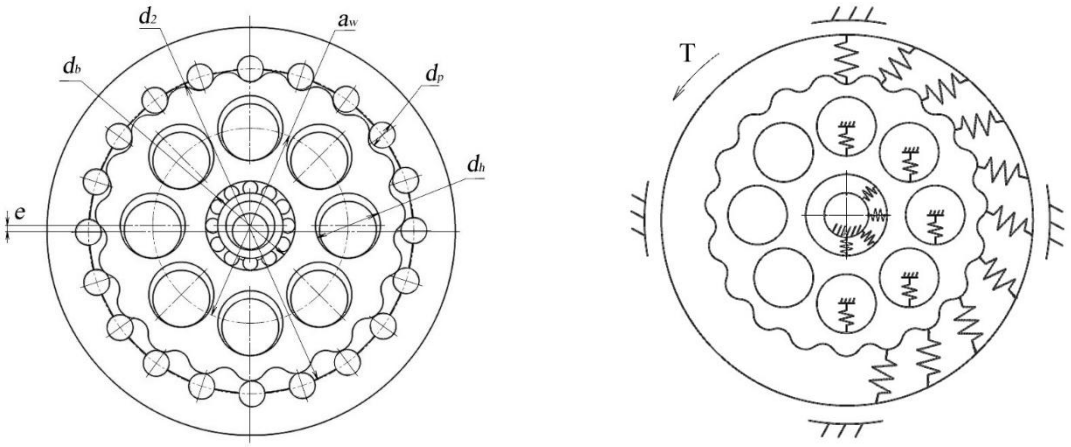
[1] Здесь и далее жирным обозначены векторные величины

3. Пазы для несущей конструкции редуктора, могут быть сложной формы. В редукторах типа 2*KH* их геометрия обычно описана дугами, размеры которых выбираются таким образом, чтобы через них свободно проходили пальцы, соединяющие части водила друг с другом. В редукторах типа *KHV*, при использовании муфты Ольдгейма [7] вместо механизма параллельных кривошипов, пазы имеют плоские поверхности, на которые опираются ролики муфты Ольдгейма.

Для определения сил, действующих на сателлит со стороны цевок и роликов подшипников необходимо решить статически неопределимую задачу. Это значит, что величины сил будут определяться податливостью всех элементов конструкции. Изложенный ниже силовой расчет планетарно-цевочной передачи опирается на следующие допущения:

1. Погрешностями изготовления и сборки планетарно-цевочной передачи пренебрегаем. Зазоры и натяги в передаче отсутствуют.
2. Упругие перемещения в контакте полагаем линейно зависящими от силы.
3. Трением в контакте цевок и сателлита пренебрегаем.
4. Сателлит и места его контакта с цевками, роликами и пальцами предполагаются податливыми, прочие детали редуктора – жесткими.

На рис. 2, *а* приведен эскиз планетарно-цевочной передачи редуктора *KHV*. На рис. 2, *б* приведена его расчетная схема при указанных допущениях. Расчетные схемы планетарно-цевочных передач редукторов других типов могут быть составлены аналогично.



а *б*

Рис. 2. Планетарно-цевочная передача редуктора *KHV* (*а*) и ее расчетная схема (*б*)

Из технологических соображений толщина b_p циклоидального сателлита обычно выбирается постоянной и равной 0,07...0,2 от его

диаметра [2]. Таким образом, при отсутствии перекосов напряженное состояние сателлита можно считать плоским.

Разделим сателлит на конечные элементы, в простейшем случае имеющие форму треугольников и связанные друг с другом в вершинах. Обозначая число вершин n, получим, что у сателлита имеется $2n$ степеней свободы: каждая вершина в результате упругих деформаций может переместиться вдоль осей x, y на величины u_i, v_i соответственно, где $i = 1…n$ – номер вершины. Разбиение на треугольники производим таким образом, чтобы все места контакта сателлита с цевками (роликами, пальцами) попадали в некоторые вершины. В этих точках на сателлит могут действовать некоторые силы $\boldsymbol{F}_i$.

Введем обозначения: $\boldsymbol{\delta} = (u_1, v_1, \ldots u_n, v_n)^{\mathrm{T}}$ – вектор перемещений сателлита, $\boldsymbol{R} = (F_{1x}, F_{1y}, \ldots, F_{nx}, F_{ny})^{\mathrm{T}}$ – вектор внешних сил, действующих на сателлит (равных нулю во всех точках, кроме точек контакта с цевками и пальцами). Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет установить [8, 9] взаимосвязь между векторами $\boldsymbol{\delta}$ и $\boldsymbol{R}$ в форме

$$K\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{R}, \tag{4}$$

где K – матрица жесткости сателлита. Ранг матрицы K равен $2n – 3$, т.е. при отсутствии граничных условий у нагруженного сателлита остается три степени свободы.

Граничные условия имеют вид упругих связей сателлита с неподвижной частью редуктора и с обоймой с цевками. Обойму с цевками будем предполагать жестким телом, которое может поворачиваться вокруг оси редуктора на угол φ под действием крутящего момента. Обозначим $\boldsymbol{\Delta}_i$ – перемещение точек контакта цевок с сателлитов, вызванное упругим перемещением обоймы. Выразим $\boldsymbol{\Delta}_i$ через перемещение и поворот обоймы, считая ее твердым телом:

$$\begin{aligned} \Delta_{ix} &= (E_{ix} + e_x)\varphi; \\ \Delta_{iy} &= \left(E_{iy} + e_y\right)\varphi, \end{aligned} \tag{5}$$

где $\boldsymbol{E}_i$ – радиус-вектор профиля сателлита в местах контакта цевкой в i-м узле сателлита, е – радиус-вектор, направленный из центра сателлита к оси редуктора, длиной, равной эксцентриситету.

Сила F_i, возникающая в контакте цевки с сателлитом, при отсутствии трения направлена по нормали к поверхности контакта:

$$\begin{aligned} R_{ix} &= F_i N_{ix}; \\ R_{iy} &= F_i N_{iy}. \end{aligned} \tag{6}$$

При таком выборе знаков, сила, действующая на сателлит, считается положительной, если она направлена в тело сателлита. Считая силу в

контакте пропорциональной проекции перемещения i-й точки сателлита относительно соответствующей цевки, получим:

$$F_i = -j_p\left[(u_i - \Delta_{ix})N_{ix} + \left(v_i - \Delta_{iy}\right)N_{iy}\right], \tag{7}$$

где $j_p = \pi E^* b_p / 4$ – жесткость в контакте цевка-сателлит [10], E^* - приведенный модуль упругости, определяемый соотношением:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2},$$

где E_1, E_2 – модули упругости материалов сателлита и цевки, μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов сателлита и цевки.

Подставляя (5, 7) в (6), получим соотношения между силами и перемещениями в контакте цевка-сателлит:

$$\begin{aligned} R_{ix} &= -j_p N_{ix}^2 u_i - j_p N_{ix} N_{iy} v_i + j_p [E_i \times N_i]_z N_{ix} \varphi; \\ R_{iy} &= -j_p N_{ix} N_{iy} u_i - j_p N_{iy}^2 v_i + j_p [E_i \times N_i]_z N_{iy} \varphi, \end{aligned} \tag{8}$$

где $[E_i \text{ x } N_i]_z = E_{ix} N_{iy} - E_{iy} N_{ix}$ – проекция векторного произведения E_i и N_i на ось сателлита.

Как видно из выражений (8), к вектору перемещений **δ** следует добавить еще одну переменную – угол поворота обоймы относительно оси редуктора вследствие упругих деформаций.

Недостающее, в таком случае, уравнение системы (4) представляет собой условие равновесия обоймы под действием сил R_{ix}, R_{iy} в цевках. Момент T_i, создаваемый силой в i-й цевке, составит $T_i = R_{ix} E_{iy} - R_{iy} E_{ix}$. Подставляя (8), получим условие равновесия обоймы в виде:

$$\begin{aligned} T = -j_p \sum_{i=1}^{m} [E_i \times N_i]_z N_{ix} u_i - j_p \sum_{i=1}^{m} [E_i \times N_i]_z N_{iy} v_i \\ + j_p \sum_{j=1}^{m} [E_i \times N_i]_z^2 \varphi, \end{aligned} \tag{9}$$

где m – число цевок, участвующих в зацеплении, T – крутящий момент, передаваемый одним сателлитом.

Сила, возникающая в контакте сателлита с роликом подшипника, муфты Ольдгейма или пальцем механизма параллельных кривошипов, определяется соотношением, аналогичным формуле (7):

$$F_i = -j_b\left[u_i N_{ix} + v_i N_{iy}\right], \qquad (10)$$

где $j_b = j_p / 2$ – жесткость в контакте сателлит-ролик, которая в два раза меньше жесткость контакта сателлита с цевкой из-за того, что ролик передает нагрузку на корпус через две области контакта. В контакте с пальцем в формулу (10) следует подставлять жесткость j_p. Параметры N_{ix}, N_{iy} в формуле (10) определяются как нормали к поверхности сателлита в точке ее контакта с роликом (пальцем), направленные в тело сателлита.

Подставляя (10) в (6), получим соотношения между силами и перемещениями в контакте цевка-ролик (цевка-палец):

$$\begin{aligned} R_{ix} &= -j_b N_{ix}^2 u_i - j_b N_{ix} N_{iy} v_i; \\ R_{iy} &= -j_b N_{ix} N_{iy} u_i - j_b N_{iy}^2 v_i, \end{aligned} \qquad (11)$$

Выражения (8, 9, 11) позволяют дополнить матрицу жесткости таким образом, чтобы ее можно было решить относительно вектора перемещений. После этого силы в контакте могут быть определены по формулам (7, 10). В случае, если сила оказывается отрицательной, указанную цевку (ролик, палец) следует исключить из общей системы и произвести расчет заново. Отметим, что матрица $\boldsymbol{K}$ симметрична, положительно определена и сильно разрежена, что ускоряет расчет системы (4).

Крутильная жесткость передачи может быть определена как отношение крутящего момента к углу поворота обоймы под действием упругих деформаций. Для определения крутильной жесткости редуктора в целом, крутильную жесткость передачи следует умножить на число сателлитов.

Критериями отказа зубьев планетарно-цевочной передачи можно считать контактные разрушения сателлита, цевок, роликов подшипников и муфте Ольдгейма, пальцев механизма параллельных кривошипов. Условие контактной прочности может быть записано в виде $\sigma_{Hmax} < [\sigma_H]$, где σ_{Hmax} – максимальное напряжение в контакте наиболее нагруженной цевки (ролика, пальца) с сателлитом, $[\sigma_H]$ – максимально допустимое напряжение в контакте. Контактное напряжение может быть определено по формуле Герца для сопряжения с начальным контактом по линии:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{FE^*}{\pi b_p R}}, \qquad (12)$$

где F – сила, действующая со стороны цевки (ролика, пальца) на сателлит, R – приведенный радиус кривизны профиля сателлита и цевки (ролика, пальца).

Приведенный радиус кривизны в контакте цевка-сателлит может быть определен [1] по формуле:

$$R(t) = \frac{sd_p^2}{4R_C(t)} + \frac{d_p}{2}, \tag{13}$$

где $R_C(t)$ – радиус кривизны трохоиды, определяемый соотношением:

$$R_C(t) = \frac{d_2}{2} \frac{\left(1 + \lambda^2 - 2\lambda\cos(z_1 t)\right)^{3/2}}{1 - sz_2\lambda^2 + \lambda(sz_2 - 1)\cos(z_1 t)}.$$

Приведенный радиус кривизны в контакте палец-сателлит определяется выражением:

$$R = \frac{d_h d_f}{2(d_h + d_f)}, \tag{14}$$

где d_h – диаметр отверстия в сателлите, $d_f = d_h - 2e$ – диаметр пальца механизма параллельных кривошипов. Для роликов подшипников, установленных на эксцентриковые валы, приведенный радиус кривизны определяется также по формуле (6), однако отметим, что прочности подшипников в большей степени зависит от контакта ролика с внутренним кольцом подшипника.

Для контакта роликов муфты Ольдгейма с сателлитом можно принять $R = d_f / 2$, где d_f – диаметр ролика.

В качестве примера использования предлагаемой методики рассмотрим расчет планетарно-цевочной передачи редуктора типа *KHV* (см. рис. 2, *а*) со следующими параметрами: d_2 = 200 мм, z_2 = 20, e = 3,5 мм, d_p = 16 мм, bp = 20 мм, диаметр отверстия для подшипника d_b = 53,5 мм, диаметр внутреннего кольца подшипника d_{b0} = 25 мм, диаметр отверстия под палец механизма параллельных кривошипов d_h = 40 мм, диаметр окружности, на которой расположены пальцы a_w = 120 мм, количество пальцев n_h = 8.

В работе [1] приведена формула определения максимального крутящего момента, передаваемого одним сателлитом, в предположении, что сателлит абсолютно жесткий:

$$[T] = \frac{\pi}{16 \cdot 10^3} \frac{[\sigma_H]^2}{E^*} z_1 \lambda b_p d_p \left[d_2 - d_p \frac{z_1}{\sqrt{1-\lambda^2}} \left(\frac{z_2^2 - 1}{3z_1^2} \right)^{3/2} \right]. \tag{15}$$

Принимая материалы сателлита и цевок – сталь, задаемся их параметрами: $E_1 = E_2 = 2{,}15 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_1 = \mu_2 = 0{,}3$, $[\sigma_H]$ = 1000 МПа, получим оценку максимального момента $[T]$ = 760 Н·м. Произведем расчет

передачи по предлагаемой методике, приняв $T = [T]$. Результаты расчета приведены на рис. 3. Конечные элементы (треугольники) закрашены в цвет, соответствующий среднему эквивалентному напряжению в них. Вектора сил закрашены в цвет, соответствующий максимальному контактному напряжению в местах сопряжения (для мест контакта с роликами подшипника рассчитаны и изображены напряжения, возникающие на внутреннем кольце подшипника).

Максимальное контактное напряжение составляет 1400 МПа, что на 40 % больше допустимого. Кроме того, из рис. 3 видно, что максимальное напряжение возникает в восьмой цевке, считая по часовой стрелке от верхней. Это также противоречит результатам расчета, не учитывающего податливость сателлита, в котором наиболее нагруженной оказывалась цевка, расположенная напротив полюса зацепления (пятая, если считать указанным образом). Как видно, податливость самого сателлита существенно влияет на распределение нагрузки между цевками.

Максимальное эквивалентное напряжение в сателлите составляет 170 МПа, что позволяет считать его прочность обеспеченной.

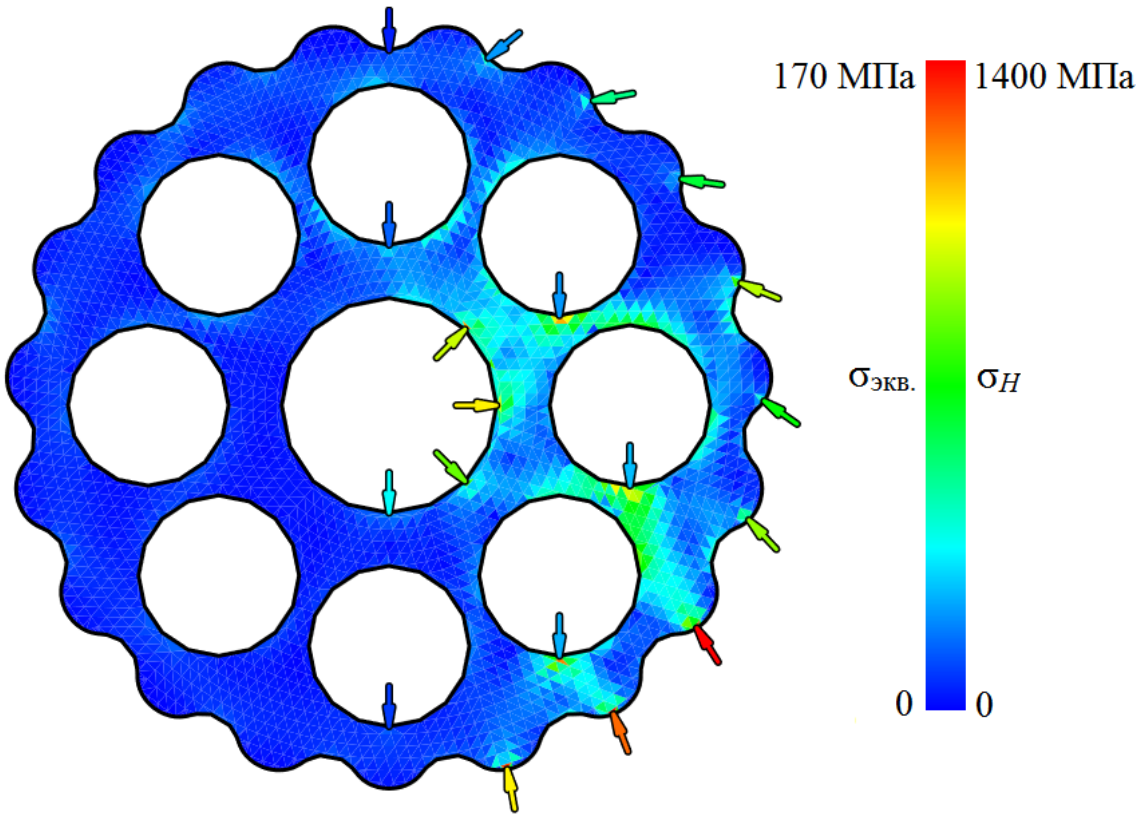


Рис. 3. Пример расчета. Цвета стрелок соответствуют контактным напряжениям σ_H в цевках, роликах и пальцах механизма параллельных кривошипов, цвета элементов – эквивалентным напряжениям $\sigma_{экв.}$ в теле сателлита

Угол упругого поворота сателлита составит φ = 92 ”, что соответствует крутильной жесткости передачи $j_\varphi = T/\varphi = 8{,}26$ Н·м/” (жесткость редуктора будет отличаться от жесткости передачи, т.к., с одной стороны, в нем присутствуют неучтенные податливые детали и сопряжения, а с другой стороны, наличие других сателлитов увеличивает жесткость пропорционально их количеству).

Выводы

1. Расчет планетарно-цевочной передачи без учета податливости сателлита приводит к заниженной оценке контактных напряжений, действующих в цевках, а также не позволяет корректно установить наиболее нагруженное место контакта.
2. Предлагаемая методика учитывает податливость сателлита, а также упругие деформации в местах его контакта с цевками, роликами и пальцами механизма параллельных кривошипов.
3. Упругие перемещения узлов сателлита и угол поворота обоймы под действием крутящего момента могут быть определены решением системы уравнений (6). Таким образом может быть оценена жесткость планетарно-цевочной передачи.
4. Силы в зацеплении могут быть найдены по формуле (10). Силы, действующие на ролики подшипников, муфты Ольдгейма и пальцы механизма параллельных кривошипов, могут быть определены по формуле (14).
5. Максимальные напряжения в местах контакта могут быть определены по формуле Герца (15), если подставить в нее ранее определенные силы и приведенные радиусы кривизны, рассчитываемые по формулам (16, 17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.С. [и др.] Метод расчета планетарно-цевочной передачи. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», выпуск 1 (51)’ 2015. С. 151-157.
2. Фомин М.В. Планетарно-цевочные передачи. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 62 с.
3. Шанников В.М. Планетарные редукторы с внецетроидным зацеплением. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
4. B. Borislavov, I. Borisov, V. Panchev. Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer. Sweden: Linnaeus University. 2012. 90 p.
5. Каталог «Редуктор серии DRIVE 6000», 2007, 268 с. // URL: http://www.sumitomo-drive.ru/pdf/K-CycloDrive6000(RUS).pdf (дата обращения: 03.04.2016).

6. Каталог RVSeriesGearheads // URL: http://www.nabtesco.de/fileadmin/nabtesco/downloads/kataloge/ca_rd_e.pdf (дата обращения: 04.04.2016).
7. Каталог TwinSpin. Издание 1/2009. // URL: http://www.spinea.sk/download/99_catalogue_uk.pdf (дата обращения: 03.04.2016).
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975, 541 с.
9. Вилсон Е., Батэ К. Численные методы анализа и метод конечных элементов: пер. с англ. М.: Стройиздат, 1982, 472 с.
10. Попов В. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. Litres, 2016, 352 с.

A. S. Ivanov[1], M. M. Ermolaev[2], A. V. Chirkin[3], Y. V. Sinitsyna[4]

CALCULATION OF PLANETARY GEARBOXES WITH DUE REGARD TO ELASTIC DEFORMATION OF SATELLITE GEAR

all: Bauman Moscow State Technical University

Abstract

In the article is provided method of calculation of planetary gearboxes with due regard to elastic deformation of satellite gear and contact deformation of bearing. There are brought dependencies for engineering calculation and checking calculation of epicycloidal and hypotrochoidal gearing. There are recommended dependencies for choosing optimal parameters of gearbox according to gearing maximal torque.

Keywords: planetary gearboxe, epitrochoidal gearing, hypotrochoidal gearing, finite element modelling, contact mechanics.

REFERENCES

[1] Ivanov A.S. [and others.] Metod rascheta planetarno-cevochnoy peredachi. – GVYZ « Donetsk National Technical University», vypusk 1 (51)’ 2015. C. 151-157. (rus.)
[2] Fomin M.V. Planetarno-cevochnye peredachi. M.: Publishing MGTU im. N. Je. Baumana, 2009. 62 c. (rus.)
[3] Shannikov V.M. Planetarnye reduktory s vnecetroidnym zacepleniem. – M.: Mashgiz, 1948. – 172 p. (rus.)
[4] B. Borislavov, I. Borisov, V. Panchev. Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer. Sweden: Linnaeus University. 2012. 90 p.
[5] Catalogue «DRIVE 6000 Series Reducers», 2007, 268 p. // URL: http://www.sumitomo-drive.ru/pdf/KCycloDrive6000(RUS).pdf (date oftreatment 03.04.2016).

[6] CatalogueRVSeriesGearheads // URL: http://www.nabtesco.de/fileadmin/nabtesco/downloads/kataloge/ca_rd_e.pdf (date oftreatment 04.04.2016).
[7] TwinSpin catalogue. 1/2009. // URL: http://www.spinea.sk/download/99_catalogue_uk.pdf (date oftreatment 03.04.2016).
[8] Zenkevich O. Finite-Element Method in Engineering. Moscow, Mir publ., 1975, 541 p.
[9] Bathe K. J., Wilson E. L. Numerical methods in finite element analysis. Moscow: Strojizdat publ., 1976, 472 p.
[10] Popov V. Mechanika kontaktnogo vzaimodeystviya I fizika treniya. Ot nantribologii do dinamiki semletryaseniy. Moscow: Litres publ, 2016, 352p.

УДК 621.833.36 ; DOI 10.1872/MMF-2016-46

А.С. Иванов[1], М.С.Куц[2]

РАСЧЕТ ГИПОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ РЕДУКТОРА

(Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки по проекту 1403)

[1]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, Москва
E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[2]Михаил Сергеевич Куц, студент
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия, Москва
E-mail: kuts@m-drives.ru

Аннотация

Предложена методика расчета гипоидной передачи редукторов на сопротивление усталости по изгибу зубьев шестерни и колеса, а также на сопротивление контактирующих поверхностей зубьев заеданию.

Ключевые слова: гипоидная передача, гипоидное смещение.

Гипоидные передачи получили заметное распространение в автомобилях [1, 2], в бумагоделательных и в текстильных машинах, в делительных передачах прецизионных зуборезных станков. В последнее время за рубежом наладили серийный выпуск гипоидных редукторов. На рис. 1 представлен редуктор фирмы Tandler, а на рис. 2 редуктор фирмы Siemens.Также занимаются изготовлением гипоидных редукторов фирмы Wittenstein alpha GmbH, Sumitomo Drive, Motovario и др. В одноступенчатом гипоидном редукторе передаточное число у них доходит до 15, а в двухступенчатом − до 60.

В нашей стране изготовление гипоидных редукторов пока не освоено, что в значительной степени можно объяснить отсутствием методики расчета гипоидной передачи. В данной работе в развитие проводимых нами исследований [3−5] сделана попытка предложить такую методику.

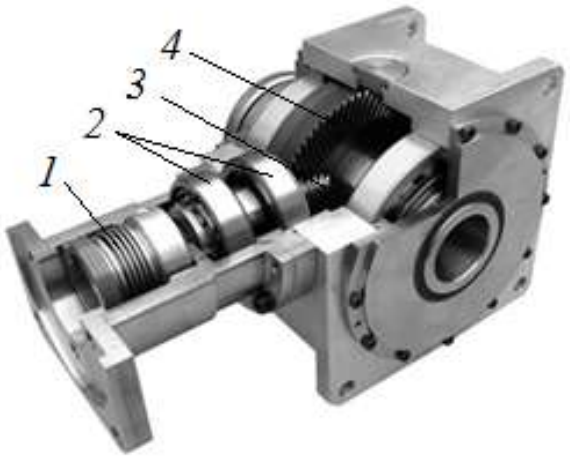


Рис. 1. Гипоидный редуктор фирмы Tandler: *1* − сильфонная муфта; *2* − подшипники быстроходного вала; *3* − гипоидная шестерня; *4* − гипоидное колесо

Рис. 2. Гипоидный редуктор фирмы Siemens

Колеса гипоидной передачи, как правило, выполняют с круговыми зубьями. Передаточное число обычно выбирают в пределах от 1 до 10 (15), максимально до 60. Передаточное число гипоидной передачи $u = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_{m2}\cos\beta_{m2}}{d_{m1}\cos\beta_{m1}}$, где n_1 и n_2 − частоты вращения шестерни и колеса; d_{m2} и d_{m2} − средние делительные диаметры колеса и шестерни; z_2 и z_1 − числа зубьев колеса и шестерни; β_{m2} и β_{m1} − средние углы наклона зубьев колеса и шестерни.

Минимально допустимое число зубьев шестерни $z_{1\min}$ указано по табл. 1.

Таблица 1

Минимально допустимое число зубьев шестерни

u	2,5	3	4	5	>5
$z_{1\min}$	15	12	9	7	6

По нему задаются z_1 и находят z_2 (числа зубьев шестерни и колеса не должны быть кратными):

$$z_2 = z_1 u.$$

Обычно назначают: $\beta_{m2} = 30 \div 35^o$; при $z_1 = 6 \div 13$ $\beta_{m1} = 50^o$; при $z_1 = 14 \div 15$ $\beta_{m1} = 45^o$; при $z_1 = 16$ $\beta_{m1} = 40^o$.

Углы зацепления α для противоположных сторон зубьев получаются различными. Они меньше для вогнутой стороны зубьев шестерни и сопряженной выпуклой стороны зубьев колеса и соответственно больше для противоположных сторон. В чертежах достаточно указывать средний угол α_{cp}, который для передач машин общего машиностроения и легковых автомобилей при $z_1 \geq 8$ обычно принимают равным $21^o15'$, а для передач тяжелых транспортных машин $22^o30'$.

Зубья гипоидных колес имеют пропорционально понижающуюся высоту от наружного к внутреннему диаметру, которая характеризуется совпадением вершины делительного конуса и конуса впадин зубьев. Образующая конуса вершин зубьев проходит параллельно образующей конуса впадин зубьев сопряженного колеса (осевая форма зуба I по ГОСТ 19326−73), благодаря чему обеспечивается постоянство радиального зазора на всей длине зуба. Это позволяет увеличить радиус закругления у корня зуба и повысить его изгибную прочность.

Гипоидное смещение (рис. 3):

$$E = k_E d_{m2},$$

где k_E − коэффициент гипоидного смещения.

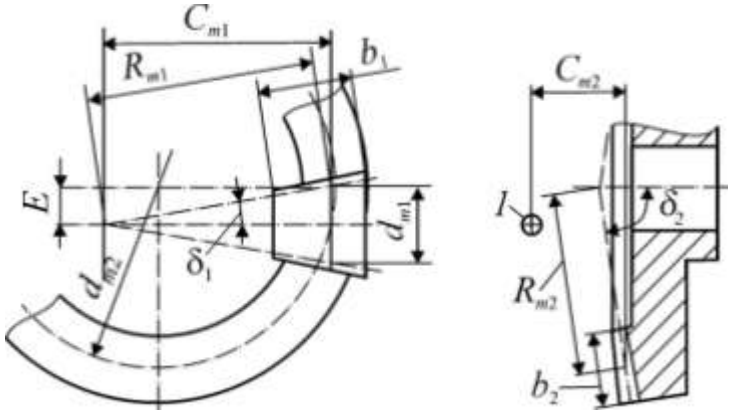


Рис. 3. Геометрические параметры гипоидной передачи, *1* − ось шестерни

Угол начального конуса колеса:

$$\delta_2 = \text{arctg}\,[u/(1 - 0{,}9k_E)].$$

Угол начального конуса шестерни:

$$\delta_1 = \arcsin\,[\cos\varepsilon \cdot \cos\delta_2],$$

где $\varepsilon = \arcsin[\text{tg}\theta \cdot \text{tg}\delta_2]$, $\theta = \text{arctg}\{E/[0{,}5d_{m2}\text{tg}\delta_2 + 0{,}5d_{m1}\cos\theta']\}$,
$\theta' = \text{arctg}\{E/[0{,}5d_{m2}\text{tg}\delta_2 + 0{,}5d_{m1}]\}$ − вспомогательные углы [6].

Средние конусные расстояния колеса и шестерни:

$$R_{m2} = 0{,}5d_{m2}/\sin\delta_2;\ R_{m1} = 0{,}5d_{m1}/\sin\delta_1.$$

Средний угол зацепления $\alpha_{ср} = 21^{o}15'$,

Нормальный модуль в средних сечениях зубьев колеса и шестерни:

$$m_n = d_{m2}\cos\beta_{m2}/z_2.$$

Ширина зубчатого венца колеса:

$$b_2 = \min(0{,}35R_{m2};\ 10m_n).$$

Коэффициентом x_1 смещения инструмента для шестерни задаются по табл. 2 в зависимости от z_1:

Таблица 2

Коэффициент смещения инструмента для шестерни

z_1	6	7	8	>8
x_1	0,682	0,666	0,648	0,627

Коэффициент смещения инструмента для колеса $x_2 = -x_1$.

Коэффициент увеличения размеров шестерни:

$$k_г = \cos\beta_{m2}/\cos\beta_{m1}.$$

Длина зуба шестерни, мм:

$$b_1 = b_2\sin\delta_2/(\cos\varepsilon\cdot\cos\delta_1) + 2\div5$$

Средний делительный диаметр шестерни:

$$d_{m1} = k_г d_{m2}/u.$$

Координаты вершины делительного конуса шестерни:

$$C_2 = 0{,}5d_{m1}\cos\theta;\ C_1 = 0{,}5d_{m1}\mathrm{ctg}\delta_1.$$

Внешнее конусное расстояние колеса:

$$R_{e2} = R_{m2} + 0{,}5b_2.$$

Силы, возникающие в зацеплении гипоидной передачи, вычисляют по формулам табл. 3, где T_2 − вращающий момент на колесе, Н·м, d_{m2} −средний делительный диаметр колеса, мм. Направление спирали зубьев гипоидной передачи выбирают таким, чтобы осевая сила F_{A1} была направлена от вершины к основанию конуса. Для выполнения этого условия при ведущей шестерне направление наклона ее зуба (смотря со стороны вершины делительного конуса) назначают одинаковым с направлением вращения. На рис. 4 (колесо и шестерня условно раздвинуты) указаны направления сил нормальной F_n касательной к начальным конусам, возникающей в зацеплении, и окружных, нагружающих зубья шестерни F_{t1} и колеса F_{t2}, при левом направлении зуба шестерни и вращении колеса по часовой стрелке [1].

При изменении направления вращения колеса знаки плюс и минус перед вторыми слагаемыми, заключенными в скобках формул табл. 3, изменяются на противоположные. Выбор направления зубьев шестерни (правое или левое) не является произвольным, а зависит от направления гипоидного смещения.

Таблица 3

Силы, Н, возникающие в зацеплении гипоидной передачи [6]

Колесо	Окружная	$F_{t2} = 2T_2/(10^3 d_{m2})$
	Радиальная	$F_{R2} = F_{t2}(\text{tg}\alpha \cdot \cos\delta_2 + \sin\beta_{m2} \cdot \sin\delta_2)/\cos\beta_{m2}$
	Осевая	$F_{A2} = F_{t2}(\text{tg}\alpha \cdot \sin\delta_2 - \sin\beta_{m2} \cdot \cos\delta_2)/\cos\beta_{m2}$
Шестерня	Окружная	$F_{t1} = F_{t2}/k_\text{г}$
	Радиальная	$F_{R1} = F_{t1}(\text{tg}\alpha \cdot \cos\delta_1 - \sin\beta_{m1} \cdot \sin\delta_1)/\cos\beta_{m1}$
	Осевая	$F_{A1} = F_{t2}(\text{tg}\alpha \cdot \sin\delta_1 + \sin\beta_{m1} \cdot \cos\delta_1)/\cos\beta_{m1}$

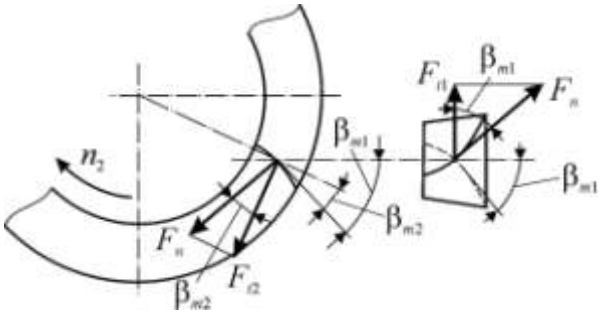


Рис. 4. Окружные силы F_{t1} и F_{t2} в гипоидной передаче

Гипоидная передача по сравнению с конической имеет преимущества [6]:

− средний делительный диаметр d_{m1} шестерни при одном и том же среднем делительном диаметре d_{m2} колеса и передаточном числе u получается в $k_\text{г} = \cos\beta_{m2}/\cos\beta_{m1}$ раз больше, так как средний угол β_{m1} наклона зубьев шестерни с её осью назначают большим среднего угла β_{m2} наклона зубьев колеса;

− имеет место более высокая нагрузочная способность при одинаковых с конической передачей размерах, так как приведенный радиус кривизны зуба получается в $k_\text{г}^3$ раз больше и теоретически передача может быть выполнена с начальным контактом по линии;

− хорошая прирабатываемость зубьев, не подверженность их существенным искажениям вследствие достаточно равномерного скольжения по рабочей поверхности зубьев, плавная и бесшумная работа передачи;

− возможность установки шестерни и колеса на двух опорах и, как следствие, уменьшение концентрации нагрузки на зубьях;

− передача может применяться в механизмах высокой точности, в частности в качестве делительных передач прецизионных зуборезных станков благодаря тому, что в зацеплении находится несколько пар зубьев.

Основной недостаток гипоидной передачи − склонность к заеданию, которая возникает в результате не только поперечного, но и продольного скольжения зубьев, свойственного всем типам передач со скрещивающимися осями. Для устранения заедания рабочую поверхность зуба закаливают и обрабатывают с высокой чистотой, а для смазывания зацепления применяют противозадирный (гипоидный) смазочный материал, который должен одинаково надёжно предотвращать заедание зубьев как при работе на режимах максимального крутящего момента, так и в режиме максимальной скорости.

Основными критериями работоспособности гипоидной передачи являются [6] сопротивление усталости по изгибу зубьев шестерни и колеса, а также сопротивление контактирующих поверхностей зубьев заеданию. Чтобы обеспечить работоспособность гипоидной передачи по указанным критериям, зубчатые колеса изготавливают из качественных сталей (стали марок 20 ХНМ, 30ХГТ, 20Х2Н4; 25ХГНМ, 15ХГН2ТА и др.), допускающих цементацию на глубину 1,2÷1,5 мм.

За допускаемое напряжение по контактным напряжениям $[\sigma]_H$ принимают меньшее из допускаемых напряжений колеса $[\sigma]_{H2}$ и шестерни $[\sigma]_{H1}$, где $[\sigma]_{H2} = \sigma_{H\lim} Z_{N2}/S_H$; $[\sigma]_{H1} = \sigma_{H\lim} Z_{N1}/S_H$; $\sigma_{H\lim} = 23H_{\mathrm{HRC}}$; $Z_{N2} = (N_{HG}/N_{HE2})^{1/6}$; $Z_{N1} = (N_{HG}/N_{HE1})^{1/6}$; $1 \le Z_{N2} \le 1{,}6$; $N_{HE2} = 60\mu_H n_2 t_\Sigma$; $N_{HE1} = 60\mu_H u n_2 t_\Sigma$; $S_H = 1{,}2$ − коэффициент запаса; μ_H − коэффициент приведения переменного режима работы к постоянному [7]; $N_{HG} = H_{\mathrm{HB}}{}^3$ − базовое число циклов по контактной выносливости; H_{HRC} и H_{HB} − твердости поверхностного слоя зуба по шкалам Брюнеля и Роквела.

Допускаемые напряжение по изгибным напряжениям:

$$[\sigma]_{F2} = \sigma_{F\lim} Y_{N2}/S_F;\ [\sigma]_{F1} = \sigma_{F\lim} Y_{N1}/S_F,$$

где $\sigma_{F\lim} = 750\div800$ МПа; $Y_{N2} = (4\cdot10^6/N_{FE2})^{1/9}$; $Y_{N1} = (4\cdot10^6/N_{FE1})^{1/9}$; $1 \le Y_{N2} \le 2{,}6$; $1 \le Y_{N1} \le 2{,}6$; $N_{FE2} = 60\mu_F n_2 t_\Sigma$; $N_{FEk1} = 60\mu_F u n_2 t_\Sigma$; $S_F = 1{,}7$ − коэффициент запаса; μ_F − коэффициент приведения переменного режима работы к постоянному [7].

Условия обеспечения сопротивления усталости по изгибу [2, 8] для зуба колеса

$$[\sigma_F]_2 \ge \sigma_{F2} = k_{F\beta} k_{Fv} Y_{F2} F_{t2}/(\varepsilon_\gamma b_2 m_n);$$

и зуба шестерни

$$[\sigma_F]_1 \ge \sigma_{F1} = k_{F\beta} k_{Fv} Y_{F1} F_{t1}/(\varepsilon_\gamma b_2 m_n),$$

где $k_{F\beta}$ − коэффициент неравномерности распределения нагрузки по длине зуба (см. табл. 4); k_{Fv} − коэффициент динамичности нагрузки (табл. 5); Y_{F2} и Y_{F1} − коэффициенты формы зуба колеса и шестерни, принимаемые в зависимости от эквивалентного числа зубьев и коэффициента смещения:

$$Y_{F2} = 3{,}47 + 13{,}2/z_{v2} - 27{,}9x_2/z_{v2} + 0{,}092x_2{}^2;$$

$$Y_{F1} = 3{,}47 + 13{,}2/z_{v1} - 27{,}9x_1/z_{v1} + 0{,}092x_1^2,$$

где $z_{v2} = z_2/(\cos\delta_2\cos^3\beta_{m2})$ и $z_{v1} = z_1/(\cos\delta_1\cos^3\beta_{m1})$ − эквивалентные числа зубьев колеса и шестерни; ε_γ − коэффициент суммарного перекрытия [9]:

$$\varepsilon_\gamma = (\varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta)^{0,5},$$

где ε_α − коэффициент торцевого перекрытия, определяемый [2] в зависимости от z_1 по табл. 6; ε_β − коэффициент осевого перекрытия [2]:

$$\varepsilon_\beta = (3K_b - K_b^3)R_{e2}/(3\pi\, m_{te2}),$$

где $K_b = b_2R_{m2}\mathrm{tg}\,\beta_{cp}/[R_{e2}\,(R_{e2} - 0{,}5b_2)]$ и $\beta_{cp} = 0{,}5(\beta_{m1} + \beta_{m2})$.

Таблица 4

Коэффициенты $k_{H\beta}$ и $k_{F\beta}$ неравномерности распределения нагрузки по длине зуба в зависимости от относительной ширины Ψ_{bd} зуба

Расположение опор		$\Psi_{bd} = b_1/d_{m1}$						
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	2,5
Несимметр.	$k_{H\beta}$	1,01	1,05	1,09	1,14	1,25	1,4	1,5
	$k_{F\beta}$	1,02	1,07	1,13	1,2	1,37	1,6	1,7
Консольн.	$k_{H\beta}$	1,15	1,35	1,6	1,85	-/1,6*	-/1,7*	-/1,8*
	$k_{F\beta}$	1,25	1,55	1,9	2,3	-/1,7*	-/1,8*	-/1,9*

* − шестерня вклеена [3] в ведущий вал.

Наружный делительный диаметр колеса:

$$d_{e2} = 2R_{e2}\sin\delta_2.$$

Внешний торцовый модуль колеса:

$$m_{te2} = d_{e2}/z_2.$$

Отношение ширины венца колеса к его внешнему конусному расстоянию:

$$K_{be} = b_2/R_{e2}.$$

Таблица 5

Коэффициенты k_{Hv} и k_{Fv} динамичности нагрузки

Степень точности		Окружная скорость, м/с				
		2	3	6	8	10
6	k_{Hv}	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04
	k_{Fv}	1,02	1,03	1,05	1,07	1,08
7	k_{Hv}	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05
	k_{Fv}	1,02	1,03	1,05	1,07	1,08
8	k_{Hv}	1,01	1,02	1,02	1,04	1,05
	k_{Fv}	1,02	1,04	1,06	1,08	1,09

Таблица 6

Коэффициент торцевого перекрытия

z_1	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
ε_α	0,87	0,95	1,02	1,07	1,11	1,19	1,21	1,23	1,25	1,26

Если условия обеспечения сопротивления усталости по изгибу не выполняются, корректируют значение модуля или коэффициентов смещения и повторяют расчет.

Условие отсутствия заедания рабочих поверхностей зубьев − критерий Олмена [6, 10]:

$$\sigma_H v_{ск} \le [C]_{зд},$$

где σ_H − контактное напряжение, МПа, вычисленное по формуле Герца-Беляева; $v_{ск}$ − скорость относительного продольного скольжения, м/сек; $[C]_{зд}$ − значение допустимой величины критерия заедания. Для стальных гипоидных колес с закаленными поверхностями зубьев при использовании специальных гипоидных смазок $[C]_{зд}$ = 3200 Н·м/(мм·сек). Для колёс из улучшенных сталей с менее твердой рабочей поверхностью зубьев величина $[C]_{зд}$ значительно ниже.

Номинальное значение d_{e2} принимают, согласно ГОСТ 12279-76, равным 50; (56); 63; (71); 80; (90); 100; (112); 125; (140); 160; (180); 200; (225); 250; 280; 315; 355; 400; 450; 500; 560; 630; 710; 800 мм (значения без скобок следует предпочитать значениям, заключенным в скобках; фактические значения d_{e2} не должны отличаться от номинальных более чем на 2%).

Контактное напряжение, МПа [2, 8]:

$$\sigma_H = 67\cdot10^3[k_{H\beta}k_{Hv}T_2u/(d_{e2}{}^3\nu_H\varepsilon_\gamma]^{1/2},$$

где $\nu_H = 0{,}81 + 0{,}15u$ − коэффициент, определенный опытным путем;

Скорость относительного продольного скольжения [6], м/сек;

$$v_{ск} = v_1\sin\beta_{m1} - v_2\sin\beta_{m2},$$

где $v_1 = \pi d_{m1}n_1/(60\cdot10^3)$ и $v_2 = \pi d_{m2}n_2/(60\cdot10^3)$ − окружные скорости шестерни и колеса.

КПД гипоидной передачи [6] можно оценивать по формулам:

при ведущей шестерне

$$\eta = (1 + f\,\mathrm{tg}\beta_{m2})/(1 + f\,\mathrm{tg}\beta_{m1}),$$

при ведущем колесе

$$\eta = (1 - f\,\mathrm{tg}\beta_{m1})/(1 - f\,\mathrm{tg}\beta_{m2}),$$

где $f \approx 0{,}05$ − коэффициент трения [6].

Расчеты, выполненные по изложенному выше алгоритму, показали, что при $u < 14$ работоспособность определяет контактная выносливость

зубьев, а при $u \geq 14$ лимитирующим критерием работоспособности становится сопротивления усталости зубьев колеса по изгибу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яскевич З. Ведущие мосты. Пер. с польского Г.В. Коршунова. − М.: Машиностроение, 1985. − 600 с.
2. Зайцев А.В. Расчеты главных передач: Учебное пособие. − Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2004. − 95 с.
3. Иванов А.С., Муркин С.В. Конструирование современных мотор-редукторов: Электронное учебное пособие. − М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, http://wwwcdl.bmstu.ru/rk3/Motor.html.
4. Иванов А.С., Ермолаев М.М., Муркин С.В. К расчёту и конструированию современных мотор-редукторов. // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й междунар. научно-практической конф. / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. − СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. − С. 377 − 388.
5. Чиркин А.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Планетарно-цевочные передачи на основе эпициклоидального и гипоциклоидального зацеплений. // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й междунар. научно-практической конф. / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. − СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. −С. 462 − 471.
6. Писманик К.М. Гипоидные передачи. − М.: Машиностроение, 1964. − 226 с.
7. Буланже А.В., Палочкина Н.В., Часовников Л.Д. Методические указания по расчету зубчатых передач редукторов и коробок скоростей по курсу "Детали машин". − М.: МВТУ, 1980. − 30 с.
8. Заблонский К.И. Детали машин. − Киев: Вища школа, 1965.− 518 с.
9. Детали машин: Учебник. /Н.А. Бильдюк, С.И. Каратушин, Г.Д. Малышев [и др.]; под общ. ред. В.Н. Ражикова. - СПб.: Политехника, 2015. − 695 с.
10. Генкин М.Д., Кузьмин Н.Ф., Мишарин Ю.А. Вопросы заедания зубчатых колёс. − М.: Изд-во АН СССР. 1959. − 147 с.

A.S. Ivanov[1], M.S. Kuts[2]

CALCULATION OF HYPOID GEAR

all: Bauman Moscow State Technical University

(This work was supported by a project # 1403 from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation)

Abstract

The method of hypoid gears calculation on the fatigue resistance of pinion and gear teeth bending, and the pitting resistance of the contacting surfaces of the teeth.

Key words: hypoid gear, hypoid offset.

REFERENCES

[1] Jaskewicz Z. Mostynapedowe. (Russ. ed.: Jaskewich Z. drive axles. Trans. from PolishG.V. Korshunov). − Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. − 600 p.
[2] Zajcev A.V. Calculation ofleadinggears: study guide. − Kurgan: KGSU Publ., 2004. − 95 p.
[3] Ivanov A.S., Murkin S.V. Designofmodern gearmotors: electronic study guide. − Moscow: BMSTU Publ., 2012, http://wwwcdl.bmstu.ru/rk3/Motor.html.
[4] Ivanov A.S., Ermolaev M.M., Murkin C.V. On the desing of modern gearmotors. // Modern machine building: science and education: 4-th int. scientific-practical conf. / St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2014. pp. 377−388.
[5] Chirkin A.V., Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Planetarygearboxes based on epi- and hypocycloidal gearing // Modern machine building: science and education: 4-th int. scientific-practical conf. / St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2014. pp. 462 − 471.
[6] Pismanik K.M. Hypoidgears. − Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. 226 p.
[7] Bulange A.V., Palochkina N.V., Chasovnikov L.D. Methodical guidelines for the calculation of gears and gearboxes for the course "Machine parts". − Moscow: BMSTU Publ., 1980. 30 p.
[8] Zablonskij K.I. Machine parts − Kiev, Visha shkola Publ., 1965. 518 p.
[9] Bilduk N.A., Karatushin S.I. [and others]. Machine parts: tutorial. − St. Petersburg: Politehnika Publ., 2015. 625 p.
[10] Genkin M.D., Kuzmin N.F., Misharin U.A. Questions of gears jamming. −Moscow: AN USSR Publ., 1959. 147 p.

УДК 621.2.082.18 ; DOI 10.1872/MMF-2016-47

В.В. Медведева[1], А. Д. Бреки[2], Н.А.Крылов[3], С.Е. Александров[4]

О МЕХАНИЗМЕ ПРОТИВОИЗНОСНОГО ДЕЙСТВИЯ КОНСИСТЕНТНОГО СМАЗОЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО СМЕСЬ ГИДРОСИЛИКАТОВ МАГНИЯ

[1]Виктория Валерьевна Медведева, инженер-исследователь кафедры МиОК ИММиТ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, E-mail: vikamv@mail.ru

[2]Александр Джалюльевич Бреки, к.т.н., доцент кафедры МиОК ИММиТ СПбПУ Петра Великого.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru

[3]Николай Александрович Крылов, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник кафедры МиОК ИММиТ СПбПУ.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, E-mail: cry_off@mail.ru

[4]Сергей Евгеньевич Александров, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой ФХМиН ИММиТ СПбПУ.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-61-71, E-mail: tmet@ftim.spbstu.ru

Аннотация

В работе рассмотрен возможный механизм противоизносного действия консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния – серпентинита и талька. Предложены схематические модели формирование вторичных структур на поверхностях трения. Реализована оценка противоизносных свойств консистентного смазочного композиционного материала.

Ключевые слова: гидросиликаты магния, дисперсные частицы, тальк, серпентинит, пластичный смазочный материал, трение, износ, смазка.

Известно, что в современные пластичные смазочные материалы для создания комплекса необходимых свойств вводят так называемые добавки (присадки) и порошкообразные наполнители. Добавки обычно растворяются в дисперсионных средах, например, в нефтяных маслах, чем они принципиально отличаются от наполнителей. Добавки[1] – это обычно поверхностно-активные вещества, которые заметно воздействуют на процесс формирования структурного каркаса мыльных смазок, но не являются дисперсной фазой, то есть загустителем. Добавки вводятся в смазку как противоизносные, противозадирные, антикоррозионные и структурообразующие органические соединения, и другие продукты, содержащие активные атомы серы, хлора, фосфора.

Для получения пластичных смазочных материалов с комплексом требуемых свойств перспективным является совместное введение в их состав добавок и наполнителей.

Наполнители, или твёрдые добавки[1], – это обычно тонкодисперсные, нерастворимые в маслах и не образующие коллоидной структуры вещества, представляющие в пластичных смазках самостоятельную дисперсную фазу, улучшающую их работоспособность. Изучению триботехнических свойств твёрдых добавок в средах различных смазочных материалов посвящён широкий круг исследований, показавших благоприятные результаты [2-17 и др.]. Ряд противоречий и проблем остаётся связанным с исследованиями так называемых геомодификаторов трения, к которым относятся дисперсные кварциты, серпентинит, тальк и др. В связи с этим возникает необходимость дополнительных исследований данных дисперсных материалов с точки зрения трибологии.

Примечательно, что тальк и серпентинит относятся к гидросиликатам магния и близки по строению. Существует обратимая химическая реакция, при которой из серпентина (минерала, входящего в состав серпентинита) образуется тальк:

$$5Mg_3Si_2O_5(OH)_4 \leftrightarrow Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 + 6Mg_2SiO_4 + 9H_2O\uparrow$$

Серпентин *Тальк* *Форстерит*

Зависимости фазового состава от температуры для выбранных в качестве наполнителей к смазочному материалу гидросиликатов[18] приведены на рис.1.

В качестве объектов исследования были выбраны смазочные композиции на основе пластичного смазочного материала «литол-24 ARGO», с наполнителем из смеси частиц серпентинита размером 10мкм с частицами талька размером 15мкм. Концентрация смеси в смазочном материале составляла 10% по массе. Процентное содержание компонентов в смеси (талька по отношению к серпентиниту) составляло 0% к 100%, 30% к 70%, 50% к 50%, 70% к 30%, 100% к 0%.

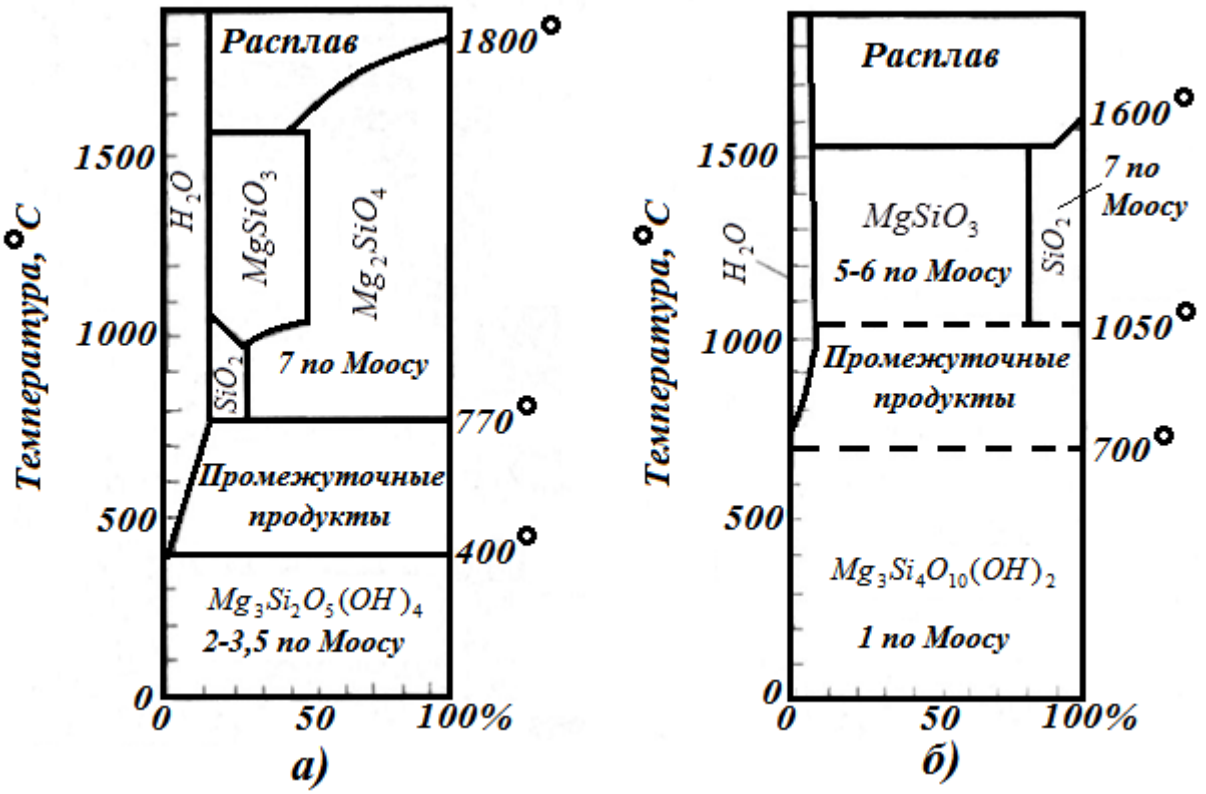


Рис.1. Зависимости фазового состава от температуры с обозначением твёрдости по Моосу в нормальных условиях: а) серпентин; б) тальк

Смазка Литол-24 (ГОСТ 21150-87) - нефтяное масло вязкостью 60-75 мм^2/с при 50°С, загущенное литиевым мылом 12-гидроксистеариновой кислоты. Он содержит антиокислительную и вязкостную присадки.

Основные эксплуатационные характеристики смазки Литол-24: высокая коллоидная, химическая и механическая стабильность, водостойкость даже в кипящей воде, при нагревании не упрочняется. Он имеет работоспособность при температуре -40…+120°С, кратковременно сохраняет работоспособность при температуре 130°С.

Предметом данного исследования являются триботехнические свойства композиционных материалов на основе пластичной смазки «литол-24 ARGO», с наполнителем из смеси дисперсных гидросиликатов магния.

Целью исследования является оценка противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала при различных пропорциях гидросиликатов в смеси.

Оценку противоизносных свойств смазочных слоёв, содержащих дисперсные наполнители, осуществляли на четырёхшариковой машине трения ЧШМ-3,2 в соответствии с ГОСТ 9490–75 при трении скольжения.

Данная установка используется на начальном этапе трибологических испытаний для оценки способности смазочных материалов уменьшать износ пар трения и предотвращать их заедание. В этой лабораторной

установке стандартный шарикоподшипниковый шарик из стали ШХ-15 диаметром $d_ш = 12{,}70 мм$ зажат в шпинделе машины, вращающемся с частотой вращения $n_{шп} = 1460 мин^{-1}$. К этому шарику под заданной нагрузкой $60H \le P \le 10000H$ прижимают три неподвижных шарика, сложенные треугольником в плоскости, перпендикулярной оси шпинделя, и помещают в чашку с исследуемым смазочным материалом. Вращающийся шарик вытирает на контактирующих с ним участках рабочих поверхностей неподвижных шаров лунки (пятна износа), по средней величине которых судят о влиянии смазочного материала на износ шаров при данной нагрузке. Испытания проводились при следующих условиях: нагрузка составляла 20кгс, время одного испытания составляло 1 час.

Результаты испытаний противоизносных свойств пластичного композиционного материала с добавкой 10% по массе смеси частиц талька и серпентинита в различных пропорциях показаны на рисунке 2.

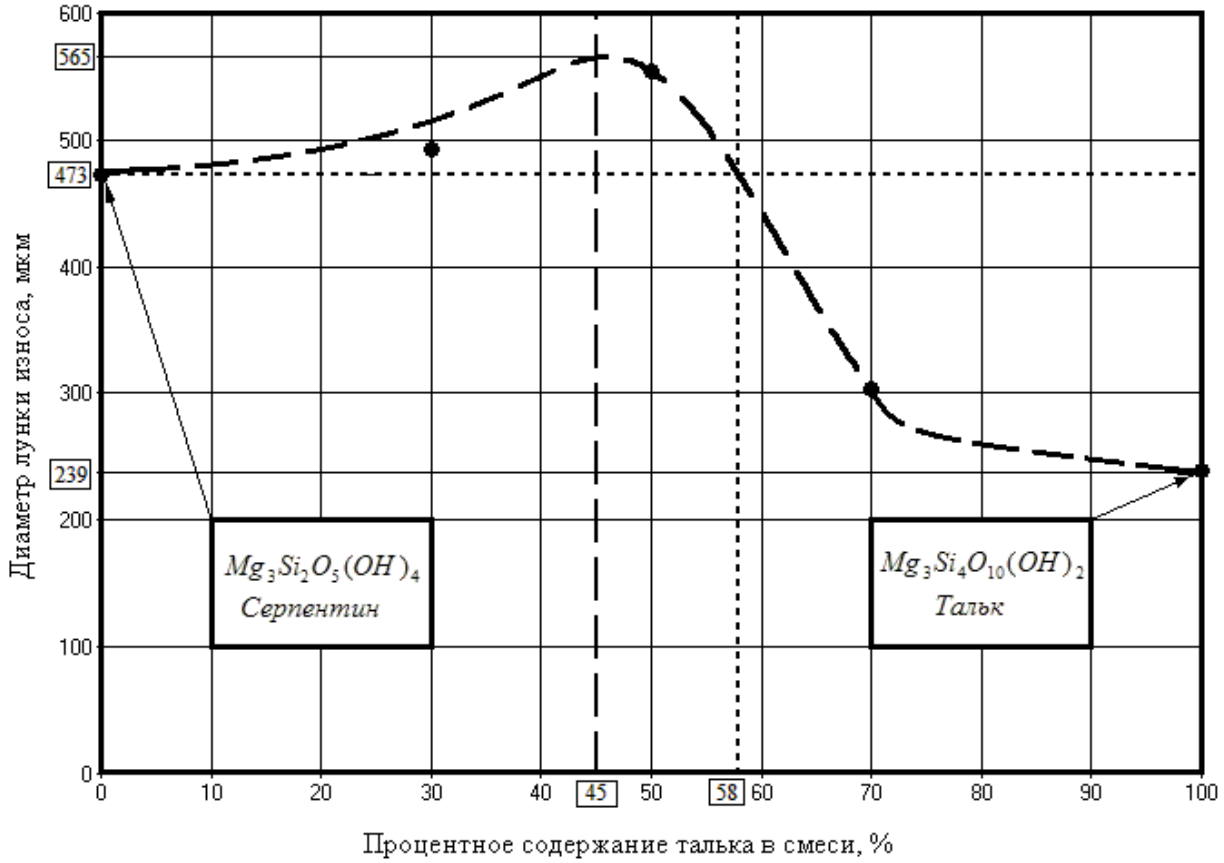


Рис. 2. График зависимости диаметра пятна износа от процентного содержания талька в смеси «тальк-серпентинит»

Из построенного графика (рис.2) видно, что при приращении концентрации талька в смеси до ≈45% по массе происходит рост лунки износа шариков и при данном соотношении концентраций (45/55) достигает максимального значения. В итоге максимальный износ при

использовании композиции со смесью превышает износ при использовании композиции только с серпентинитом на ≈20%. После концентрации талька ≈45% износ начинает снижаться. Обнаружено, что в случае соотношения талька и серпентинита в смеси (58/42)% диаметр лунки износа аналогичен смазочной композиции со 100% серпентинита. С дальнейшим приращением концентрации талька в смеси происходит резкое снижение износа до концентрации талька в смеси ≈70%, после чего износ снижается, но в меньшей степени и достигает своего минимального значения при использовании 100% талька в смазочной композиции.

Снижению износа при использовании гидросиликатов магния способствуют процессы, обусловленные их физико-механическими характеристиками и химическими свойствами. Ниже на рис.3(б) и рис.4(а) приведены схематические модели механизмов образования стекловидных тел (локальных плёнок) при соответствующих термомеханических условиях. На рис. 3(а) и рис.4(б) приведены характерные микрофотографии стекловидных локальных плёнок на поверхностях после фрикционного взаимодействия. В скобках на рисунках приведены вероятные составы локальных стекловидных плёнок на поверхностях трения.

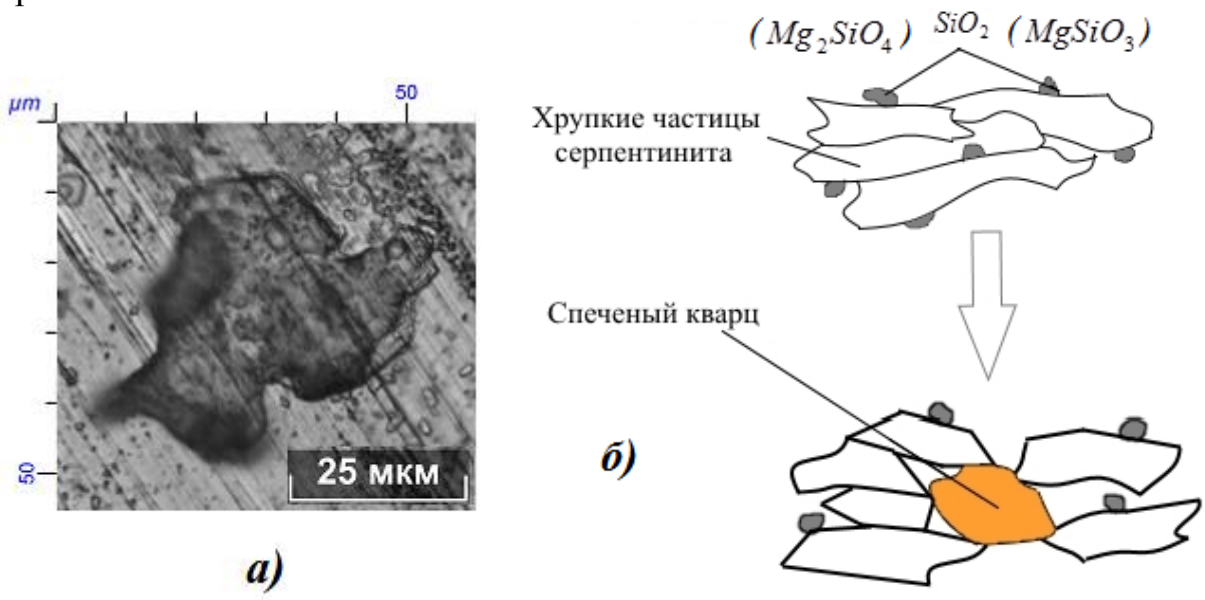


Рис. 3. Механизм образования кварцевых стекловидных тел (пленок) в серпентините

Синтетическая аморфная двуокись кремния, начиная с 1150°С спекается, затем остекловывается, образуя при 1400—1450 °С расплав повышенной плотности, который при дальнейшем повышении температуры дает расплав обычной плотности, непосредственно или через фазу а-кристобалита. Расплавы метасиликата магния и форстерита образуются при аналогичных температурах (рис.1).

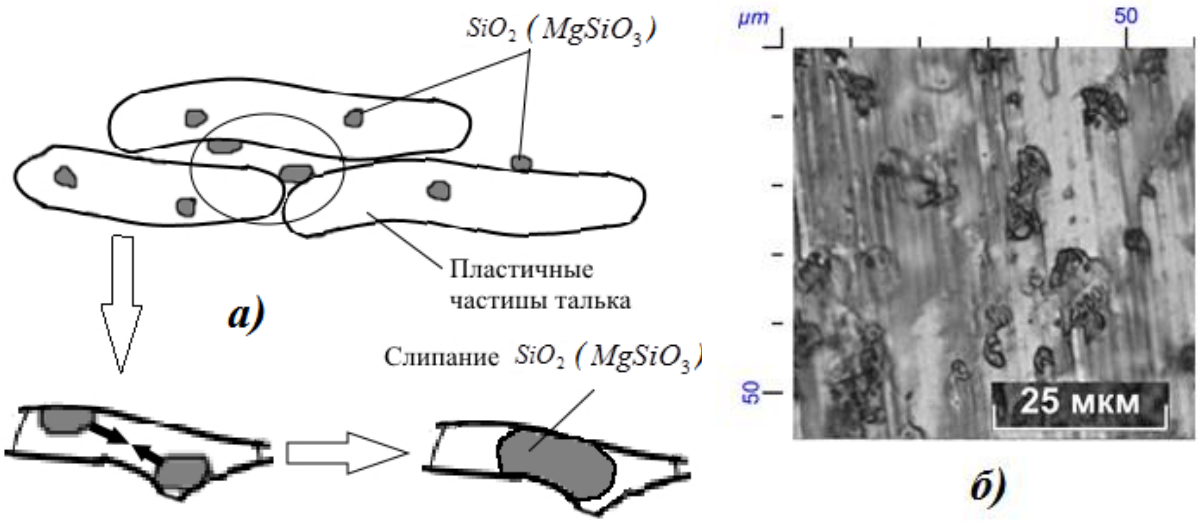


Рис. 4. Механизм образования кварцевых стекловидных тел (пленок) в тальке

При повышенных температурах кристаллические продукты разложения двух силикатов различны: серпентинит разлагается на форстерит, метасиликат магния и кремнезём, а в тальке первичные продукты термического разложения – метасиликат магния и свободный кремнезём. Сводная таблица свойств продуктов термического разложения гидросиликатов магния приведена ниже.

Таблица 1. Продукты термического разложения гидросиликатов

Продукт термического разложения	Твердость	Прочность	Плотность г/см^3	Вид
Форстерит	7	хрупкий	3,275	Излом раковистый, сплошные зернистые агрегаты
Метасиликат магния	5-6	хрупкий	3,28	Плотные листовые или зернистые агрегаты
Кремнезем	7	Высокая прочность	2,65	Мелкие зерна скрытоволокнистых и иногда сферических образований (рже таблитчатого и пластинчатого облика)

Вероятность возникновения остекленных тел в серпентините выше чем у талька, так как при высоких температурах частицы серпентинита охрупчиваются сильнее и не способны к внедрению SiO2 (Mg2SiO4, MgSiO3) внутрь частицы. При использовании смеси, состоящей из 65%

серпентинита и 45% талька – увеличена лунка износа, в связи с конкуренцией двух механизмов взаимодействия контактирующих поверхностей среди дисперсных частиц. Содержание серпентинита достаточно для образования спеченных стекловидных тел (пленок), однако большое содержание талька в смазочном материале может привести к налипанию пластичных частиц талька на поверхности стекловидного тела, образованного из серпентинита, приводящее к увеличенному пропахиванию поверхности в зоне контакта.

Далее была рассмотрена эволюция формирования вторичных структур на поверхностных слоях в зоне фрикционного контакта в зависимости от процентного соотношения талька и серпентинита в смеси, используемой для создания смазочного композиционного материала. Для наглядности схема эволюции сведена в таблицу 2.

Таблица 2. Эволюция формирования вторичных структур

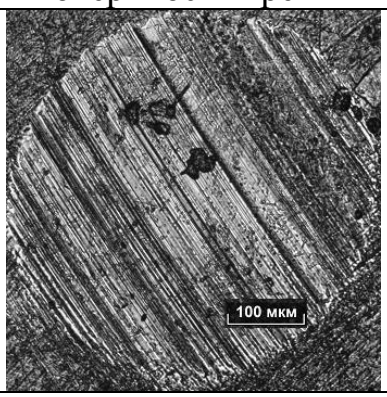
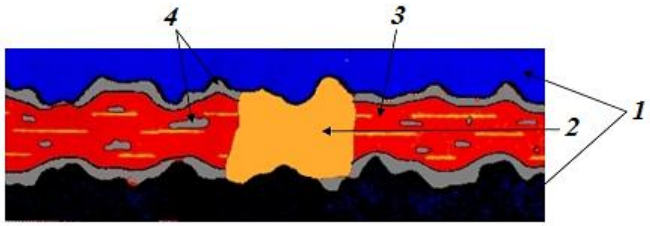
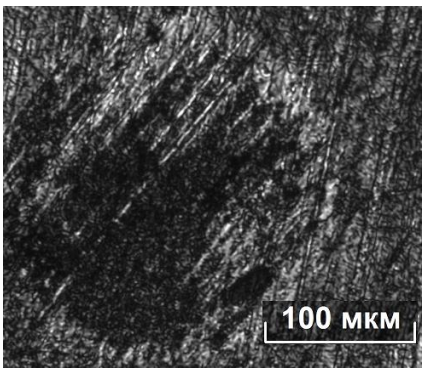
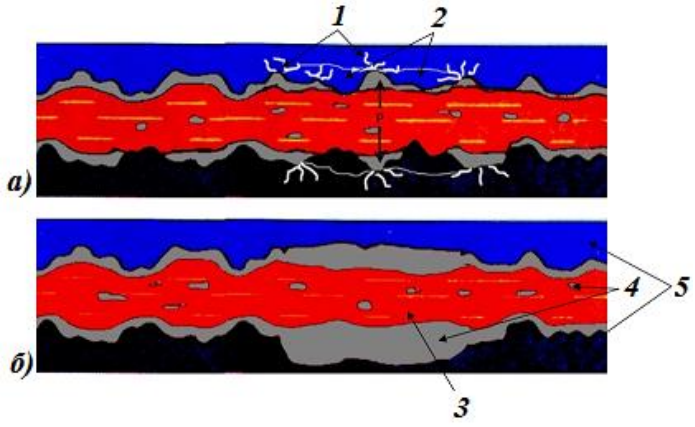
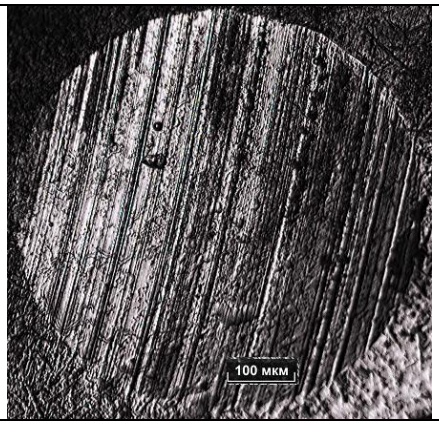
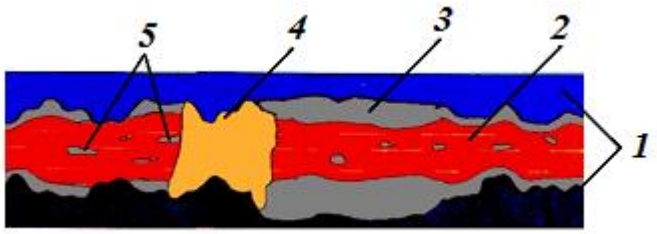
<table>
<tr><th>№</th><th>Микрофотография поверхности трения</th><th>Схема образования вторичной структуры</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">1-Сопряженные поверхности трения; 2-Спеченый кварц (форстерит, метасиликат магния); 3-Смазочный материал (Литол-24); 4-Серпентинит.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">1-Концентраторы напряжений, из-за которых возникает скол неровностей; 2-Сколотые неровности поверхности; 3-Смазочный материал (Литол-24); 4-Тальк; 5-Сопряженные поверхности трения.</td></tr>
</table>

Таблица 2. Продолжение

3		
	1-Сопряженные поверхности трения; 2-Смазочный материал (Литол-24); 3-Тальк; 4-Спеченый кварц (форстерит, метасиликат магния); 5-Частицы серпентинита и талька.	

Как видно из таблицы 2 (№1) в случае использования чистого серпентинита происходит формирование тонких плёнок, основанных на склонности компонентов серпентинита к образованию кластеров (стекловидных тел, размеры которых достигают до 50мкм), спекающихся за счёт высоких температур в зоне контакта. Следов схватывания второго рода на фрикционном контакте наблюдается мало.

В случае использования чистого талька (табл.2, №2) механизм образования вторичных структур основан на возникновении в начале фрикционного взаимодействия локальных концентраторов напряжений. Можно предположить, что возникновение данных концентраторов связано с заполнением пластичным тальком исходных микронеровностей. Критическая концентрация талька в заполненных микрообъёмах приводит к образованию микровыкрашиваний в связи возникновением циклических расклинивающих напряжений. После установления равновесной шероховатости частицы талька и его формирующиеся и сформированные вторичные структуры заполняют образовавшиеся полости и тем самым образуют защитные плёнки. Размеры вторичных структур при использовании талька, значительно меньше, чем при использовании чистого серпентинита и достигают до 10мкм.

В случае совместного использования в смазочном композиционном материале талька и серпентинита происходит параллельное протекание описанных выше процессов и реализуется конкуренция между двумя механизмами образования вторичных структур (табл.2, №3).

На основании полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1.В процессе экспериментальных исследований установлено, что смазочная композиция с тальком показала лучшие противоизносные свойства, чем смесь «тальк – серпентинит» в различных пропорциях.

2.При добавлении талька в смазочную композицию с серпентинитом при процентном соотношении смеси тальк-серпентинит (45/65)% наблюдается максимальное увеличение лунки износа, что обусловлено конкурентными процессами образования вторичных структур.

3.Смазочный композиционный материал со смесью тальк-серпентинит показал лучшие противоизносные свойства по сравнению с базовой консистентной смазкой (диаметр лунки износа 745мкм) при любом пропорциональном соотношении талька и серпентинита.

4.На основе микроскопических исследований образцов после испытаний предложены схематические модели возможных механизмов образования локальных стекловидных плёнок.

5.Рассмотрена эволюция формирования вторичных структур на поверхностных слоях в зоне фрикционного контакта в зависимости от процентного соотношения талька и серпентинита в смеси, в результате чего установлены возможные механизмы противоизносного действия данных веществ.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований по приоритетным тематическим направлениям исследований» научному проекту: "Формирование беспористых покрытий из нанокомпозиционных материалов типа «износостойкая матрица - наночастицы дисульфида молибдена (вольфрама)», обладающих низким коэффициентом трения, методом химического осаждения из газовой фазы", № 15-13-00045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н. Структурно-энергетические модели надёжности материалов и деталей машин. – СПб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2006. – 608с.
2. Увеличение ресурса работы подшипников качения применением пластичных смазочных материалов с ультрадисперсным алмазографитом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / С.Г. Докшанин; Красноярский государственный технический университет. - Красноярск, 2002. - 20 с.
3. Повышение долговечности гипоидных передач применением твёрдых добавок к смазочному материалу: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / Д. А. Маринушкин; Сибирский государственный технологический университет. - Красноярск, 2008. - 20 с.

4. Улучшение эксплуатационных характеристик подшипников скольжения применением модифицированных смазочных материалов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / А. А. Шаронов; Красноярский государственный технический университет. - Красноярск, 2005. - 18 с.
5. Твёрдые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04 / Х. А. Хуссеин; Институт проблем машиноведения РАН. – Санкт-Петербург, 2009. - 18 с.
6. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт проблем машиноведения Российской академии наук. Санкт-Петербург, 2011. – 161с.
7. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт проблем машиноведения Российской академии наук. Санкт-Петербург, 2011. – 19 с.
8. Нестационарная математическая модель прогнозирования устойчивой работы подшипников скольжения с вязкоупругой смазочной композицией: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04, 05.13.18 / И. А. Журба; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2005. - 24 с.
9. Улучшение рабочих характеристик радиальных подшипников скольжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / О.И. Рабецкая; ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2008.- 21 с.
10. Шаров Г.И., Ерохин И.А., Осипенко Ю.В. Применение системы энергосбережения в поршневых ДВС. // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на транспорте: Труды третьего международного симпозиума по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО-2005». – СПб Изд-во СПбГПУ, 2005. С. 212 – 215.
11. Бреки А.Д., Васильева Е.С., Толочко О.В., Сергеев Н.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 144с.
12. Бреки А.Д., Васильева Е.С., Толочко О.В., Сергеев Н.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е. Триботехнические свойства жидких смазочных композиционных материалов, содержащих полученные методом газофазного синтеза высокодисперсные дисульфид и диселенид вольфрама: монография / под. ред. А.Д. Бреки – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 152с.
13. Бреки А.Д., Кудрявцев В.В., Диденко А.Л., Васильева Е.С., Толочко О.В., Сергеев Н.Н., Стариков Н.Е., Гвоздев А.Е. Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и

наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография / под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 128с.
14. Бреки А.Д., Васильева Е.С., Толочко О.В., Стариков Н.Е., Сергеев Н.Н., Провоторов Д.А., Сергеев А.Н., Гвоздев А.Е. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама: монография / под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 276 с.
15. Медведева В.В., Скотникова М.А., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Фадин Ю.А., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е. Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч1. С.57-65.
16. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А., Толочко О.В., Васильева Е.С., Сергеев А.Н., Провоторов Д.А., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках качения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч1. С.78-86.
17. Бреки А.Д., Медведева В.В., Фадин Ю.А., Толочко О.В., Васильева Е.С., Сергеев Н.Н., Провоторов Д.А., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Титова Ю.Е. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.11. Ч1. С.171-180.
18. Будников П.П., Хорошавин Л.Б., Перепелицын В.А., Устьянцев В.М., Косолапова Э. П. О процессе форстеритообразования при обжиге дунита. // Журнал прикладной химии. №6. 1967. – С.1369-1370.

V.V. Medvedeva[1], A.D. Breki[2], N.A.Krylov[3], S.E. Aleksandrov[4]

ON THE MECHANISM OF ACTION OF ANTI-WEAR GREASE-LUBRICATING COMPOSITE MATERIAL CONTAINING A MIXTURE OF HYDROSILICATES OF

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Abstract

The paper discussed the possible mechanism of action of anti-wear greasy lubricating composite material containing a mixture of magnesium silicate - serpentine and talc. Proposed schematic model of the formation of secondary structures on the friction surfaces. Implemented evaluation greasy lubricant antiwear properties of the composite material.

Key words: magnesium hydrosilicates, disperse particles, talc, serpentine, plastic lubricant, friction, wear, lubrication.

REFERENCES

[1] Pogodaev L. I., Kuzmin V. N. Structural and energetic model of reliability of materials and machine parts. – SPb.: Academy of transport of the Russian Federation, 2006. 608 p.
[2] Increase the service life of rolling bearings using the grease-like lubricating materials with ultrafine alazopram: author. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.02 / S. G. Goksenin; Krasnoyarsk state technical University. - Krasnoyarsk, 2002. 20 p.
[3] Improving the durability of the hypoid gear the use of solid additives to the lubricant: author. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.02 / D. A. Marinosci; Siberian state technological University. - Krasnoyarsk, 2008. - 20 p.
[4] The performance improvement of bearings as the terms of the application of modified lubricants: author. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.02 / A. A. Sharonov; Krasnoyarsk state technical University. - Krasnoyarsk, 2005. - 18 p.
[5] Solid composite additives on the basis of metallized graphite for plastic lubricants: author. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.04 / H. A. Hussein; Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences. – St. Petersburg, 2009. - 18 p.
[6] Breki A. D. Tribological properties of modified lubricating oils. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences / Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg, 2011. – 161 p.
[7] Breki A. D. Tribological properties of modified lubricating oils. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences / Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg, 2011. – 19 p.
[8] Unsteady mathematical model for predicting stable-hand work sliding bearings with viscoelastic lubricant composition: abstract. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.04, 05.13.18 / A. I. Zhurba; Rostov state University of means of communication. – Rostov-on-don, 2005. – 24 p.
[9] Improved performance radial bearings: author. dis. candidate. tech. Sciences: 05.02.02 / O. I. Rabetskaya; FGOU VPO "Siberian Federal University". – Krasnoyarsk, 2008.- 21 p.
[10] Balls, G. I., Erokhin A. I., Osipenko, Yu. V. Application of energy saving systems in reciprocating internal combustion engines. // Increase the wear resistance and durability of machines and mechanisms in transportation: Proceedings of the third international Symposium on friction machinery transport "TRANSCRIBO-2005". – Saint-Petersburg Publishing house of SPbSPU, 2005. Pp. 212 – 215.
[11] Breki D. A., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Sergeev N. N., Gvozdev, A. E., Starikov N. E. Liquid lubricating composites containing highly

dispersed fillers for units control systems: monograph. – Tula: Publishing house of Tula state University, 2014. 144 p.
[12] Breki D. A., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Sergeev N. N., Gvozdev, A. E., Starikov N. E. Tribological properties of liquid lubricating composite material containing obtained by the method of gas-phase synthesis of highly disulfide and tungsten diselenide: monograph / under. edited by A. D. Breki – Tula: Publishing house of Tula state University, 2014. 152 p.
[13] Breki A. D., Kudryavtsev V. V., Didenko A. L., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Sergeev N. N., Elderly N. E., Gvozdev A. E. Tribological properties of composite coatings with polyimide matrices and fillers of nanoparticles of dichalcogenides of tungsten for friction machines: monograph / under the editorship of A. D. Breki. Tula: Publishing house of TSU, 2015. 128 p.
[14] Breki D. A., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Starikov N. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A., Sergeev A. N., Gvozdev A. E. Tribological characteristics of liquid lubricants and a polyimide composite materials containing a friction reducing nanoparticles of dichalcogenides of tungsten: monograph / under the editorship of A. D. Breki. Tula: Publishing house of TSU, 2015. 276 p.
[15] Medvedev V. V., Skotnikova M. A., A. D. Breki, Krylov N. And., Fadin Yu. A., Sergeev A. N., Provotorov D. A., Gvozdev, A. E., Starikov N. E. Evaluation of the influence of particle size and concentration of the powders of rocks on the antiwear properties of liquid lubricant compositions // proceedings of Tula state University. Technical Sciences. 2015. Vol.11. CH1. Pp. 57-65.
[16] Breki A. D., Medvedev V. V., Fadin, Y. A., Tolochko O. V., Vasilyeva E. S., Sergeev A. N., Provotorov D. A., Gvozdev, A. E., Starikov N. E. The influence of lubricating composite material with nanoparticles of tungsten disulfide friction bearings // proceedings of Tula state University. Technical Sciences. 2015. Vol.11. CH1. Pp. 78-86.
[17] Breki A. D., Medvedev V. V., Fadin, Y. A., Tolochko O. V., Vasilyeva E. S., Sergeev N. N., Provotorov D. A., Gvozdev, A. E., Starikov N. E., Titova Yu. e. Influence of lubricating composite material with nanoparticles of tungsten diselenide on friction in rolling bearings // proceedings of Tula state University. Technical Sciences. 2015. Vol.11. CH1. Pp. 171-180.
[18] Budnikov p. P., L. B. Khoroshavin, V. A. perepelitsyn, V. M. Ustyantsev, Kosolapova E. P. About the process of forsteritovaja during firing of dunite. // Russian journal of applied chemistry. No. 6. 1967. Pp. 1369-1370.

УДК 621.01; DOI 10.1872/MMF-2016-48

Д. С. Пелупесси[1], М.В.Жавнер[2]

ПРУЖИННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ ДЛЯ ШАГОВЫХ ПРИВОДОВ

[1]Данни Самуел Пелупесси, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: pelupessy.d@yandex.ru.

[2]Милана Викторовна Жавнер, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: zhavner_mv@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассматриваются пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном, предназначенные для шаговых приводов с рекуперацией энергии. Рассмотрены и проанализированы их основные характеристики. Предлагается использовать пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном для нереверсивных и реверсивных приводов для шаговых круговых перемещений.

Ключевые слова: пружинные аккумуляторы, шаговые приводы, потенциальная энергия, рекуперация энергии, быстродействие, нереверсивное движение, реверсивное движение.

В работе рассмотрены пружинные приводы, которые в отличие от традиционно используемых шаговых приводов, характеризуются значительно меньшими энергозатратами [5,6]. Пружинным аккумуляторам посвящено значительное количество работ, но тем не менее в технической литературе отсутствует информация о характеристиках пружинных аккумуляторов и методиках их расчёта и, они не находят широкого применения в конструкторских разработках[1,2,4,13]. Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном используются в приводах с рекуперацией энергии для шаговых перемещений и уравновешивающих устройств [7-9]. Другой областью применения пружинных аккумуляторов могут быть приводы с возвратно-поступательным перемещением [15].

Для выполнения межоперационного транспортирования заготовок используются транспортно-накопительные системы, поворотные столы, работающие в шаговом режиме, конвейерные системы и карусельные

машины с шаговым приводом. Такие системы могут осуществлять как нереверсивное, так и реверсивное движение.

На рисунке 1 представлена схема нереверсивного пружинного привода с рекуперацией энергии для круговых шаговых перемещений.

На рисунке 2 представлена схема реверсивного шагового привода.

При разработке реверсивного пружинного шагового привода требуется обеспечить фиксирование выходного звена в точке неустойчивого равновесия и обеспечить заданное направление движения.

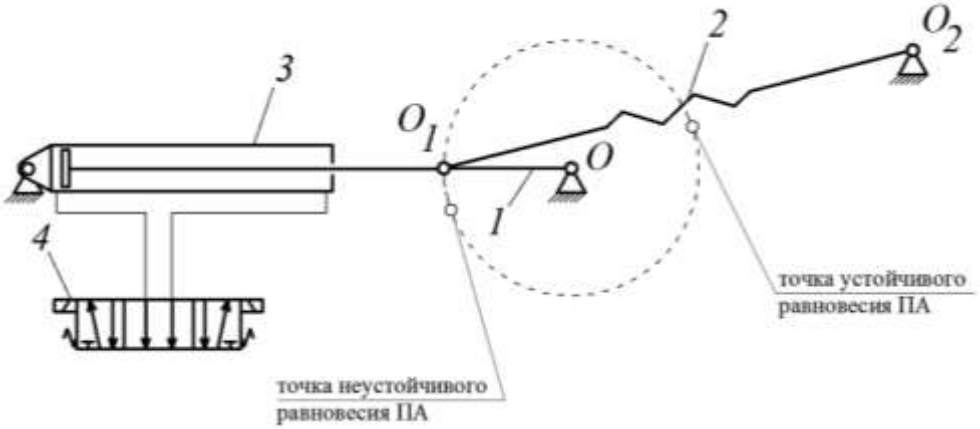


Рисунок 1. Схема нереверсивного пружинного привода:
1 – поворотное звено, *2* – пружина, *3* – пневмоцилиндр,
4 – распределитель.

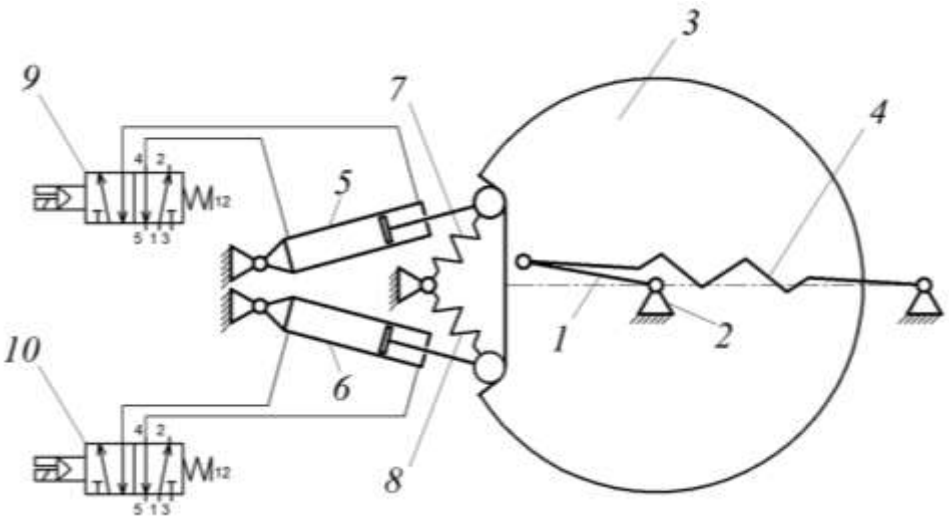


Рисунок 2. Схема реверсивного пружинного привода: *1* – поворотное звено, *2* – основание, *3* – диск, *4* – пружина, *5,6* – пневмоцилиндры, *7,8* – пружины, *9,10* – распределители.

В качестве основного двигателя для вышеприведенных приводов могут быть использованы пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном на базе пружин растяжения и сжатия, представленные на рисунках 3–5.

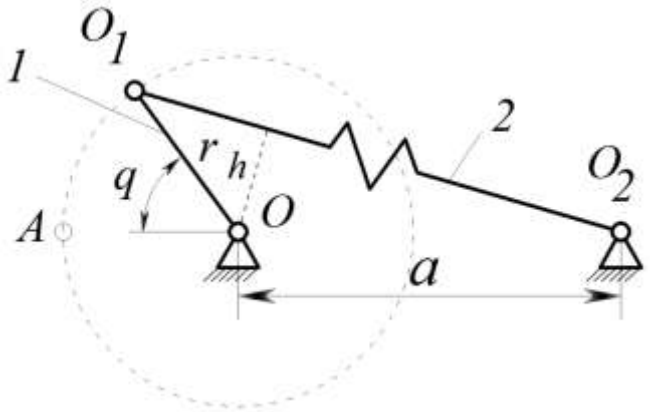


Рисунок 3. Схема пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном и пружиной растяжения: *1* – поворотное звено, *2* – пружина.

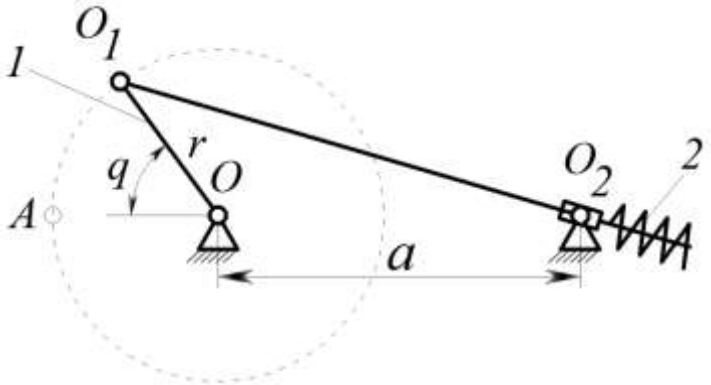


Рисунок 4. Схема пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном и пружиной сжатия: *1* – поворотное звено, *2* – пружина.

На рисунке 5 представлена схема пружинного аккумулятора, в котором поворотное звено соединяется с пружиной через гибкий элемент, например, трос или стальную ленту.

Применение пружинного аккумулятора с гибким элементом расширяет возможности различных компоновочных решений.

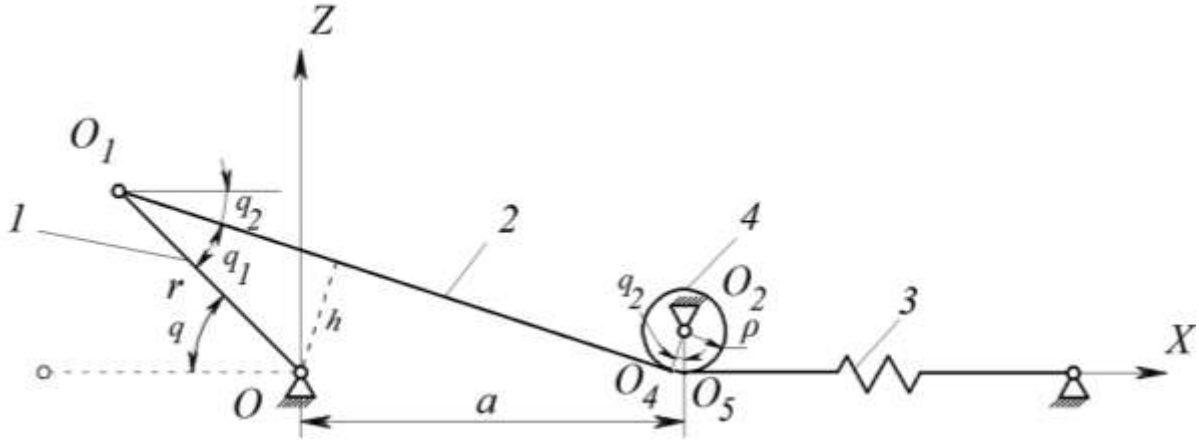


Рисунок 5. Схема пружинного аккумулятора с гибким элементом: *1* – поворотное звено, *2* – гибкий элемент, *3* – пружина, *4* – блок.

Основными характеристиками пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном являются:

1. Закон изменения потенциальной энергии в зависимости от угла поворота
2. Зависимость усилия пружины от угла поворота выходного звена
3. Жесткость и максимальное усилие пружины
4. Приведенный к оси выходного звена момент трения в шарнирах
5. Закон изменения движущего момента.
6. Зависимость скорости выходного звена от угла поворота
7. Время поворота на заданный угол, при заданных моменте инерции и жесткости пружины.

Основной характеристикой пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном является моментная характеристика, определяющая закон движения.

В общем виде она записывается в виде уравнения:

$$M = P_{\text{пр}} h \qquad (1)$$

где $P_{\text{пр}} = cL_{\text{пр}}$ – усилие пружины;

h – плечо вращающего момента;

$L_{\text{пр}}$ – удлинение пружины;

c – жесткость пружины.

$$L_{\text{пр}} = \sqrt{r^2 + a^2 + 2ar\cos q} - L_0 \qquad (2)$$

$$h = \frac{ar\cos q}{\sqrt{r^2+a^2+2ar\cos q}} \qquad (3)$$

где $r=OO_1$ – радиус поворотного рычага;

$a=OO_2$ – межосевое расстояние;

q – текущий угол поворота выходного звена.

С учетом уравнений (2) и (3), уравнение (1) примет вид:

$$M = acr\sin q\left(1 - \frac{a-r}{\sqrt{r^2+a^2+2ar\cos q}}\right) \qquad (4)$$

Межосевое расстояние определяется выбранной пружиной, которая характеризуется максимальным усилием P_{max}, жесткостью пружины c и коэффициентом удлинения $K_{\text{у}}$ [5].

Так как максимальное удлинение пружины в рассматриваемых пружинных аккумуляторах равно $2r$, то $L_0 = \frac{2r}{K_{\text{у}}}$.

Межосевое расстояние равно:

$$a = r + \frac{2r}{K_{\text{у}}}$$

Или в безразмерном виде с учетом того, что $a' = \frac{a}{r}$:

$$a' = 1 + \frac{2}{K_{\text{у}}} \qquad (5)$$

Коэффициент удлинения пружины для стандартных цилиндрических пружин лежит в пределах от 0,5 до 4, поэтому $a' \in 1{,}5 \ldots 5$ [5].

Тогда уравнение (4) запишем в виде:

$$M = cr^2 M' \qquad (6)$$

где $M' = a' \sin q \cdot \left(1 - \frac{a'-1}{\sqrt{1+a'^2+2a' \cos q}} \right)$ – зависимость, позволяющая определить вид моментной характеристики в общем безразмерном виде.

На рисунке 6 показано семейство безразмерных моментных характеристик пружинного аккумулятора, при различных значениях межосевого расстояния и единичном радиусе выходного поворотного звена.

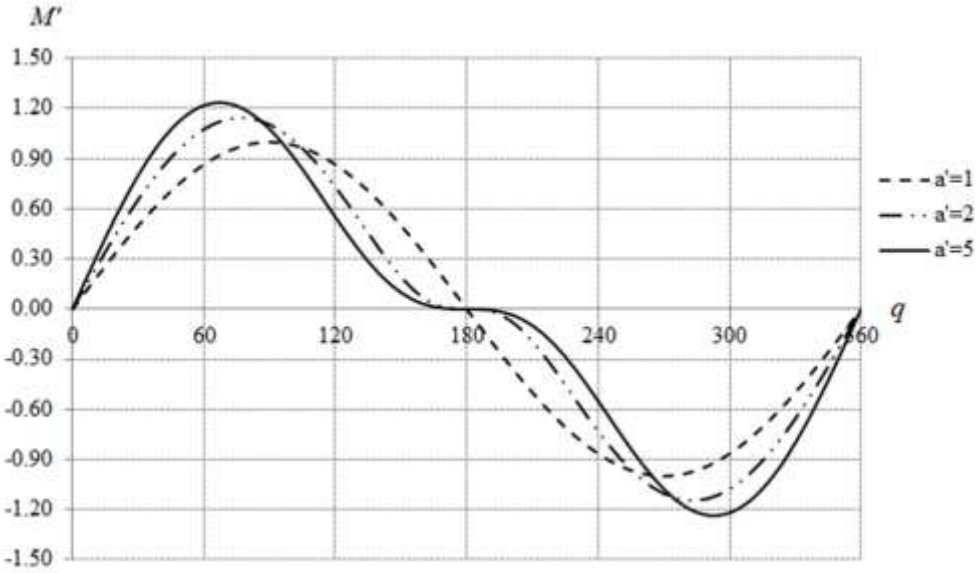


Рисунок 6. Моментная характеристика пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном

Следует отметить, что при увеличении межосевого расстояния, максимальное значение момента увеличивается и смещается к положению неустойчивого равновесия.

Значение параметра $a' = 1$ соответствует синусному аккумулятору [3,11,12,14]. Пружинный аккумулятор с синусной характеристикой невозможно реализовать с углом поворота равным 2π из-за динамических и конструктивных ограничений. Однако, грузовой аккумулятор позволяет реализовать привод с углом поворота равным 2π [14].

В пружинных приводах на базе рассматриваемых аккумуляторов используется или участок моментной характеристики, расположенный между точками неустойчивого равновесия, или участок моментной характеристики с углом поворота 2π, смещенный от точки неустойчивого равновесия на угол q^* (рис.7). Направление смещения определяет направление поворота в нереверсивном шаговом приводе [5].

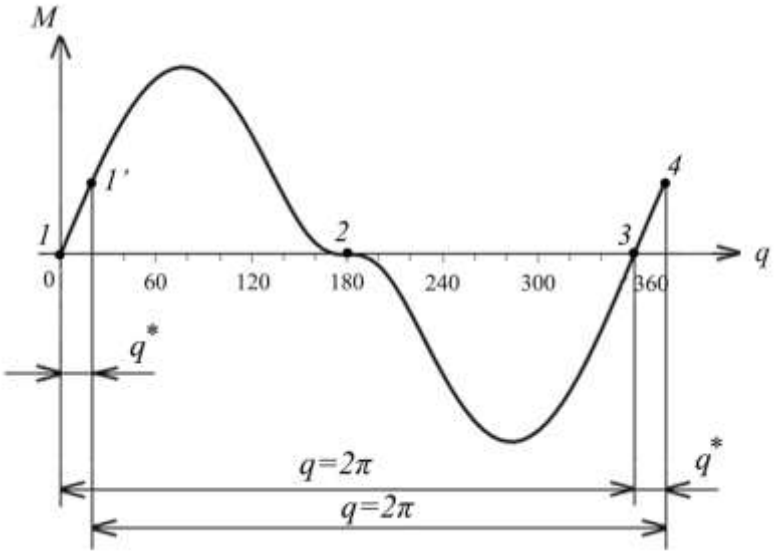


Рисунок 7. Моментная характеристика пружинного аккумулятора

Определим законы изменения потенциальной энергии для пружинных аккумуляторов.

Для пружинных аккумуляторов (рис.3,4), при одинаковой жесткости c и радиусе поворотного звена r, максимальная потенциальная энергия в положении неустойчивого равновесия равна:

$$V_{max} = 2cr^2 \quad (7)$$

Текущее значение потенциальной энергии определяется следующим выражением:

$$V_т = \frac{cL_{пр}{}^2}{2} \quad (8)$$

$$V_т = cr^2\, V_т'$$

где $V_т' = \frac{\left(\sqrt{1+a'^2+2a'\cos q}-(a'-1)\right)^2}{2}$ – уравнение, определяющее значение потенциальной энергии в безразмерном виде.

Текущее значение потенциальной энергии в зависимости от угла поворота для всех представленных выше схем будут определяться их конструктивными параметрами. Графики, определяющие значения потенциальной энергии в безразмерном виде в зависимости от угла поворота для граничных значений параметра a'представлены на рисунке 8.

Базовое время поворота при заданном приведенном моменте инерции J определяются жесткостью пружины c и конструктивными параметрами пружинного аккумулятора: размерами a и r.

Определим время поворота, пренебрегая диссипативными потерями, между точками неустойчивого равновесия, которые являются точками остановки, поскольку в них скорость обращается в нуль.

Такое одномерное финитное движение является колебательным, и время прохождения между крайними точками определяется из решения интегрального уравнения [10]:

$$t = \sqrt{\frac{J}{2}} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{dq}{\sqrt{V_{max} - V_T}} \qquad (9)$$

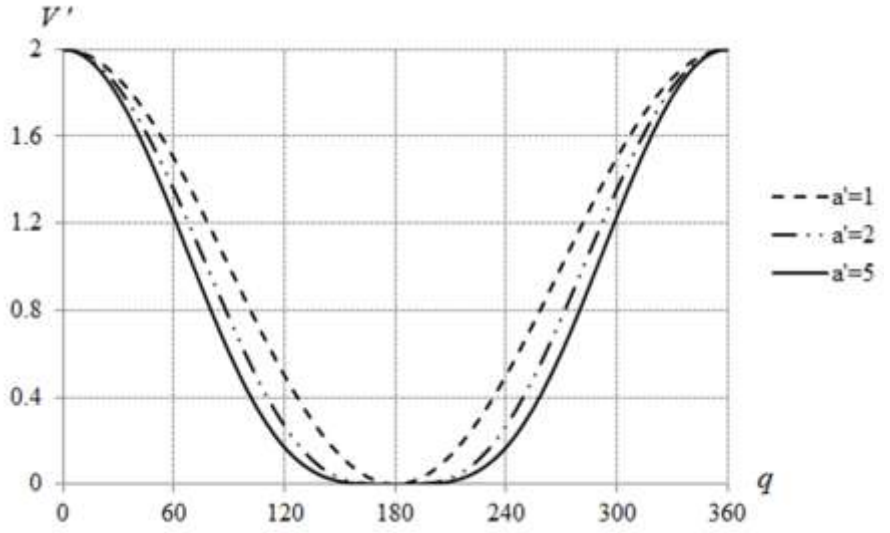


Рисунок 8. Зависимость потенциальной энергии пружинного аккумулятора от угла поворота при различных значениях параметра a'.

Решение интегрального уравнения (9) позволяет определить базовое время поворота выходного звена между двумя точками неустойчивого равновесия.

Уравнение (9) можно записать в виде:

$$t = \int_0^{2\pi} \frac{dq}{\dot{q}(q)} = \frac{1}{2r}\sqrt{\frac{J}{c}} \cdot K_{tq} \qquad (10)$$

где $K_{tq} = \int_0^{2\pi} \frac{dq}{\sqrt{1 - \frac{\left(\sqrt{1 + a'^2 + 2a'\cos q} - (a' - 1)\right)^2}{4}}}$

Решение уравнения (10) с учетом выражений (7) и (8) позволяет определить время поворота для единичных значений жесткости и приведенного момента инерции.

В таблице 1 даны значения времени поворота при перечисленных выше условиях.

Таблица 1.

a'	1	2	3	4	5
K_{tq}	24,5	21,6	20,5	20,0	19,6

Преобразовав уравнение (10) найдем жесткость пружины:

$$c = \frac{JK_{tq}^2}{4r^2t^2}$$

Закон изменения скорости определяется из уравнения:

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{2(V_н - V_т)}{J}} \qquad (11)$$

Законы изменения угловой скорости представлены на рисунке 9.

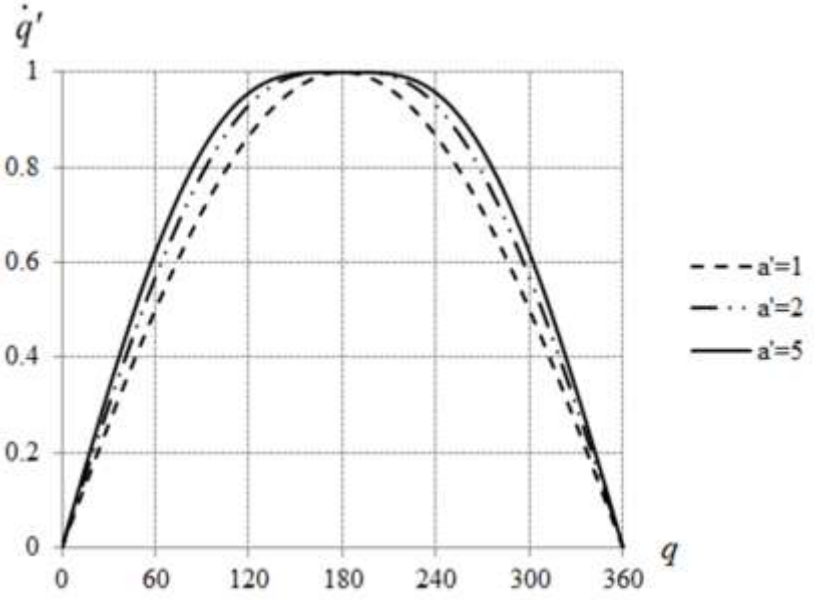


Рисунок 9. Зависимость безразмерной характеристики угловой скорости пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном при различных значениях параметра a'.

Следует отметить, что изменение геометрических характеристик, в частности, увеличение a' приводит к увеличению быстродействия и уменьшению времени поворота.

При предварительном расчете для углов 2π выбираем $a=3r$.

Если конструкция позволяет увеличить размер a, то можно выбирать $a' > 5$, что позволяет уменьшить жесткость пружины и увеличить быстродействие, тем более что это легко объясняется конструктивно.

Для всех вариантов использования пружинных аккумуляторов у них будет общее правило выбора характеристики пружины:

1. Максимальное рабочее удлинение пружины при отсутствии предварительного натяжения равно $2r$.
2. Максимальное усилие пружины равно $2cr$.
3. Максимальное начальное рабочее усилие определяется $M_н = M(q)$
4. Закон изменения скорости определяется из уравнения

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{2(V_н - V_т)}{J}},$$

где J – приведенный момент нагрузки к выходному звену.

Наилучшее приближение к синусной моментной характеристике можно получить в пружинных аккумуляторах с гибким элементом, в котором поворотный рычаг соединен с пружиной посредством гибкого элемента.

При фиксации поворотного звена в точке неустойчивого равновесия, данные приводы применимы как для нереверсивного движения, так и для реверсивного движения. При необходимости обеспечения направленного движения, точку фиксации необходимо смещать на небольшой угол в сторону направления движения, что обеспечивает создание момента, необходимого для осуществления начала движения.

В работе исследовано влияние конструктивных параметров пружинных аккумуляторов на законы движения и даны рекомендации для разработки щаговых пружинных приводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1323378 СССР. Механическая рука/ Л.М.Болотин, А.И.Корендясев, Б.Л.Саламандра, Л.И.Тывес. // Бюл., №11. 1987.
2. А.с. 1544550 СССР. Резонансный привод/ В.И.Бабицкий, А.А.Котлячков, В.А.Чечуров, А.В.Шипилов, В.Н.Панин// Бюл., № 7. 1990.
3. Баутин Н.Н. Динамическая теория часов: Стабилизация периода в колебательных системах с двумя степенями свободы. М.: Наука. 1986. 192с.
4. Глушков А.А. Исследование и разработка быстродействующих поворотных цикловых приводов колебательного типа: дисс. ... канд. техн. наук. Владимир, ВлГУ, 2006. – 148 с.
5. Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Жавнер М.В. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений/ Palmarium Academic Publishing, 2014. 90 с.
6. Жавнер М.В. Методы расчета и проектирования исполнительных устройств робототехнических систем на базе пружинных механизмов: автореф. дисс. …канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПБГПУ, 2003. 18 с.
7. Зайцев В.В., Корендясев А.И., Литовченко А.П., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И., Шишков В.С. и Сачков Л.Б. Промышленный робот. Заявл.21.01.88. 15.10.92. Бюл.№38. Патент № 1768381SU
8. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. М.: Наука. 2006. 376 с.
9. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Жавнер В.Л. и др. Манипуляционные системы роботов. М.: Машиностроение. 1989. 471 с.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие.— В 10-ти т. Т. I. Механика. — 4-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.—216 с.
11. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Том 2. Учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1983. 621 с.
12. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. М.: Наука. 1991. 256 с.
13. Семеноженков В.С. Разработка теории, методов проектирования и создание рекуператорных средств механизации кузнечно-штамповочного производства: дисс. ... д-ра техн. наук. Воронеж, ВГТУ, 1999. 366 с.
14. Феоктистова Н.А. Гидромеханические рекуперативные приводы промышленных роботов для механизации погрузочно-разгрузочных работ: дисс. ... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1988. 276 с.
15. V.L. Zhavner and O.N. Matsko. Spring drives for reciprocal motion, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, No.1, pp.1-5. ©Allerton Press Inc., 2016.

D.S.Pelupessy[1], M.V.Zhavner[2]

SPRING ACCUMULATORS FOR STEPPER DRIVES

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper is presented to review the spring-loaded accumulators with the output rotary link intended for stepper drives with recuperation energy. Reviewed and analyzed their characteristics and scopes. It is primarily proposed to use a spring-loaded accumulator with the output rotary link for the irreversible and reversible drives for stepper circular movements.

Key words: spring accumulators, stepper drives, potential energy, recuperation energy, high-speed, non-reversing motion, reversing motion.

REFERENCES

[1] Bolotin L.M., Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. The mechanical arm, A.s. USSR No.1323378. Bulletin No.11. 1987. (rus.)
[2] Babitskiy V.I., Kotlyachkov A.A., Chechurov V.A., Shipilov A.V., Panin V.N. Resonant actuator, A.s. USSR No. 1544550. Bulletin No.7, 1990. (rus.)
[3] Bautin N.N. Dynamic theory of watches: Stabilization period in oscillatory systems with two degrees of freedom // Nauka. 1986. 192 p. (rus.)

[4] Glushkov A.A. Research and development of high-speed rotary cyclic drives of oscillatory type: diss. ... kand. tekhn. nauk . Vladimir: VlTU Publ., 2006. 148 p. (rus.)
[5] Zhavner V.L., Zhavner M.V., Matsko O.N. Recuperative drives for cyclic movement/ Palmarium Academic Publishing, 2014. – 90 p. (rus.)
[6] Zhavner M.V. Methods of calculation and design of actuators for robotic systems based on the spring mechanisms: avtoref. diss. …kand. tekhn. nauk, St.Petersburg, SPbGPU Publ., 2003. 18 p. (rus.)
[7] Zaytsev V.V., Korendyasev A.I., Litovchenko A.P., Salamandra B.L., Tyves L.I., Shishkov V.S. i Sachkov L.B., Industrial robot, Patent RF, 1768381SU . Prioritet 21.01.88. 15.10.92. Byul. No.38. (rus.)
[8] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. The basic theory of robot technology. 2nd Vol. – M.: Nauka. – 2006. – 376 p. (rus.)
[9] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. et al. Manipulative robotic systems. – M.: Mashinostroenie. – 1989. – pp.279-286. (rus.)
[10] Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics. – Vol.1. Mechanics. 4th edition, revised . – M.: Nauka. Chief editor in chief of physic-mathematical literature. 1988. – 216 p. (rus.)
[11] Loytsyanskiy L.G., Lurye A.I. Short course of theoretical mechanics. 2nd Vol. Moscow, Nauka, 1983. 621 p. (rus.)
[12] Panovko Ya.G. Introduction to the theory of mechanical vibrations. Moscow, Nauka. 1991. 256 p. (rus.)
[13] Semenozhenkov V.S. Development of theory, methods of design and creation of a recuperation devices of mechanization of forging and forming production : diss. ... d-ra. tekhn. nauk. Voronezh: VGTU Publ., 1999. 366 p. (rus.)
[14] Feoktistova N.A. Hydromechanical recuperative actuators of industrial robots for mechanization of loading and unloading: diss. ... kand. tekhn. nauk, St.Petersburg, SPbGPU Publ., 1988. 276 p. (rus.)
[15] V.L. Zhavner and O.N. Matsko. Spring drives for reciprocal motion, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, No.1, pp.1-5. ©Allerton Press Inc., 2016.

УДК 01-436 ; DOI 10.1872/MMF-2016-49

В.А.Пухлий

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Владимир Александрович Пухлий, д.т.н., профессор
Севастопольский государственный университет
Россия, Севастополь
E-mail: pu1611@rambler.ru

Аннотация

Рассматривается проблема расчета напряжения деформированного состояния деталей машин и механизмов, изготовленных из анизотропных материалов, широко применяемых в современном машиностроении, самолетостроении, ракетной технике. Изложены методы расчета приводятся применительно к рабочим лопаткам центробежных нагнетателей. Для решения краевой задачи используется модифицированный метод последовательных приближений, разработанный автором. В качестве примера приводится пример расчета лопатки, изготовленный из ортотропного материала КАСТ-В. Показывается, что учет анизотропии, возникающий вследствие несогласованных главных осей упругого ортотропного материала с расчетными осями лопатки обязателен.

Ключевые слова: Анизотропные материалы, теория оболочек, расчет на прочность, лопатки центробежных турбомашин, модифицированный метод последовательных приближений

Введение. В настоящее время известны многочисленные подходы к определению напряженно-деформированного состояния деталей машин и механизмов, основанные на теории пластин и оболочек. Эти методы разработаны, как правило, для изотропных материалов. Между тем в современном машиностроении, в особенности в самолетостроении и ракетной технике, широко начали применяться полимерные материалы, характеризующиеся ортотропностью упругих свойств. Для ортотропного материала важен учет анизотропии, возникающей вследствие несовпадения главных осей упругости материала с расчетными осями. В результате этого при проектировании элементов машин и механизмов, важное значение приобретает правильная ориентация материала, позволяющая более рационально использовать его свойства. Широкое распространение находят также материалы с общей анизотропией упругих свойств. Таким образом, актуальность разработки методов расчета деталей машин и механизмов, изготовленных из анизотропных материалов, очевидна.

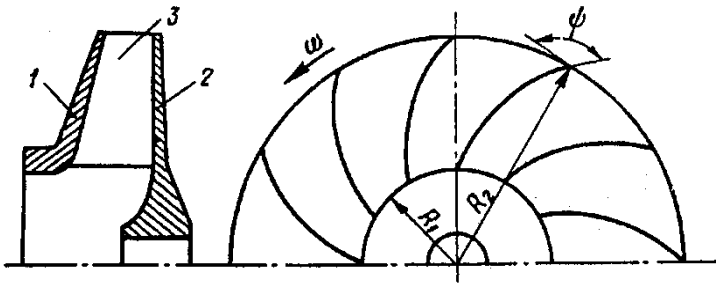


Рис. 1. Схема рабочего колеса центробежного нагнетателя:
1 – передний диск; 2 – основной диск; 3 – лопатка

В настоящем докладе рассматривается расчет напряженно-деформированного состояния анизотропных трапециевидных лопаток центробежных турбомашин (рис. 1).

Для описания поведения лопатки использована линейная теория пологих анизотропных оболочек [1]. Исходная система уравнений в частных производных относительно функции напряжений F (x, y) и нормального перемещения W (x, y) вариационным методом Бубнова-Власова приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, аналитическое решение которой в дальнейшем строится модифицированным методом последовательных приближений [3,4].

Формулировка задачи

Исследуем напряженно-деформированное состояние трапециевидной анизотропной лопатки, защемленной по двум сторонам, прилегающим к дискам (допускается смещение в срединной плоскости), и свободной по двум другим сторонам (рис.2) в поле действия сил инерции собственной массы лопаток.

Для анализа воспользуемся теорией изгиба тонких анизотропных оболочек [1], основанной на следующих допущениях: 1) принята гипотеза прямых нормалей; 2) материал в каждой точке имеет одну плоскость упругой симметрии, параллельную срединной поверхности оболочки.

Исходя из этого, уравнения обобщенного закона Гука запишем в виде:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy};\\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy};\\ \varepsilon_{xy} &= a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где a_{ik} – упругие константы.

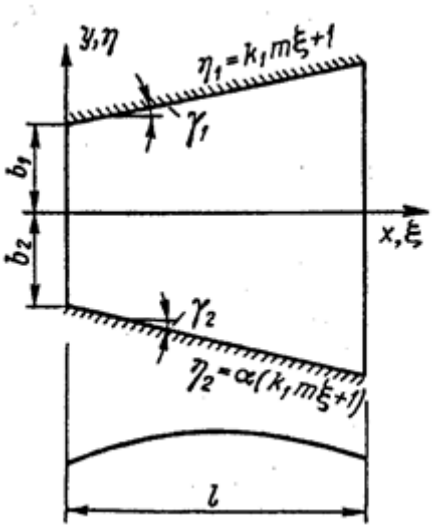


Рис. 2. Геометрия и система координат лопатки
центробежного нагнетателя

Дифференциальные уравнения изгиба цилиндрических анизотропных оболочек относительно функции прогиба W (x, y) и функции напряжений F (x, y) в поле действия центробежных сил инерции представим следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} L_1(D_{ik})W + \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= q - p_x\frac{\partial W}{\partial x};\\ L_2(A_{ik})F - \frac{1}{R}\cdot\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= -\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Здесь q и p_x – нормальная и тангенциальная составляющие центробежной нагрузки; U – потенциал тангенциальной нагрузки. По форме уравнения (2) совпадают с известными уравнениями Маргерра для изотропных оболочек [2].

Дифференциальные операторы $L_1(D_{ik})$ и $L_2(A_{ik})$ имеют вид:

$$\begin{aligned} L_1(D_{ik}) &= D_{11}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 4D_{16}\frac{\partial^4}{\partial x^3\partial y} + 2(D_{12}+2D_{66})\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2} + 4D_{26}\frac{\partial^4}{\partial x\partial y^3} + D_{22}\frac{\partial^4}{\partial y^4};\\ L_2(A_{ik}) &= A_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^4} - 2A_{26}\frac{\partial^4}{\partial x^3\partial y} + 2(A_{12}+A_{66})\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial y^2} - 2A_{16}\frac{\partial^4}{\partial x\partial y^3} + A_{11}\frac{\partial^4}{\partial y^4}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где D_{11}, D_{22} – изгибные жесткости по главным направлениям; D_{16}, D_{12}, D_{26} – побочные жесткости; D_{66} – крутильная жесткость.

Коэффициенты A_{ik} выразим через значения жесткостей:

$$\left.\begin{aligned} A_{11} &= \left(C_{22}C_{66} - C_{26}^2\right)\Omega_1^{-1}; \\ A_{22} &= \left(C_{11}C_{66} - C_{16}^2\right)\Omega_1^{-1}; \\ A_{12} &= \left(C_{16}C_{26} - C_{12}C_{26}\right)\Omega_1^{-1}; \\ A_{66} &= \left(C_{11}C_{22} - C_{12}^2\right)\Omega_1^{-1}; \end{aligned}\right\} \qquad \left.\begin{aligned} A_{16} &= \left(C_{12}C_{26} - C_{16}C_{22}\right)\Omega_1^{-1}; \\ A_{26} &= \left(C_{12}C_{16} - C_{26}C_{11}\right)\Omega_1^{-1}; \\ \Omega_1 &= \left(C_{11}C_{22} - C_{12}^2\right)C_{66} + \\ &+ 2C_{12}C_{16}C_{26} - C_{11}C_{26}^2 - C_{22}C_{16}^2. \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Жесткости оболочки C_{ik} и D_{ik} связаны с упругими константами следующим соотношениями:

$$C_{ik} = hB_{ik}; \qquad D_{ik} = \frac{h^3}{12}B_{ik}, \tag{5}$$

где

$$\left.\begin{aligned} B_{11} &= \left(a_{22}a_{66} - a_{26}^2\right)\Omega^{-1}; \\ B_{22} &= \left(a_{11}a_{66} - a_{16}^2\right)\Omega^{-1}; \\ B_{12} &= \left(a_{16}a_{26} - a_{12}a_{66}\right)\Omega^{-1}; \\ B_{66} &= \left(a_{11}a_{22} - a_{12}^2\right)\Omega^{-1}; \end{aligned}\right\} \qquad \left.\begin{aligned} B_{16} &= \left(a_{12}a_{26} - a_{22}a_6\right)\Omega^{-1}; \\ B_{26} &= \left(a_{12}a_{16} - a_{11}a_{26}\right)\Omega^{-1}; \\ \Omega &= \left(a_{11}a_{22} - a_{12}^2\right)a_{66} + 2a_{12}a_{16}a_{26} - \\ &- a_{11}a_{26}^2 - a_{22}a_{16}^2. \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Для ортотропного материала с главными осями упругой симметрии, повернутыми относительно осей x, y на угол φ, имеем [1]:

$$\left.\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\cos^4\varphi}{E_1} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_1}{E_1}\right)\sin^2\varphi\cos^2\varphi; \\ a_{22} &= \frac{\sin^4\varphi}{E_1} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_2}{E_2}\right)\sin^2\varphi\cos^2\varphi; \\ a_{12} &= \left(\frac{1+\nu_1}{E_1} + \frac{1+\nu_2}{E_2} - \frac{1}{G}\right)\frac{1}{4}\sin^2 2\varphi - \frac{\nu_1}{E_1}; \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} a_{66} &= \left(\frac{1+\nu_1}{E_1} + \frac{1+\nu_2}{E_2} - \frac{1}{G}\right)\sin^2 2\varphi + \frac{1}{G}; \\ a_{16} &= \left[\frac{\sin^2\varphi}{E_2} - \frac{\cos^2\varphi}{E_1} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_1}{E_1}\right)\cos 2\varphi\right]\sin 2\varphi; \\ a_{26} &= \left[\frac{\cos^2\varphi}{E_2} - \frac{\sin^2\varphi}{E_1} - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_2}{E_2}\right)\cos 2\varphi\right]\sin 2\varphi. \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Введя безразмерные координаты $\xi = \frac{x}{l}$ и $\eta = \frac{y}{b_1}$, приведем уравнения (2) к следующему виду:

$$\left.\begin{aligned} \nabla_m^4\overline{W} + \frac{m^2 pl^2}{RD_{11}A_{22}}\frac{\partial^2\overline{F}}{\partial\eta^2} &= 1 - \frac{p_x l^3}{D_{11}}\frac{\partial\overline{W}}{\partial\xi}; \\ \nabla_m^4\overline{F} - \frac{m^2 l^2}{pR}\frac{\partial^2\overline{W}}{\partial\eta^2} &= -\frac{l^2}{p^2}\frac{\partial^2 U}{\partial\xi^2}. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Здесь дифференциальные операторы $\nabla_m^4\overline{W}$ и $\nabla_m^4\overline{F}$ имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}\nabla_m^4\overline{W} &= \frac{\partial^4\overline{W}}{\partial\xi^4} + 4d_1 m\frac{\partial^4\overline{W}}{\partial\xi^3\partial\eta} + 2d_2m^2\frac{\partial^4\overline{W}}{\partial\xi^2\partial\eta^2} + 4d_3m^3\frac{\partial^4\overline{W}}{\partial\xi\partial\eta^3} + d_4m^4\frac{\partial^4\overline{W}}{\partial\eta^4};\\ \nabla_m^4\overline{F} &= \frac{\partial^4\overline{F}}{\partial\xi^4} + 2b_1 m\frac{\partial^4\overline{F}}{\partial\xi^3\partial\eta} + 2b_2m^2\frac{\partial^4\overline{F}}{\partial\xi^2\partial\eta^2} + 2b_3m^3\frac{\partial^4\overline{F}}{\partial\xi\partial\eta^3} + b_4m^4\frac{\partial^4\overline{F}}{\partial\eta^4},\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

где

$$d_1 = \frac{D_{16}}{D_{11}}; \qquad d_2 = \frac{D_{12}+2D_{66}}{D_{11}}; \qquad d_3 = \frac{D_{26}}{D_{11}}; \qquad d_4 = \frac{D_{22}}{D_{11}}; \qquad b_1 = -\frac{A_{26}}{A_{22}};$$

$$b_2 = \frac{A_{12}+A_{66}}{A_{22}}; \qquad b_3 = -\frac{A_{16}}{A_{23}}; \qquad b_4 = \frac{A_{11}}{A_{22}}$$

– безразмерные жесткостные параметры лопатки $m = l/b_1$ – геометрический параметр лопатки; $\overline{W} = \frac{w}{p}$; $\overline{F} = FA_{22}/p^2$ – безразмерные величины функции прогиба и функции напряжений; $p = ql^4/D_{11}$ – параметр нагрузки.

Лопатка по краям, прилегающим к дискам ($\eta_1 = k_1 m\xi + 1$ и $\eta_2 = \alpha\eta_1$), свободно защемлена (допускается смещение кромок в плоскости лопатки). Здесь $k_1 = tg\gamma_1$; $k_2 = tg\gamma_2$; $\alpha = -\frac{k_2}{k_1} = -\frac{b_2}{b_1}$ – геометрические параметры лопатки.

Граничные условия для функции прогиба $\overline{W}(\xi,\eta)$ и функции напряжений $\overline{F}(\xi,\eta)$ для этих краев запишем следующим образом:

$$\overline{W} = \frac{\partial\overline{W}}{\partial\eta} = 0; \qquad \overline{F} = \frac{\partial\overline{F}}{\partial\eta} = 0. \qquad (10)$$

Для входной и выходной кромок лопатки $\xi = 0$ и $\xi = 1$ граничные условия имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial^2\overline{W}}{\partial\xi^2} + (d_2 - 2d_3)m^2\frac{\partial^2\overline{W}}{\partial\eta^2} + d_1 m\frac{\partial^2\overline{W}}{\partial\xi\partial\eta} = 0;\\ &\frac{\partial^3\overline{W}}{\partial\xi^3} + 4d_1 m\frac{\partial^3\overline{W}}{\partial\xi^2\partial\eta} + (d_2 + 2d_5)m^2\frac{\partial^3\overline{W}}{\partial\xi\partial\eta^2} + 2d_3m^3\frac{\partial^3\overline{W}}{\partial\eta^3} = 0;\\ &\frac{\partial^2\overline{F}}{\partial\eta^2} = -\frac{l^2A_{22}}{m^2p^2}U; \qquad \frac{\partial^2\overline{F}}{\partial\xi\partial\eta} = 0.\end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

Решение краевой задачи

К решению системы уравнений (8) применим вариационный метод Бубнова-Власова. Согласно последнему запишем решение уравнений (8) в виде разложения:

$$\overline{W} = \sum_{i=1}^{n}\varphi_i(\xi,\eta)X_i(\xi); \qquad \overline{F} = \sum_{j=1}^{n}\psi_j(\xi,\eta)X_j(\xi), \qquad (12)$$

где $\varphi_i(\xi,\eta)$ и $\psi_j(\xi,\eta)$ – аппроксимирующие функции, соответствующие геометрическим граничным условиям на косых краях; $X_i(\xi)$ и $X_j(\xi)$ – искомые функции.

Ограничиваясь двухчленным приближением, представим аппроксимирующие функции в виде степенных полиномов Якоби [5]:

$$\varphi_1 = \psi_1 = \eta^4 - 2(1+\alpha)r\eta^3 + (1+4\alpha+\alpha^2)r^2\eta^2 - 2\alpha(1+\alpha)r^3\eta + \alpha^2 r^4;$$

$$\varphi_2 = \psi_2 = \eta^5 - \frac{5(1+\alpha)}{2}r\eta^4 + 2(1+3\alpha+\alpha^2)r^2\eta^3 - \frac{1+9\alpha+9\alpha^2+\alpha^2}{2}r^3\eta^2 +$$
$$+\alpha(1+3\alpha+\alpha^2)r^4\eta - \frac{\alpha^2(1+\alpha)}{2}r^5. \qquad (13)$$

Следует отметить, что полиномы (13) на отрезке $[r, \alpha r]$ удовлетворяют условиям ортогональности

$$(\varphi_i, \varphi_k) = \int_r^r \varphi_i \varphi_k d\eta = 0 \text{ при } i \neq k.$$

Она образует систему линейно-независимых функций и удовлетворяет граничным условиям (10).

Построенные полиномы имеют еще одно важное свойство: их первые и вторые производные также ортогональны. Для доказательства рассмотрим величину

$$\cos(\varphi_i, \varphi_j) = \frac{(\varphi_i, \varphi_j)}{\|\varphi_i\|\|\varphi_j\|},$$

при этом полиномы φ_i и φ_j рассматриваются как обобщенные векторы в гильбертовом пространстве L_2 [6].

При конкретных значениях для полиномов (13) получаем:

$$\cos(\varphi_1, \varphi_2) = 0; \qquad \cos(\varphi_{1,2}, \varphi_{2,2}) = 0; \qquad \cos(\varphi_{1,22}, \varphi_{2,22}) = 0,$$

что соответствует углам, равным 90о. Здесь индекс, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по соответствующей координате, т.е. по η.

Ограничиваясь двухчленным приближением и применяя алгоритм метода Бубнова-Власова к уравнениям (8) получаем разрешающую систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами относительно искомых функций $X_m(\xi)$ в общем случае неэйлеровского типа:

$$X_m^{IV} = \sum_{\nu=1}^{4}\sum_{i=0}^{3} A_{\nu,i}^m X_\nu^i + \phi_m \qquad (\text{m} = 1, 2, 3, 4), \qquad (14)$$

где ν – номер неизвестной функции, при которой находится коэффициент $A^m_{\nu,i}$; m – номер уравнения; i – порядок производной от неизвестной функции.

В дальнейшем аналитическое решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (14) строится модифицированным методом последовательных приближений.

Модифицированный метод последовательных приближений

Уравнение (14) представляет собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений 40го порядка с переменными коэффициентами относительно искомых функций $X_m(\xi)$ в общем случае неэйлеровского типа.

Здесь аналитическое решение системы уравнений (14) строится модифицированным методом последовательных приближений [3, 4], разработанным автором для решения краевых задач математической физики. Расширение метода для решения начальных задач изложено в нашей работе [7].

В соответствии с методом переменные коэффициенты $A^m_{\nu,i}$ и свободные члены ϕ_m представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$A^m_{\nu,i} = \sum_{k=0}^{q} a^m_{\nu,i,k}\xi^k ; \qquad \phi_m = \sum_{k=0}^{q} f_{k,m}\frac{\xi^k}{k!}. \tag{15}$$

Общее решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14), полученное модифицированным методом последовательных приближений, имеет вид [3, 4]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{4m} C_\mu \left[\frac{\xi^{\mu-4m+3}}{(\mu-4m+3)!}\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X^m_{\mu,n} \right] + \sum_{j=0}^{q} b^m_{j,0}\frac{\xi^{j+4}}{(j+4)!} + \sum_{n=2}^{\infty} X^{m^*}_n \qquad (\mathrm{m}=1,2,3,4) \tag{16}$$

где $b^m_{j,0} = f_{k,m}$ (j = k); μ – номер фундаментальной функции; C_μ – произвольные постоянные интегрирования.

Первое приближение $X^m_{\mu,1}$ (m = 1, 2, 3, 4) получается из подстановки нулевого приближения $\frac{\xi^{\mu-4m+3}}{(\mu-4m+3)!}\delta$ в правую часть системы $X^{IV}_m = \sum_{\nu=1}^{4}\sum_{i=0}^{3} A^m_{\nu,i}X^i_\nu$.

В решении (16) δ = 1, если $4(m-1) < \mu \le 4m$ и δ = 0 для остальных μ:

$$X^m_{\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b^m_{j,n,\mu}\frac{\xi^{n+j+2}}{(n+j+2)!}; \tag{17}$$

$$X_n^{m^*} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{j,n}^m \frac{\xi^{n+j+2}}{(n+j+2)!}, \tag{18}$$

где β = n (q + 3) – 2.

Коэффициенты $b_{j,n,\mu}^m$ и $b_{j,n}^m$ определяются через коэффициенты предыдущих приближений по рекуррентным формулам:

$$b_{j,n,\mu}^m = \sum_{\nu=1}^{4}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{q} a_{\nu,i,k}^m b_{\nu,\mu,(j+i-k-3)}^{n-1} \frac{1}{n+j-1}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-1-\gamma); \tag{19}$$

$$b_{j,n}^m = \sum_{\nu=1}^{4}\sum_{i=0}^{3}\sum_{k=0}^{q} a_{\nu,i,k}^m b_{\nu,(j+i-k-3)}^{n-1} \frac{1}{n+j}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-\gamma). \tag{20}$$

Постоянные интегрирования C_μ, входящие в общее решение системы (16), находятся из граничных условий на остальных двух краях лопатки (11).

Пример расчета. В соответствии с изложенным аналитическим решением задачи была составлена программа численной реализации применительно к ЭВМ. Расчет приводился для ортотропного материала лопатки с главными осями упругой симметрии, повернутым на угол φ относительно осей лопатки ξ, η.

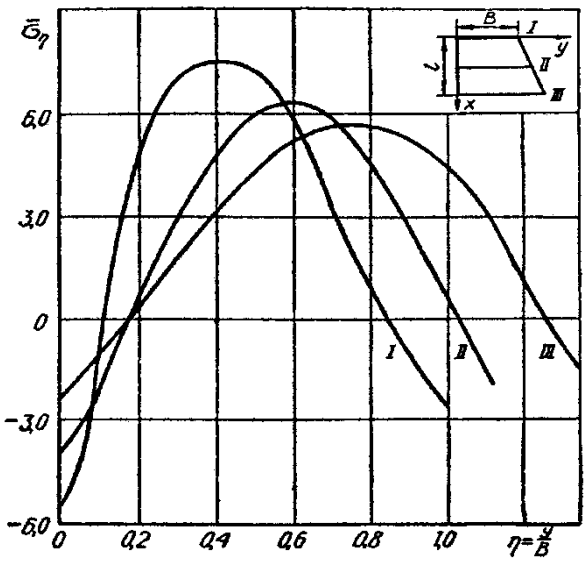


Рис. 3. Распределение безразмерных напряжений $\bar{\sigma}_\eta$ по ортотропной лопатке радиального нагнетателя.

Исходные данные для расчета колеса: R_2 = 400 мм; R_1 = 276 мм; n = 1600 об/мин; β_1 = 0,6 рад; β_2 = 0,87 рад; для лопатки: l = b_1 = 200 мм; h = 5 мм; $R_л$ = 500 мм; γ_1 = 0,3 рад; γ_2 = 0. Рабочее колесо выполнено из стеклопластика КАСТ-В, имеющего следующие физико-механические характеристики: $E_1 = 21{,}5\cdot10^4$ кГ/см²; $E_2 = 12{,}3\cdot10^4$ кГ/см²; $G = 2{,}1\cdot10^4$ кГ/см²; $\nu_1 = 0{,}19$; $\nu_2 = 0{,}11$.

На рис. 3 представлены результаты расчета безразмерных напряжений $\bar{\sigma}_\eta$ в трех сечениях лопатки: по входной кромке, в средней части ее и по выходной кромке. При этом величины $\bar{\sigma}_\eta$ определяли как сумму мембранных и изгибных напряжений:

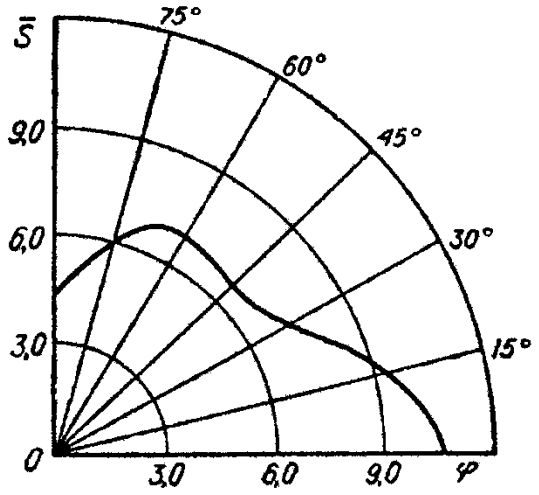


Рис. 4. Изменение максимальных главных напряжений $\bar{S}$ в центре трапециевидной лопатки в зависимости от параметра φ.

$$\bar{\sigma}_\eta = \frac{hp}{D_{11}A_{22}} \cdot \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial \xi^2} - 6\left[d_4 m^2 \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \eta^2} + (d_2 - 2d_5)\frac{\partial \bar{W}}{\partial \xi^2} 2d_3 m \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \xi \partial \eta} \right].$$

Как видно, наиболее напряженной является выходная кромка лопатки.

Исследовалось также влияние анизотропии, возникающей вследствие несовпадения главных осей упругости ортотропного материала с расчетными осями лопатки, на величины прогибов и силовых факторов. На рис.4 приведена зависимость безразмерных максимальных главных напряжений $\bar{S}$ в центре лопатки от параметра φ. Как следует из рисунка, величины максимальных главных напряжений существенно зависят от этого параметра. Следовательно, учет анизотропии, возникающей вследствие несовпадения главных осей упругости ортотропного материала с расчетными осями лопатки, обязателен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. – М.: Наука, 1974. – 446 с.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. – Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrforschung. Bd.1, 1939, s.413-418.
3. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. математ. и матем. физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.

4. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики.– Дифференциальные уравнения, 1979, Том 15, №11, с.2039-2043.
5. Luke V.L. Mathematical functions and their approximations. – New York – London: Academic Press. Inc., 1975 – 608 p.
6. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1976 – 620 с.
7. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обозрение прикладной и промышленной математики, том 22, вып.4, 2015, с.493-495.

V.A.Puhly

CALCULATION OF THE IS INTENSE-DEFORMED STATE OF DETAILS OF CARS AND MECHANISMS FROM THE ANISOTROPIC STUFFS

Sevastopol State University, Russia

Abstract

The problem of calculation of strain of a strained state of details of cars and the mechanisms made of the anisotropic stuffs, widely applied in modern machine industry, aircraft construction, the rocket technics is considered. Design techniques are stated reduced with reference to working scapulas of centrifugal superchargers. For the boundary value problem decision the modified method of consecutive approach developed by the author is used. As an example the example of calculation of the scapula is reduced, made from orthotropic a stuff of CASTES-CENTURY Is indicative that the account of anisotropy arising owing to discordant principal axes elastic orthotropic of a stuff with settlement axes of a scapula is obligatory.

Key words: the Anisotropic stuffs, the theory of envelopes, calculation on hardness, scapulas of the centrifugal turbomachines, the modified method of consecutive approach

REFERENCES

[1] Ambartsumjan S.A.common the theory of the anisotropic envelopes. - M: The Science, 1974. 446 p.
[2] Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte qroßer Formänderung. - Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrforschung. Bd.1, 1939, pp.413-418.

[3] Puhly V. A. A method of the analytical decision of bivariate boundary value problems for systems of the elliptic equations. - Zhurn. Will evaluate. mathem. and mathem. Physicists, 1978, volume 18, №5, 1275-1282.
[4] Puhly V. A. About one approach to the decision of boundary value problems of mathematical physics. - The differential equations, 1979, Volume 15, №11, pp.2039-2043.
[5] Luke V.L. Mathematical functions and their approximations. - New York - London: Academic Press. Inc., 1975. 608 p.
[6] Kolmogorov A.N., Fomin S.V. Element of the theory of functions and a functional analysis. - M: The Science, 1976.
[7] Puhly V. A. The decision of intial-regional problems of mathematical physics the modified method of consecutive approach. - A review of applied and industrial mathematics, volume 22, output 4, 2015, pp.493-495.

УДК 01-436; DOI 10.1872/MMF-2016-50

В.А.Пухлий, А.А.Журавлев

СТАТИКА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ДИАГОНАЛЬНЫХ ТУРБОМАШИН

Владимир Александрович Пухлий, д.т.н., профессор
Севастопольский государственный университет
Россия, Севастополь
E-mail: pu1611@rambler.ru

Александр Анатольевич Журавлев, старший преподаватель
Севастопольский государственный университет
Россия, Севастополь
E-mail: pu1611@rambler.ru

Аннотация

Рассматривается напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток диагональных турбомашин (насосы, компрессоры, нагнетатели) в поле действия сил инерции собственной массы лопаток. Двумерная краевая задача на основе метода интегральных соотношений приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой в дальнейшем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений [1].

Ключевые слова: диагональные турбомашины, рабочие лопатки, прочность, двумерная краевая задача, модифицированный метод последовательных приближений.

Введение. В современном турбомашиностроении находят применение так называемые диагональные нагнетатели (радиально-осевые), у которых рабочая среда перемещается в колесе по диагонали между радиальным и осевым направлением. Широко используются в турбомашиностроении диагональные гидротурбины, насосы, нагнетатели.

В настоящей работе рассматривается расчет напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток диагональных турбомашин в поле действия центробежных сил инерции собственных масс лопаток. В качестве исходной системы уравнений используются известные уравнения К.Маргерра [2].

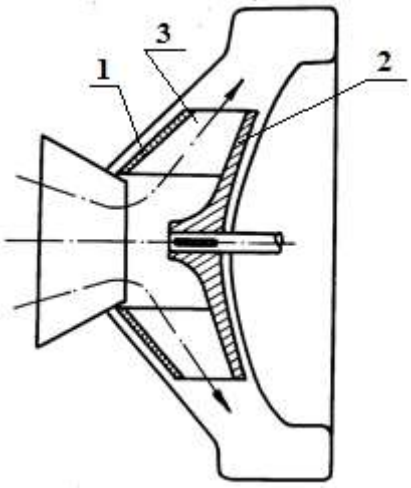


Рис. 1. Конструктивная схема диагонального нагнетателя: 1 – передний диск; 2 – задний диск; 3 – рабочая лопатка.

1. Формулировка задачи. На рис.1 представлена принципиальная схема диагонального нагнетателя.

На рис.2. приведена геометрия и система координат лопатки диагонального нагнетателя. Лопатка такого нагнетателя представляет собой трапециевидную пологую оболочку, защемленную по двум непараллельным краям, прилегающим к дискам и свободную по двум другим краям.

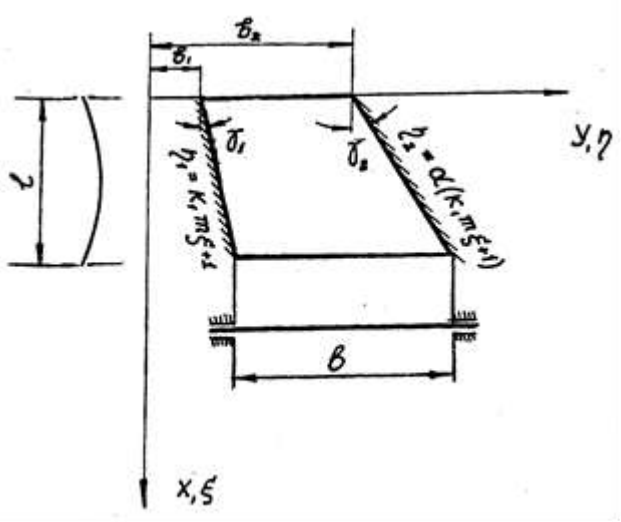


Рис. 2. Геометрия и система координат лопатки диагонального нагнетателя.

Напряженное состояние лопатки описывается линейными уравнениями теории пологих оболочек смешанного типа относительно нормального перемещения W (x, y) и функции напряжений F (x, y) Маргерра [2]:

$$\left.\begin{aligned} D\nabla^2\nabla^2 W - \frac{h}{R}\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= q - p_x \frac{\partial W}{\partial x}; \\ \nabla^2\nabla^2 F + \frac{E}{R}\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= -(1-\nu)\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Здесь R и h – радиус срединной поверхности и толщина лопатки; E и D – модуль упругости и цилиндрическая жесткость лопатки; ∇^2 – оператор Лапласа; q и $p_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$ – нормальная и тангенциальная компоненты центробежной силы элемента лопатки, отнесенные к единице площади срединной поверхности:

$$q = \frac{\gamma\omega^2}{g}\rho h \sin\beta; \qquad p_x = \frac{\gamma\omega^2}{g}\rho h \cos\beta. \quad (2)$$

Для тангенциальной нагрузки p_x запишем потенциал:

$$U = \frac{1}{2}\frac{\gamma}{g}\omega^2 h\left(R_2 \sin\beta_2 - x\right)^2, \quad (3)$$

где γ – объемный вес материала лопатки; g – гравитационное ускорение; ρ – расстояние от оси вращения ротора до центра тяжести элемента лопатки; $\omega = \pi n/30$ – угловая скорость вращения ротора; h – толщина лопатки; β – угол между направлением центробежной силы и поверхностью лопатки; β_1 и β_2 – углы входа и выхода потока; R_2 – радиус колеса.

Лопатка по краям $y_1 = k_1 x + b_1 = r$ и $y_2 = k_2 x + b_2 = \alpha r$ свободно защемлена (допускается смещение кромок в плоскости лопатки). При этом $k_1 = tg\gamma_1$, $k_2 = tg\gamma_2$, $\alpha = -\frac{k_2}{k_1} = -\frac{b_2}{b_1}$ – геометрические параметры лопатки.

Граничные условия для прогиба $W(x, y)$ будут:

$$W = \frac{\partial W}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для функций напряжений при отсутствии объемных сил и нагрузки на контуре записываются аналогично [3]:

$$F = \frac{\partial F}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

Для свободных краев x = 0, x = l граничные условия имеют вид:

– для функций прогиба $W(x, y)$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = 0; \qquad \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + (2-\nu)\frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} = 0; \quad (6)$$

– для функции напряжений $F(x, y)$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \qquad \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = 0. \quad (7)$$

Введем безразмерные координаты $\xi = \frac{x}{l}$, $\eta = \frac{y}{b_1}$. Тогда уравнения (1) перепишутся в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \nabla_m^4 \overline{W} - sm^2 \frac{l^2 Ep}{D} \frac{\partial^2 \overline{F}}{\partial \eta^2} &= 1 - \frac{p_x l^3}{D} \frac{\partial \overline{W}}{\partial \xi}; \\ \nabla_m^4 \overline{F} + m^2 \frac{l^2}{pR} \frac{\partial^2 \overline{W}}{\partial \eta^2} &= -\frac{(1-\nu) l^2}{p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2}. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Здесь $s = \frac{h}{R}$, $m = \frac{l}{b_1}$ – геометрические параметры лопатки; $p = \frac{ql^4}{D}$ – параметр нагрузки; $\overline{W} = \frac{W}{p}$, $\overline{F} = \frac{F}{p^2 E}$ – безразмерные величины функции прогибов и функции напряжений.

Линейный дифференциальный оператор ∇_m^4 будет:

$$\nabla_m^4 = \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2m^2 \frac{\partial^4}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + m^4 \frac{\partial^4}{\partial \eta^4}.$$

Граничные условия (6) примут вид:

$$\frac{\partial^2 \overline{W}}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 \overline{W}}{\partial \eta^2} = 0; \qquad \frac{\partial^3 \overline{W}}{\partial \xi^3} + (2-\nu) m^2 \frac{\partial^3 \overline{W}}{\partial \xi \partial \eta^2} = 0, \tag{9}$$

а граничные условия (7) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \overline{F}}{\partial \eta^2} = 0; \qquad \frac{\partial^2 \overline{F}}{\partial \xi \partial \eta} = 0. \tag{10}$$

2. Решение краевой задачи. К решению системы уравнений (8) применяется метод интегральных соотношений Дородницына. В соответствии с методом представим исходную систему уравнений в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \overline{\mathrm{X}}}{\partial \xi} + \frac{\partial \overline{\mathrm{Y}}}{\partial \eta} + \overline{\mathrm{L}} = 0, \tag{11}$$

где векторы $\overline{X}$, $\overline{Y}$ и $\overline{L}$ запишутся следующим образом:

$$\overline{X} = \{X_i\} = \{w, z_1, z_2, z_3, F, z_4, z_5, z_6\};$$

$$\overline{Y} = B_0 \overline{X} + B_1 \frac{\partial \overline{X}}{\partial \eta} + B_2 \frac{\partial^2 \overline{X}}{\partial \eta^2} + B_3 \frac{\partial^3 \overline{X}}{\partial \eta^3};$$

$$\overline{L} = B\overline{X} + \overline{b}.$$

При этом элементы матриц $B_r = \{b_{mn}^r\}$ и $B = \{b_{mn}\}$ (r = 0, 1, 2, 3; m, n = 1, 2, …, 8) принимают следующие значения:

$$b_{14}^3 = b_{58}^3 = m^4; \quad b_{18}^1 = -\frac{sm^2 l^2}{p^2}; \qquad b_{34}^1 = b_{78}^1 = 2m^2;$$

$$b_{54}^1 = \frac{m^2 E l^2 p^2}{RD}; \qquad b_{24} = \frac{pl^3}{D}; \qquad b_{34} = -\frac{Ul^2}{D};$$

$$b_{21} = b_{32} = b_{43} = b_{65} = b_{76} = b_{87} = -1.$$

Остальные элементы равны нулю. Компоненты вектора $\bar{b}$ равны:

$$b_4 = -1 + \frac{Ul^4}{pRD}; \qquad b_8 = \frac{(1-\nu)l^2}{p^3 E}\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2};$$

$$b_1 = b_2 = b_3 = b_5 = b_6 = b_7 = 0.$$

В соответствии с методом интегральных соотношений Дородницына представим решение системы уравнений в частных производных (8) следующим образом:

$$X_i(\xi,\eta) = \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi) P_j(\xi,\eta) \qquad (i = 1, 2, ..., 8) \qquad (12)$$

где $P_j(\xi,\eta)$ – система аппроксимирующих функций, удовлетворяющих граничным условиям (4) и (5); $X_{ij}(\xi)$ – искомые функции.

Ограничиваясь двухчленным приближением, представим аппроксимирующие функции в виде степенных полиномов Якоби [5, 6]:

$$P_j(\xi,\eta) = P_1(\xi,\eta)\sum_{j=1}^{n}\left[\eta - \frac{(1+\alpha)r}{2}\right]^{j-1};$$

$$P_1(\xi,\eta) = \eta^4 - 2(1+\alpha)r\eta^3 + (1+4\alpha+\alpha^2)r^2\eta^2 - 2\alpha(1+\alpha)r^3\eta + \alpha^2 r^4. \qquad (13)$$

Здесь $r = 1 + k_1 m\xi$ – уравнение наклонной стороны лопатки. Полиномы Якоби $P_j(\xi,\eta)$ ортогональны на отрезке $[\eta_1, \eta_2]$ и, образуя систему линейно независимых функций, удовлетворяют граничным условиям на косых краях лопатки.

Выбирая в качестве весовых функций также полиномы $P_j(\xi,\eta)$, после применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений дивергентного типа (11), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка 8n с переменными коэффициентами неэйлеровского вида, которая ниже представлена в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{\nu=1}^{m^*} A_{m,\nu} X_\nu + f_m \qquad (\mathrm{m} = 1, 2, ..., \mathrm{m}^*), \qquad (14)$$

где ν – номер неизвестной функции; m – номер уравнения $(m^* = 16)$, $A_{m,\nu}$ – переменные коэффициенты; f_m – свободные члены.

Подчеркнем, что в общем случае точное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами неизвестно. Здесь к интегрированию системы уравнений (14) применяется модифицированный метод последовательных приближений, позволяющий в линейных задачах получить точное решение задачи.

3. Применение модифицированного метода последовательных приближений к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. В соответствии с методом [7, 8] переменные коэффициенты $A_{m,\nu}$ и свободные члены f_m представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$A_{m,\nu} = \sum_{k=0}^{q} a_{m,\nu,k}\xi^k; \qquad f_m = \sum_{k=0}^{q} f_{m,k}\frac{\xi^k}{k!}. \tag{15}$$

Общее решение системы дифференциальных уравнений (14) запишется следующим образом:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{m^*} C_\mu \left[\frac{\xi^{\mu-m}}{(\mu-m)!}\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] + \sum_{j=0}^{q} b_{m,j,o}\frac{\xi^{j+1}}{(j+1)!} + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}$$

$$(\mathrm{m} = 1, 2, ..., \mathrm{m}^*), \tag{16}$$

где $b_{m,j,o} = f_{m,k}$ при j = k; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования. В решении (16) δ = 1, если m = μ и δ = 0 для остальных μ.

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,\mu,n,j}\frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!};$$

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,n,j}\frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!}, \qquad \text{где } \beta = (q+3)-2. \tag{17}$$

Коэффициенты $b_{m,\mu,n,j}$ и $b_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$b_{m,\mu,n,j} = \sum_{\nu=1}^{m^*}\sum_{k=0}^{q} a_{\nu,m,k} b_{\nu,\mu,n-1,j-k}\frac{1}{(n+j-1)}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-1-\gamma);$$

$$b_{m,n,j} = \sum_{\nu=1}^{m^*}\sum_{k=0}^{q} a_{\nu,m,k} b_{\nu,n-1,j-k}\frac{1}{(n+j)}\prod_{\gamma=0}^{k}(n+j-\gamma). \tag{18}$$

Постоянные C_μ, входящие в общее решение системы уравнений (16), находятся из граничных условий на двух других краях лопатки.

В соответствии с методом интегральных соотношений запишем граничные условия по входной (ξ = 1) и выходной (ξ = 0) кромкам для определения констант интегрирования C_μ в решении (16):

$$X_5 - 12\frac{\nu m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_1 = 0; \qquad X_6 - 44\frac{\nu m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_2 = 0;$$

$$X_7 - 12\frac{(2-\nu)m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_3 = 0; \qquad X_8 - 44\frac{(2-\nu)m^2}{r^2(1-\alpha)^2}X_4 = 0;$$

$$X_9 = \frac{7}{4}\frac{1}{m^2r^2(1-\alpha)^2}\frac{Ul^2}{p^3E}; \quad X_{10} = X_{11} = X_{12} = 0. \tag{19}$$

Запишем выражения для напряжений:

$$\sigma_\xi = \frac{\sigma_x l^2}{Ehp} = \frac{m^2p^2}{h^2}\frac{\partial^2\overline{F}}{\partial\eta^2} - \frac{1}{2(1-\nu^2)}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2} + \gamma m^2\frac{\partial^2 w}{\partial\eta^2}\right) + \frac{Ul^2}{Eph^2};$$

$$\sigma_\eta = \frac{\sigma_y l^2}{Ehp} = \frac{p^2}{h^2}\frac{\partial^2 F}{\partial\xi^2} - \frac{1}{2(1-\nu^2)}\left(m^2\frac{\partial^2 w}{\partial\eta^2} + \nu\frac{\partial^2 w}{\partial\xi^2}\right);$$

$$\sigma_{\xi\eta} = \frac{\sigma_{xy} l^2}{Ehp} = -\frac{mp^2}{h^2}\frac{\partial^2 F}{\partial\xi\partial\eta} - \frac{m}{2(1+\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial\xi\partial\eta}. \tag{20}$$

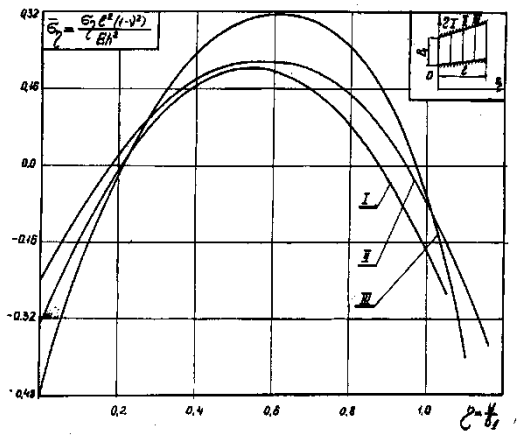


Рис. 3. Распределение напряжений $\overline{\sigma}_\eta$ по лопатке диагонального нагнетателя

4. Пример расчета. В соответствии с изложенным выше аналитическим решением задачи разработана программа численной реализации полученного решения применительно к ЭВМ. В качестве приложения применим предложенный подход к исследованию напряженного состояния лопатки диагонального нагнетателя.

Исходные данные для расчета. Для колеса: R_k = 40 см; β_2 = 45º; z = 8 – количество лопаток; n = 1500 об/мин. Для лопатки: l = 20 см; m = 1; γ_1 =10º; α = 2. Материал лопатки – Сталь-20.

На рис. 3 представлены эпюры напряжений в лопатке диагонального нагнетателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обозрение прикладной и промышленной математики, том 22, вып.4, 2015, с.493-495.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. – Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrforschung, Bd1, 1939, s.413-418.
3. Григолюк Э.И., Попович В.Е., Пухлий В.А. Изгиб цилиндрической панели с трапециевидным контуром. – В кн.: Теория оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973, с.660-664.
4. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики. – В кн.: Труды 3-го Всес. Матем. Съезда, том III. – М: Наука, 1958, с.447-453.
5. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
6. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximations. – New-York-London: Academic. Press. Inc., 1975. – 608 p.
7. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. Вычислит. Математ. И матем. Физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.
8. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, Том 15, №11, с.2039-2043.

V.A. Puhly, A.A. Zhuravlev

STATICA OF WORKING BLADES OF DIAGONAL TURBO-MACHINES

Sevastopol State University, Russia

Abstract

The tensely-deformed state of working shoulder-blades of diagonal turbo-machines (is examined pumps, compressors, superchargers) in the field of action of forces of inertia of deadweight of shoulder-blades. Two-dimensional a regional task over on the basis of method of integral correlations is brought to the system of usual differential equalizations with variable coefficients, decision of that in future realization by the modified method of progressive approximations [1].

*Key words***:** diagonal turbo-machines, working shoulder-blades, durability, two-dimensional regional task, modified method of progressive approximations.

REFERENCES

[1] V.A. Puhly. The solution of initial and regional problems of mathematical physics by the modified method of approximations by iteration. - Review of applied and industrial mathematics, volume 22, issue 4, 2015, pp. 493-495.

[2] Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. - Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrforschung, Bd1, 1939, pp.413-418.

[3] Grigolyuk E.I., Popovic V. E., V.A. Izgib Is chubbier than the cylindrical panel with trapezoid contour. - In book: Theory of covers and plates. - M.: Science, 1973, pp. 660-664.

[4] Dorodnitsyn A.A. About one method of the numerical solution of some nonlinear problems of aero hydrodynamics. - In book: Works of the 3rd Vses. Matem. Congress, volume III. - M: Science, 1958, pp. 447-453.

[5] Lantsosh K. Practical methods of the applied analysis. - M.: Fizmatgiz, 1961. - 524 p.

[6] Luke Y.L. Mathematical functions and their approximations. - New-York-London: Academic. Press. Inc., 1975. 608 p.

[7] V.A.Puhly. Metod of the analytical solution of two-dimensional regional tasks for systems of the elliptic equations. - Zhurn. Will calculate. Matemat. And maty. Physics, 1978, volume 18, No. 5, pp. 1275-1282.

[8] V.A.Puhly About one approach to the solution of regional problems of mathematical physics. - Differential equations, 1979, Volume 15, No. 11, pp. 2039-2043.

УДК 669.295: 621 ; DOI 10.1872/MMF-2016-51

М.А. Скотникова [1], Н.А. Крылов [2]

О ПРИРОДЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК

[1]Скотникова Маргарита Александровна, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)123-4567, E-mail: skotnikova@mail.ru .

[2]Николай Александрович Крылов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)123-4567, E-mail: cry_off@mail.ru

Annotation

With the assistance of optical metallography techniques, micro X-ray analysis, electron microscopy, carried out a systematic study of temperature-speed features of structural and phase transformations in blade machining titanium billets. The work produced by evaluating the mean effective thermal anisotropy stresses on the boundary of two HCP crystals with the corresponding angles between the axes of the hexagonal, as well as between hexagonal axes and the interface with changes in temperature by 1 degree.

Keywords: Blade machining, titanium alloys, electron microscopy, phase transformations, heat stress anisotropy.

1. INTRODUCTION

Problem of difficulty of metal blanks cutting treatment, for example, from titanium alloys because of reduction of the tools wearproofity now is rather well known. There is a hypothesis about presence here connection with change degree of localization plastic deformation in metal blank at cutting formation. The knowledge of conformities and phenomena accompanying process of cutting treatment, will allow to find ways increase of treatment quality, accuracy of details, decrease of cutting capacity. As follows from the earlier carried out works [1-4], in the investigated alloys structures of the hot - deformed (initial) state are formed nonequilibrium β(α)- and α(β)- solid solutions, which being in an elastic – intense condition, enriched with vacancies, α-, β- stabilizing elements, and inclined to decomposition.

The purpose of the given work consist in development of representations

about temperature-time features of formation and decomposition enriched solid solutions, with the account is elastic - intense the states created in the volume of deformed metal blank during its technological treatment by cutting, in an establishment of nature of deformation localization and in development ways of increase of the tool wearproofity at the expense of choice of an optimum regime of the deformation speed and temperature.

The materials for investigation were OT4, PT3V, VT23 alloys. Their treatment was carried out without lubricant to a hard-facing alloy cutting tool T15K6 with speed of feed S = 0,26 mm / revolutions and depth of cutting t = 3 mm, in the range of cutting speeds 2…250 m / mines. The geometrical parameters of a cutter made corners: $\varphi = 45°$; $\varphi_1 = 15°$; $\alpha = 6°$; $\gamma = 12°$.

2. FORMATION OF ELASTIC – INTENSE STATE IN MATERIAL AT CUTTING TREATMENT

At technological treatment by cutting, at presence of gradients of stresses and temperatures on the blanks section: a crystallographic anisotropy of thermal expansion coefficients; phase transformations with change of the phases specific volume, there can be significant internal stresses, forming in processable blank the state is elastic - intense.

2.1. FORMATION THERMAL STRESSES

It is known, that the titan has the specific features: by which, first of all, its high chemical activity, polymorphism and high sensitivity low- temperature α - modification to concentrators of stresses, concerns, that, probably, is caused by an anisotropy of its HCP - lattice and, hence, anisotropy of elastic and diffusive properties, and also, low heat conduction of titan.

It is known, that the internal stresses in metals caused by the temperature gradient, are proportional to the ratio of the thermal expansion coefficient to the heat conduction. As it is visible from submitted tabl., for Ti, Hf, Zr (with HCP-lattice) these ratios appear on the order above, than in copper (with FCC) or molybdenum (with BCC - lattice).

Table. Comparison of meanings of the ratio of thermal expansion coefficient to heat conduction for metals

Metal	W	Mo	Cu	Al	Ni	Fe	Mg	Zr	Hf	Ti
The ratio of a coefficient of thermal expansion to a heat conduction, $\times 10^{-6}$ (cal / cm^2 · sec)$^{-1}$	11	14	17	45	63	67	74	83	106	182

In zone of the cuttings formation in processable titanium blanks under thermal and mechanical influences the elastic – intense state is formed. There is significant temperature and strain inhomogeneity resulting in occurrence mechanical and thermal macro and micro of stresses, especially, on the grains borders from HCP- lattice having anisotropy of thermal expansion coefficients. At heats change these stresses in the state to surpass a crystallographic yield stress.

2.2. FORMATION THERMAL ANISOTROPY STRESSES

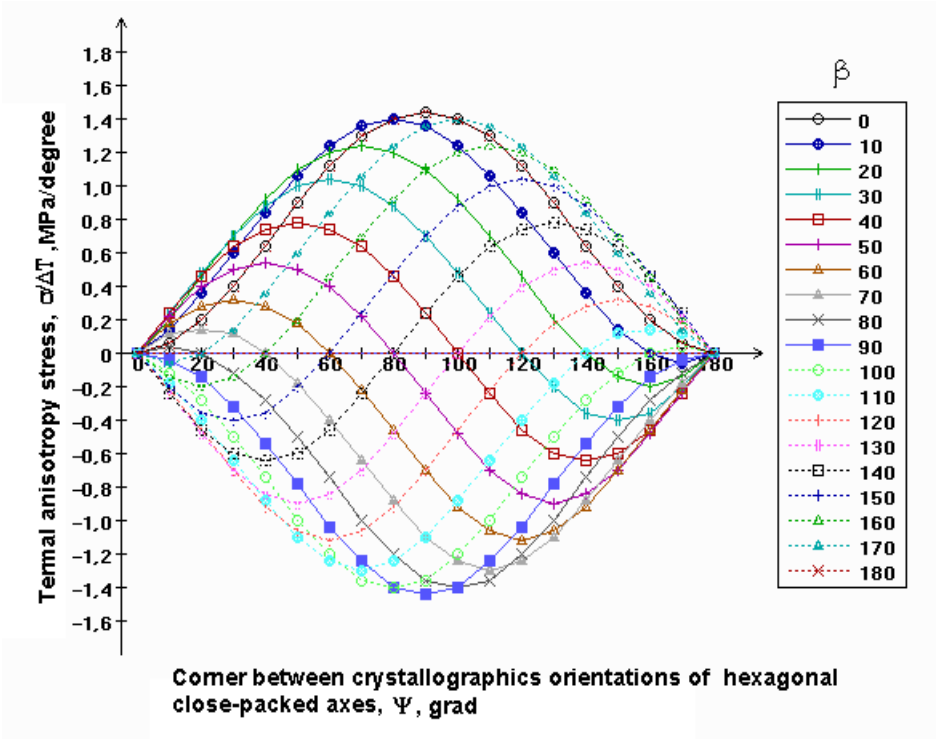
In development of works N.N. Davidenkov's and V.A. Likhachev's, the theoretical estimation of the thermal anisotropy stresses (σ / ΔT), arising on border two next α - grains from HCP- lattice was made, depending on the corner crystallographic orientation (ψ) of their hexagonal close-packed axes (H.A). And corner of their orientation (β) of rather general of the unit border, at change of the temperature on 1 degree [5]. Account of an average working stress of the thermal anisotropy according to the formula (1) made under the specially developed program on the computer, provided that the hexagonal close- packed axes of both grains, and as a normal to the unit border lay in one plane,

$$\sigma / \Delta T = (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) [\cos^2\beta - \cos^2(\beta + \psi)] / S_{11} [\sin^4\beta + \sin^4(\beta + \psi)] + S_{33} [\cos^4 b + \cos^4(b + \psi)] + (2S_{13} + S_{44}) [\cos^2\beta \sin^2\beta + \cos^2(\beta + \psi) \cdot \sin^2(\beta + \psi)] \quad (1)$$

where, $\alpha_{\parallel}$ - coefficient of linear expansion along an axis "c"; $\alpha_{\perp}$ - coefficient of linear expansion along an axis "a"; S_{ik} - coefficients of elasticity.

The coefficients of linear expansion α - titan along axes "c" and "a" at room temperature are equal: $\alpha_{\parallel} = 9{,}5 \cdot 10^{-6}$ grad^{-1}; $\alpha_{\perp} = 5{,}6 \cdot 10^{-6}$ grad^{-1} [6]. The meanings of elasticity coefficients were accepted on the basis of the literary data [7]: $S_{11} = 0{,}95810^{-5}$; $S_{33} = 0{,}698 \cdot 10^{-5}$; $S_{13} = -0{,}189 \cdot 10^{-5}$; $S_{44} = 2{,}14 \cdot 10^{-5}$ MPa. The received dependencies of thermal anisotropy stresses, σ / ΔT at meanings of corners β and ψ from 0 up to 180 grad., are given in fig. 1a,b.

As have shown results of account, for titan by most favourable, causing stresses of compression (σ / ΔT = 0... – 1,44 MPa / grad) were basic borders of grains with 90 - grad orientations, or close to them, of a H.A. ($\beta = 90 \pm 45$ grad.). By most dangerous, causing stresses of a stretching (σ /ΔT = + 0,7...1,8 MPa / grad.), were prismatic borders α- grains with hexagonal close-packed axes approximately parallel to general border of the unit ($\beta \approx 0 \pm 45$ grad.) and which on the data B.A. Kolachev [8], should work as drains of vacancies, that is why, according to our concept, along such prismatic borders should be formed nonequilibrium $\alpha(\beta)$ - solid solutions by enriched vacancies and β - stabilizers.



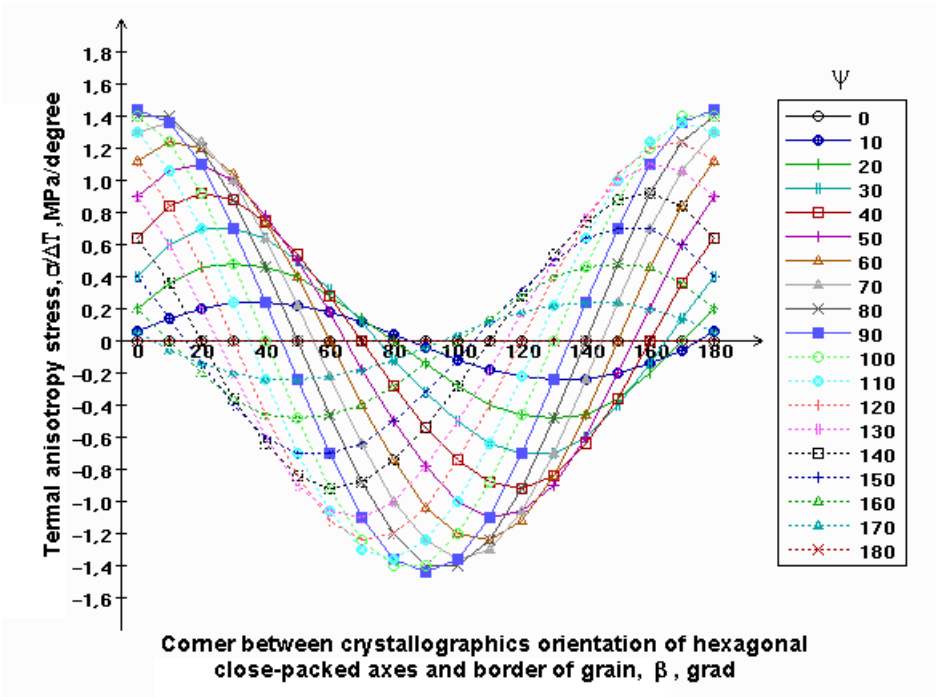


Fig.1. Thermal anisotropy stresses on border of two HCP crystals with the appropriate corners between their hexagonal close-packed axes (H.A.) (a), and also between a H.A. and border of the unit (b), at change of a temperature on 1 degree

During cutting treatment of blank, in zone of interaction with driven the cutting tool, is observed the structural and crystallographic textured of processable material and formation of prismatic orientation of borders having preferable orientation in planes of shift. On such grains borders from HCP-

lattice, as a result of heats change, can arise appreciable thermal stresses, which, probably, result in metal to change structure, redistribution of alloying elements, impurity atoms and vacancies, further, to localization temperatures, plastic deformation, and also to decrease of wearproofity of tool [9].

3. CHIP MICROSTRUCTURE

At cutting metal blanks, in zone of contact interaction of processable detail and cutter there is a complex manyfactor process of interaction of deformation, friction, adhesion and destruction, the ratio of which values is influenced by physical - mechanical and chemical properties of contacting materials, geometry of cutting, lubrilubricant, speed and temperature of deformation. On fig.2 are represented a processable detail, cutter and formed element chip.

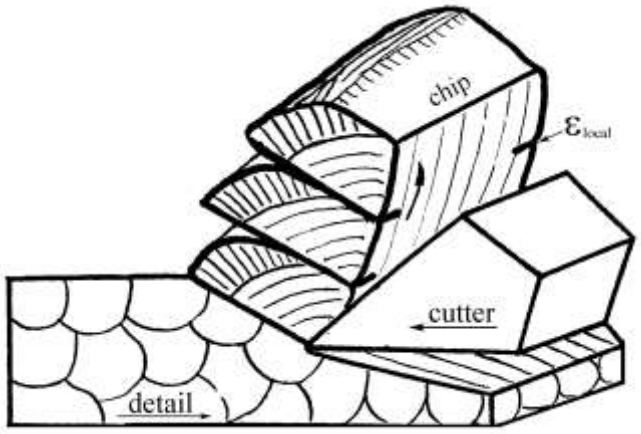


Fig. 2. The circuit of formation of an element
chip at metal blank by cutting treatment

Study of geometrical parameters, the evolutions of formed chip structure on macro-, micro- and submicro- levels carried out in longitudinal and cross its sections with the help of optical metallography, transmission and scanning electronic microscopy with attraction of microdiffraction analysis and computer. Samples (foil) for a transmission electronic microscopy cut out by tubular electrode by diameter 3mm in longitudinal section of chip.

In fig. 3a,b the photos of structure of alloy BT23 are submitted before (fig. 3a) and after (fig. 3b) cutting treatment. Is shown, that at cutting treatment, beginning already from speed 2m/min., the non- uniform plastic deformation, its strong localization in periodic narrow volumes of metal on the mechanism of formation of superfine dislocation cellular structures, fig. 3б took place. Conditions for strong localization in volumes of metal of temperature and plastic deformation here are created. The free surface of a chip is formed on the complex mechanism with attributes of destruction in conditions of superplasticity, fig. 4a,b.

In process of cutter movement, at the same time with frictional heat, in segment of material, formed before it, there is an accumulation of crystal structure defects and their evolution, down to formation a ultimate structure resulting in localization of plastic deformation and in destruction. The size of a segment depends from temperature - kinetic conditions of cutting and from relaxation ability (structural and concentration) processable material. Increase of speed of cutting over ultimate, the causing backlog of frictional heat- generating from heat- absorbing (increase of dissipation of energy at the expense of structural and phase transformations), results in localization of heat in narrow periodic volumes of metal, where there is formation ultimate structure, redistribution of alloying elements, impurity atoms, vacancies and localization there of plastic deformation to simultaneous shift and displacement of segments.

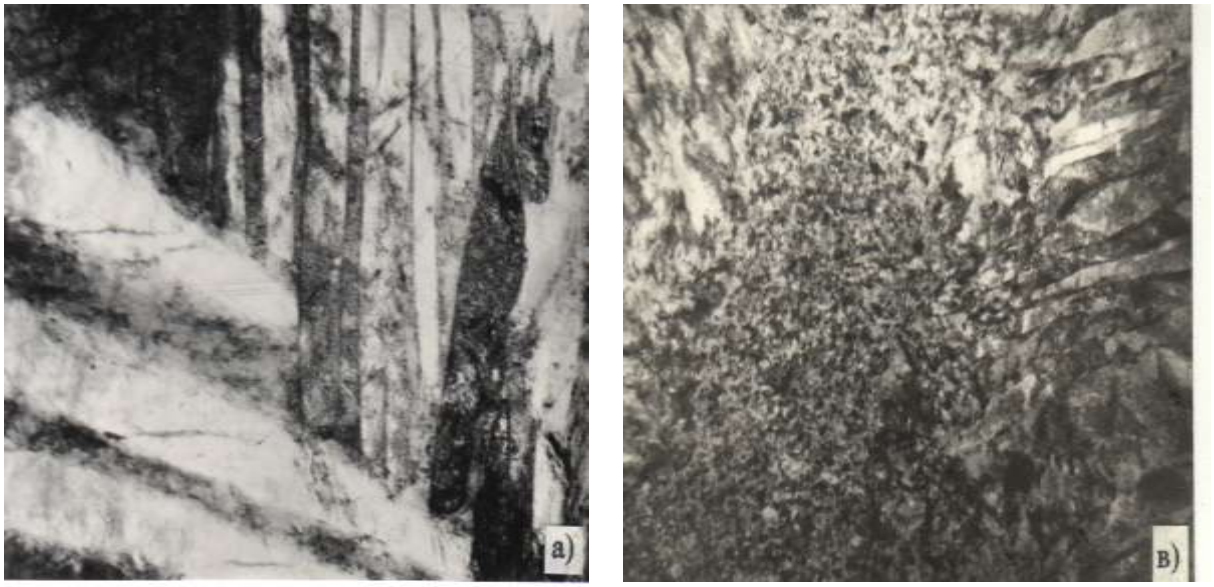


Fig. 3. A structure of alloy BT-23 up to (a) and after (b) of cutting treatment with speed 230 m/min , x 24000 (a); x 13000 (b)

In process of cutter movement, at the same time with frictional heat, in segment of material, formed before it, there is an accumulation of crystal structure defects and their evolution, down to formation the ultimate structure resulting in plastic deformation localization and in destruction. The size of the segment depends from temperature - kinetic conditions of cutting and from relaxation ability (structural and concentration) processable material. Increase of the cutting speed over ultimate, the causing backlog of frictional heat-generating from heat- absorbing (increase dissipation of energy at the expense of structural and phase transformations), results in localization of heat in narrow periodic volumes of metal, where there is formation ultimate structure, redistribution of alloying elements, impurity atoms, vacancies and localization there of plastic deformation to simultaneous shift and displacement of segments.

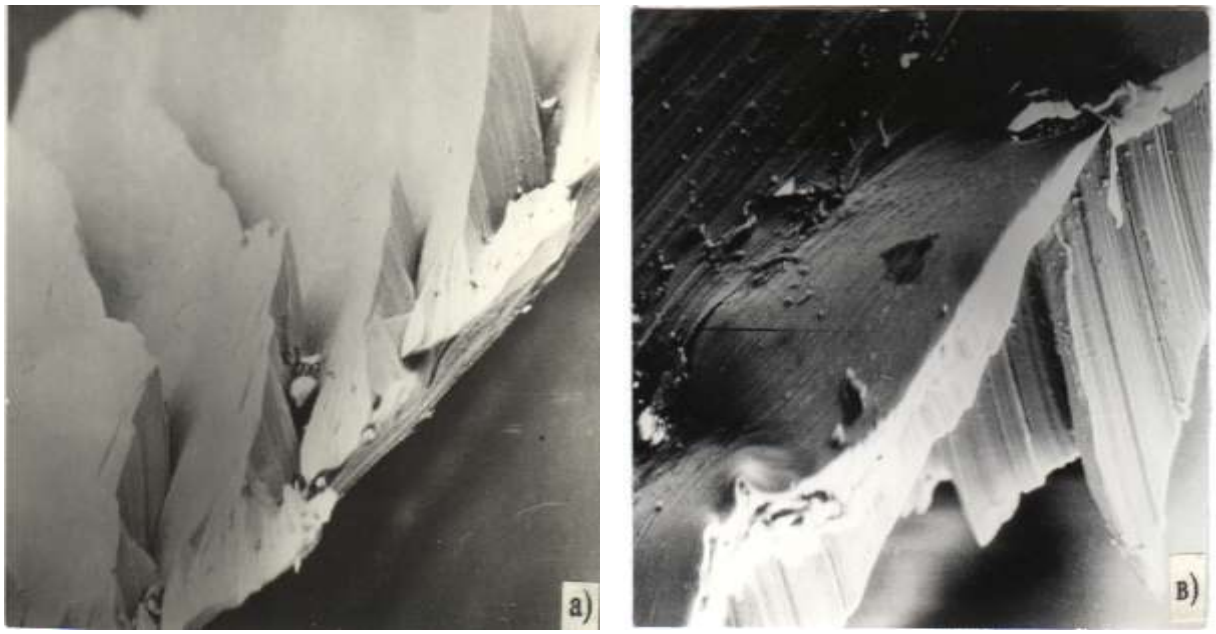


Fig. 4. Characteristic photos of a surface chip from an alloy BT-23 after cutting treatment with speed 230 m/min. x 200 (a); x 400 (b)

At a cuttings formation in titanium alloys having a high frictional heat, the low heat conduction and significant relaxation ability (structural and concentration), creates conditions for dissipative modification of structure and chemical composition of periodic narrow layers of material. It results in so-called frictional accommodations (period of a wear-in material. In a contact zone the wearproof secondary structure essentially lowering wear of processable detail, but raising wear of cutting edge of tool is formed.

4. DISCUSSION OF RESULTS

During thermomechanical treatment, for example, cutting treatment, the accumulation of external energy by system of basis atoms and alloying elements causes their displacement from the equilibrium positions (units of crystal lattice), that creates in a superficial layer of processable detail complex elastic - intense state, at all structural levels. The dislocated atoms formed at it, and vacancies are carriers of superfluous energy and promote increase of phases solubility limit. Thus, it is possible to believe, that in contact zone the nonequilibrium solid solutions enriched by superfluous alloying elements and vacancies are formed which, being in is elastic - intense state, appear inclined to decomposition. For the self-organizing, transition to relative balance, the system realizes various ways of dissipation of superfluous energy: besides transformation of mechanical energy in thermal (the increases of temperature in contact zone), proceed two polystage relaxation processes - structural and concentration [10]. The structural relaxation is shown as structural transformations on the mechanism of formation of narrow zones of secondary dislocation substructures. The increase of regularety and frequency of

dislocation congestion's distribution promotes similar distribution in a cutting edge zone of true stresses at the expense of redistribution them lengthways of rather advanced subborders. The concentration relaxation is shown as phase transformations on the mechanism of decomposition of nonequilibrium solid solution and redistribution (mass transfer) in secondary structures of superfluous alloying elements, impurity atoms, vacancies and oxygen from external environment. It is possible to believe, that in a contact zone the secondary structures alloying by oxygen [11], raising a wearproofity of a processable material are formed.

The cuttings formation includes two basic moments. At the first stage at compression there is a crumplety of a processable detail as a result of uniform plastic deformation, increase of actual contact area and, hence, reduction of true stresses in a zone of cutting. In too time, in a cutting edge zone there are frictional forces, which grow simultaneously with growth of actual contact area. Thus, the plenty of heat is located in contact zone between cutting tool and detail. At the second stage at compression there is formation a ultimate structure, mass transfer and localization of plastic deformation in high plastic narrow zones, to simultaneous shift and displacement of segment. In this moment the actual contact area decreases, and in zone of cutting the true stresses are increased. The cyclic change of resulting stresses results in fatigue phenomena in zone of chip formation. Besides a deformational -mechanical wear in cutter material and processable detail in addition arises fatigue wear, that is the reason of decrease of wearproofity of the tool at the certain high speeds of machining of materials with a low heat conduction.

Thus, the analysis of the received results allows to conclude, that during cutting treatment of metal blanks, in them the nonequilibrium solid solutions are formed which for the self- organizing, transition to relative balance, realize various ways of dissipation of superfluous energy. The cuttings formation can be considered as process of go-ahead redistribution of the stress concentrator along edges of processable detail and necessities of its periodic relaxation by means of local structural and phase transformations in a crystal, which as a whole remains structural - stable. The period of deformation localization (size of chip segment) depends from temperature - kinetic conditions of cutting and from relaxation ability (structural and concentration) processable material. For effective increase of a wearproofity of the tool, it is necessary to create conditions for power balance between a brought up thermal energy and its dissipation at the expense of structural and phase transformations in processable material.

REFERENCES

1. A.M. Parshin, S.S. Ushkov, M.A. Skotnikova: " Decomposition Diagram and Heat - Treatment Schedule of Titanium α- Alloy" *Proceedings 8th World Conference on Titanium*, the Institute of Materials, Birmingham,

1995, v. 1, p. 2515-2522.
2. M.A. Skotnikova: "Investigation the Structural and Phase Transformations and Mechanical Tests of Titanium Alloys", *Proceedings the Second International Conference and Exhibition on Marine Intellectual Technologies*, Saint - Petersburg, 1997, v. 4, p.251-255.
3. M.A. Skotnikova: "Crystalgeometrical Model of High- Temperature BCC - Modification of Titanium Enriched of Vacancies": *Metal science and heat treatment*, Moscow, 1998, 3, p. 22-24.
4. M.A. Skotnikova: "Perfection of the Heat Treatment of Titanium Alloys Intended for an Energymachinebuilding", *Tool*, Saint - Petersburg, 1998, 11, p. 34-35.
5. N.N. Davidenkov, V.A. Likhachev, G.A. Malygin: "Research of an Irreversible Thermal Formchange Zn", *Physical Metal and Metal science*, 1960, v. 10, 3, p.412-424.
6. B.A. Kolachev: *"A Physical Metallurgy of Titanium"*, Metallurgy, Moscow, 1976, 184 pp.
7. A.A. Predvoditelev, O.A. Troickii: *"Dislocations and Dot Defects in Hexagonal Close- Packed Metals"*, Atompublisher, Moscow, 1973, 200 pp.
8. R.M. Gabidulin, B.A. Kolachev, A.A. Kolpachev: "The Diagram of State Metal – Vacancy", *News High Schools. Colour metallurgy*, 1976, 4, p.87-91.
9. R. Komanduri: "New Observations on the Mechanism of Chip Formation When Machining Titanium Alloys", *Wear*, 1981, v. 69, p.179-188.
10. M.A. Skotnikova, G.V. Tsvetkova, A.A. Lanina, N.A Krylov, G.V. Ivanova: *"Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment"*, Book, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2015, p.93-101.
11. M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, E.K. Ivanov, G.V. Tsvetkova: *"Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect"*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, p.159-168.

M.A. Skotnikova [1], N.A. Krylov [2]

ABOUT NATURE OF DISSIPATIVE PROCESSES AT CUTTING TREATMENT OF TITANIUM VANES

[1,2] St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Аннотация

С привлечением методов оптической металлографии, микрорентгеноспектрального анализа, электронной микроскопии, проведено систематическое исследование температурно-скоростных особенностей структурных и фазовых превращений при лезвийной обработке титановых заготовок. В работе произведены оценки среднего действующего

напряжения термической анизотропии на границе двух ГПУ- кристаллов с соответствующими углами между их гексагональными осями (Г.О.), а также между Г.О. и границей раздела при изменении температуры на 1 градус.

Ключевые слова: Лезвийная обработка, титановые сплавы, электронная микроскопия, фазовые превращения, напряжения термической анизотропии.

REFERENCES

[1] A.M. Parshin, S.S. Ushkov, M.A. Skotnikova: " Decomposition Diagram and Heat - Treatment Schedule of Titanium α- Alloy" *Proceedings 8th World Conference on Titanium*, the Institute of Materials, Birmingham, 1995, v. 1, p. 2515-2522.

[2] M.A. Skotnikova: "Investigation the Structural and Phase Transformations and Mechanical Tests of Titanium Alloys", *Proceedings the Second International Conference and Exhibition on Marine Intellectual Technologies*, Saint - Petersburg, 1997, v. 4, p.251-255.

[3] M.A. Skotnikova: "Crystalgeometrical Model of High- Temperature BCC - Modification of Titanium Enriched of Vacancies": *Metal science and heat treatment*, Moscow, 1998, 3, p. 22-24.

[4] M.A. Skotnikova: "Perfection of the Heat Treatment of Titanium Alloys Intended for an Energymachinebuilding", *Tool*, Saint - Petersburg, 1998, 11, p. 34-35.

[5] N.N. Davidenkov, V.A. Likhachev, G.A. Malygin: "Research of an Irreversible Thermal Formchange Zn", *Physical Metal and Metal science*, 1960, v. 10, 3, p.412-424.

[6] B.A. Kolachev: *"A Physical Metallurgy of Titanium"*, Metallurgy, Moscow, 1976, 184 pp.

[7] A.A. Predvoditelev, O.A. Troickii: *"Dislocations and Dot Defects in Hexagonal Close- Packed Metals"*, Atompublisher, Moscow, 1973, 200 pp.

[8] R.M. Gabidulin, B.A. Kolachev, A.A. Kolpachev: "The Diagram of State Metal – Vacancy", *News High Schools. Colour metallurgy*, 1976, 4, p.87-91.

[9] R. Komanduri: "New Observations on the Mechanism of Chip Formation When Machining Titanium Alloys", *Wear*, 1981, v. 69, p.179-188.

[10] M.A. Skotnikova, G.V. Tsvetkova, A.A. Lanina, N.A Krylov, G.V. Ivanova: *"Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment"*, Book, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2015, p.93-101.

[11] M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, E.K. Ivanov, G.V. Tsvetkova: *"Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect"*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, p.159-168.

УДК 531.8; DOI 10.1872/MMF-2016-52

Е.Г. Тимофеев[1], И.А. Жуков[2]

К РАЗРАБОТКЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЕ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

[1]Евгений Геннадьевич Тимофеев, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, Новокузнецк
E-mail: veefomit77777@yandex.ru.

[2]Иван Алексеевич Жуков, заведующий кафедрой теории и основ конструирования машин, к.т.н., доцент
Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, Новокузнецк
Тел.: +7(3843)465791, E-mail: tmmiok@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрен вопрос разработка численного метода для исследования волновых ударных явлений в ударных узлах машин ударного действия. Разработанный численный метод реализован в виде комплекса программных средств, позволяющих моделировать боек заданной геометрической формы и находить форму и силовые характеристики генерируемого в стержне-волноводе бойком ударного импульса.

Ключевые слова: боек, волновод, импульс, численный метод.

Одной из основных задач при проектировании машин ударного действия является определение внешнего вида импульса, пробегающего по волноводу после силового воздействия ударника. Исследования [1-14] показали, что форма ударника будет влиять на силовые характеристики и геометрию ударного импульса.

Для расчета и построения ударных импульсов широко используется графо-динамический метод, математические основы которого были разработаны в 60-х годах прошлого века [15]. Обратимся к проблеме реализации графо-динамического метода в виде численного алгоритма с целью дальнейшего создания на его основе программных продуктов. Этот метод позволяет построить график ударного импульса, генерируемого в стержне-волноводе ударником переменного сечения, выполненным в виде

ступеней правильной геометрической формы (чаще всего цилиндрических), равной, конечной длины l_1 и постоянной площади поперечного сечения S_i (здесь i – номер текущей ступени). Если количество таких ступеней будет достаточно велико (порядка 50-100 штук), то такой многоступенчатый ударник в приближении, можно рассматривать как тело вращения заданное функцией образующей *f(x),* которая претерпевает полный оборот вокруг оси *Ox* (рис. 1).

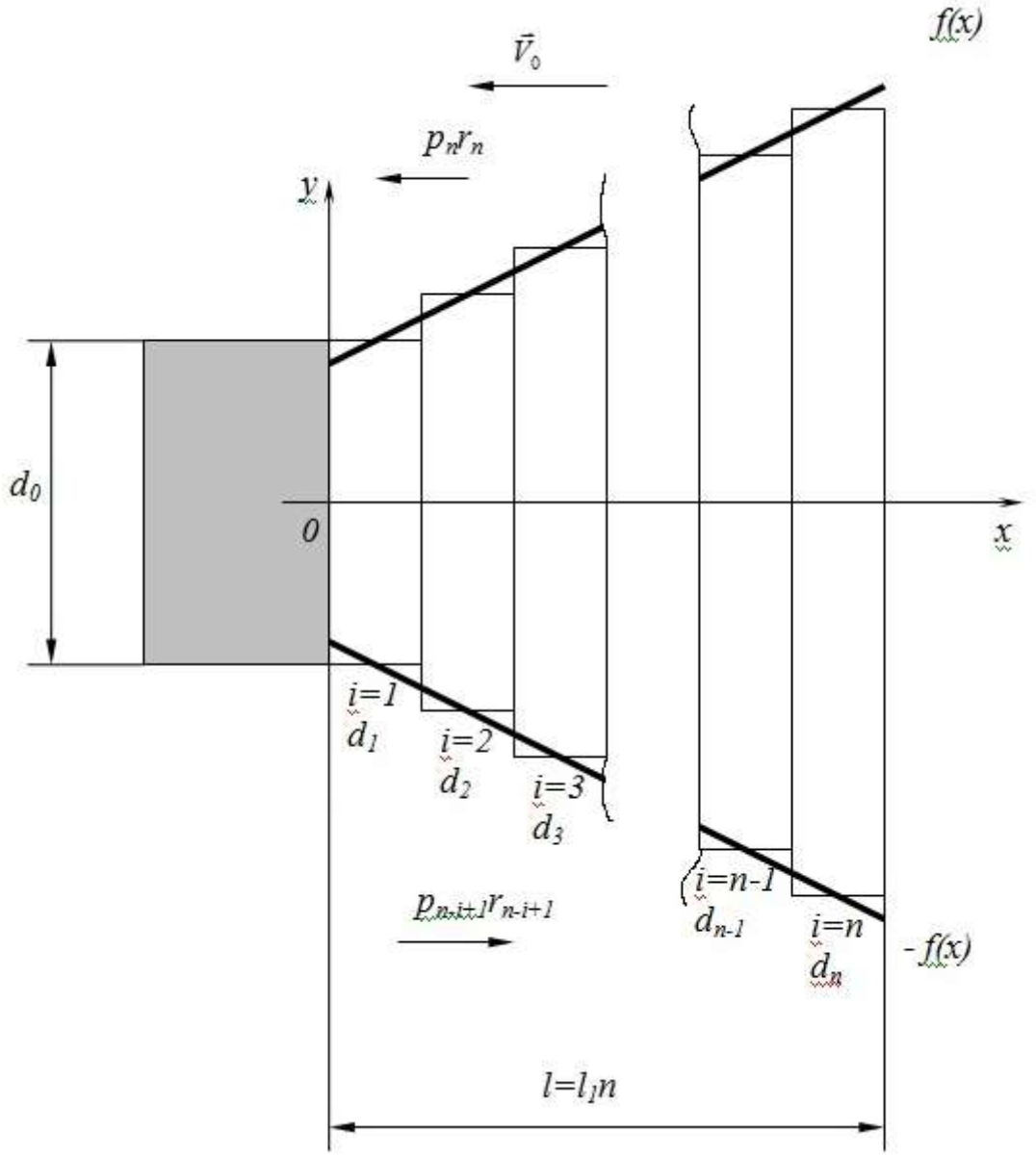


Рисунок 1 – Формирование цилиндрического многоступенчатого тела вращения и нанесение им удара по волноводу

Каждая из ступеней представляет собой цилиндр высотой l_1 и площадью поперечного сечения средним диаметром d_i, величина которого определяется по формуле (1):

$$d_i = 2 f(x_i) \qquad (1),$$

где x_i – координата положения центра текущей цилиндрической ступени

$$x_i = (i-1)l_1 + \frac{l_1}{2}. \quad (2)$$

Получается, что общая длина всего тела вращения l, это длина одной ступени l_1 умноженная на их количество n

$$l = nl_1. \quad (3)$$

Для определения количества цилиндрических ступеней необходимо воспользоваться физическими параметрами тела вращения: m – массой и ρ – плотностью материала, из которого оно изготовлено. Масса определяется из запаса энергии генерируемой при ударе, кинетической энергия поступательного движения (вращение отсутствует) бойка перед ударом T:

$$m = \frac{2T}{V_0^2}, \quad (4)$$

где V_0 – предударная скорость бойка, величина которой определяется из технических параметров механизма.

Таким образом, перед началом расчета необходимо сформировать тело вращения (боек), которым будет наноситься удар. Поэтому на первом этапе, необходимо определить набор величин, значения которых известны заранее:

$f(x)$ – функция образующей бойка, где заложен диаметр ударного торца (первой цилиндрической ступени);

$d_0=d_1$ – диаметр ударного торца бойка (d_1) и волновода (d_0);

l_1 – длина одной цилиндрической ступени;

m – масса всего бойка;

ρ – плотность материала ударника и волновода.

Количество цилиндрических ступеней n определяется из уравнения

$$\sum_{i=1}^{n} \pi\rho l_1 f^2((i-1)l_1 + \frac{l_1}{2}) = m \pm \frac{\varepsilon}{100\%} m, \quad (5),$$

где ε – относительная погрешность (максимальная допустимая величина 4%).

В итоге, расчетным бойком является тело вращения, диаметральное продольное сечение которого можно представить в виде четырех графиков построенных в двумерной системе координат (рис. 2). Как показывает практика, такой подход к формированию ударника является более правильным, чем разбивание изначально заданного тела вращения на ступени.

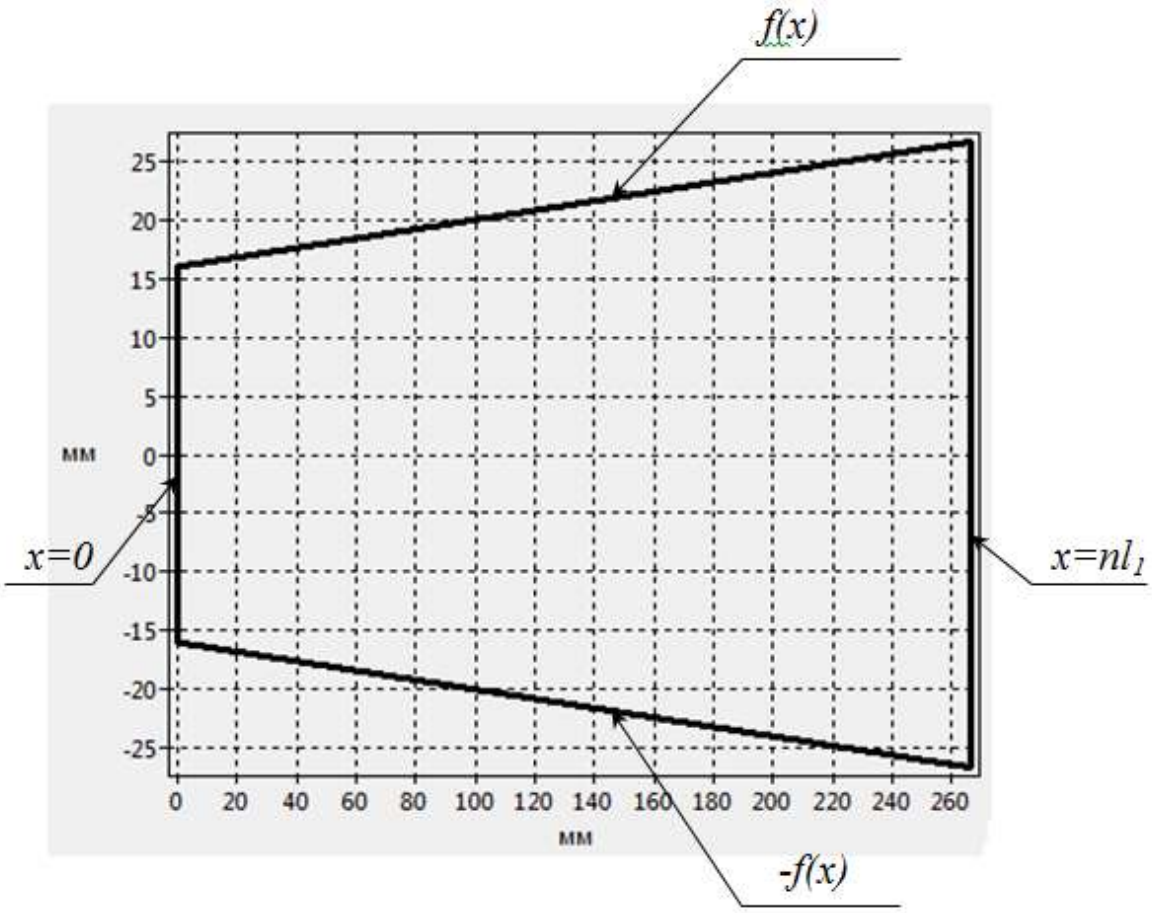


Рисунок 2 – Диаметральное продольное сечение бойка, выполненное путем построения четырех графиков *f(x)*, *-f(x)*, *x=0* и $x=nl_1$

Рассмотрим расчет ударного импульса, полученного от удара многоступенчатым бойком по волноводу, который представляет собой штангу постоянного сечения диаметром d_0. Для этого нам необходимо значение площади поперечного сечения каждой цилиндрической ступени S_i:

$$S_i = \pi f^2((i-1)l_1 + \frac{l_1}{2}). \quad (6)$$

При совершении удара от места соприкосновения в обе стороны (по бойку и по волноводу) будут распространяться волны, обусловленные продольной деформацией, скорость которых будет равна скорости звука c (7) в материале бойка и волновода (боек и волновод выполнены из одного материала):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала бойка и волновода. Волна в бойке будет распространяться, проходя через границы соприкосновения цилиндрических ступеней. При этом она будет частично отражаться от

границы соприкосновения, а частично проходить сквозь нее, этот процесс характеризуется коэффициентами прохождения p_i (8) и отражения r_i (9):

$$p_i = \begin{cases} \dfrac{2S_{i-1}}{S_{i-1}+S_i}, 1 \le i \le n; \\ \dfrac{2S_{i-n+1}}{S_{i-n+1}+S_{i-n}}, (n+1) \le i \le 2n-1; \end{cases} \quad (8)$$

$$r_i = \begin{cases} \dfrac{S_{i-1}-S_i}{S_{i-1}+S_i}, 1 \le i \le n; \\ \dfrac{S_{i-n+1}-S_{i-n}}{S_{i-n+1}+S_{i-n}}, (n+1) \le i \le (2n-1). \end{cases} \quad (9)$$

При ударе в каждой цилиндрической ступени бойка формируются силы F_j, которые проходят в волновод, через плоскость соударения. Количество этих сил зависит от количества расчетных шагов T, которое выбирается произвольно. Это число T и количество цилиндрических ступеней n определяет размер матрицы сил P_i^j (здесь i ($i_{max}=2n$) - номер строки, а j ($j_{max}=T$) – индекс элемента в строке или номер столбца), возникающих в цилиндрических ступенях бойка при ударе. Расчет элементов этой матрицы производится по формулам

$$\begin{aligned} &P_{2i-1}^1 = \frac{ES_iV_0}{2c}, 1 \le i \le n; \\ &P_{2i}^1 = -\frac{ES_iV_o}{2c}, 1 \le i \le n; \\ &P_{2n-1}^{j+1} = -P_{2n}^j, 1 \le j \le T; \\ &P_{2i-1}^{j+1} = P_{2i}^j r_{n+j} + P_{2i+1}^j p_{j+1}, 1 \le i \le n, 1 \le j \le T; \\ &P_2^{j+1} = P_1^j r_1, 1 \le j \le T; \\ &P_{2i}^{j-1} = P_{2i-1}^j r_j + P_{2i-2}^j p_{n+j-1}, 1 \le i \le n, 1 \le j \le T. \end{aligned} \quad (10)$$

Величины сил, прошедших через границу соударения определяется по формуле

$$F_j = P_1^j p_1, 1 \le j \le T. \quad (11)$$

Время действия каждой силы массива F_i (время одного расчетного шага t_1) рассчитывается по формуле

$$t_1 = \frac{l}{nc} \quad (12)$$

Длительность всего ударного импульса зависит от количества расчетных шагов, получается, что этот отрезок времени можно определить путем умножения времени одного расчетного шага t_1 на количество шагов T

$$t = \frac{Tl}{nc}. \qquad (13)$$

Итогом всех вычислений является построение графика зависимости силы от времени *F(t)*, внешний вид которого отражает ударный импульс, который распространяется по волноводу (рис 3). Качество построения графика (его плавность) зависит от количества расчетных шагов *T* и количества ступеней, на которые разбит боек *n* (причем, количество расчетных шагов *T* должно быть на пjрядок выше количества ступеней бойка *n*).

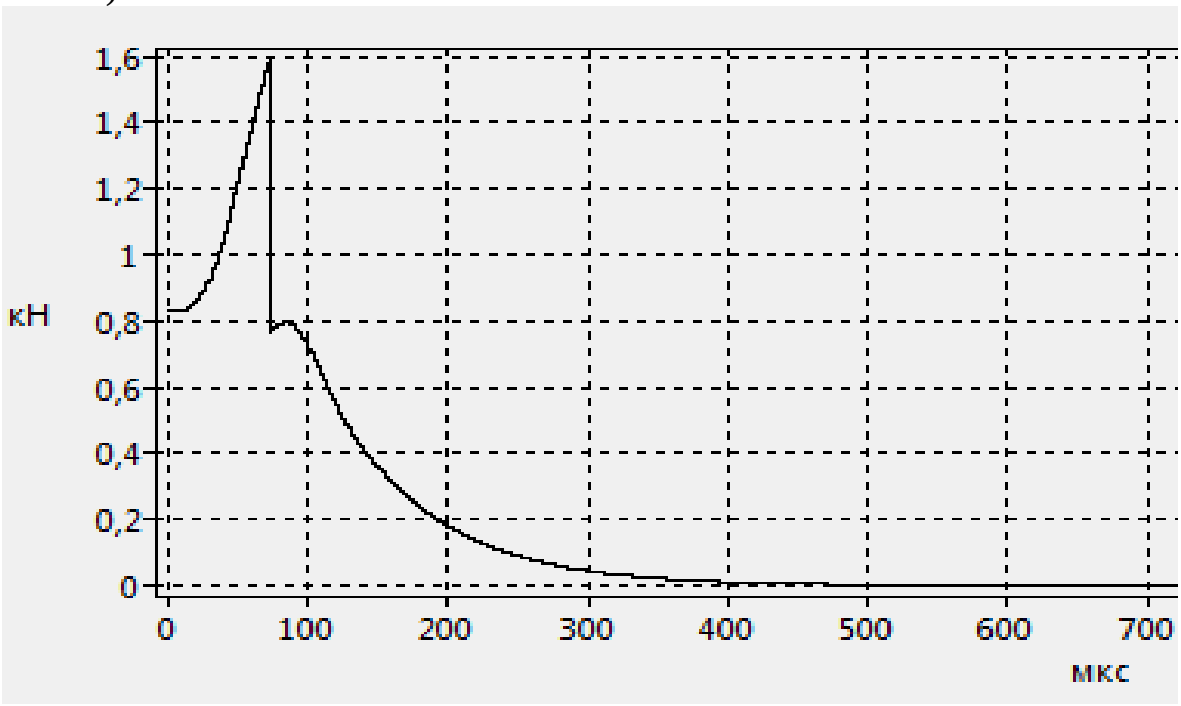


Рисунок 3 – График ударного импульса, пробегающего по волноводу, полученного при количестве расчетных шагов *T*=3000 и количестве цилиндрических ступеней *n*=92

После получения графика ударного импульса по нему рассчитываются следующие величины:

1) начальное значение силы удара: F_1;

2) максимальные значение силы удара: F_{max};

3) коэффициент усиления: $k = \frac{F_{\max}}{F_1}$;

4) энергия от удара цилиндрическим бойком постоянного сечения (образующая задана функцией: $y = \frac{d_1}{2}$) равной массы с расчетным;

5) энергия от удара рассчитываемым бойком за время удара цилиндрическим бойком постоянного сечения;

6) время первой волны от удара рассчитываемым бойком: $t_{1-ой} = \frac{2l}{V_0}$;

7) энергия первой волны от удара рассчитываемым бойком (площадь фигуры под графиком *F(t)* (рис. 3), ограниченная значением времени $t_{1-ой}$);
8) энергия двух первых волн от удара рассчитываемым бойком (площадь фигуры под графиком *F(t)* (рис. 3), ограниченная значением времени $2t_{1-ой}$).

Описанные выше математическая модель и численный метод были использованы при написании компьютерных программ «Ударный импульс 2.0» и «Анализ ударного импульса», выполненных на языке программирования OBJECT PASCAL. Эти программы предназначены для расчета и анализа ударных импульсов бойков сложной геометрической формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О.Д. Бурильные машины / О.Д. Алимов, Л.Т. Дворников – М.: Машиностроение, 1976. – 295 с.
2. Алимов О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М.: Наука, 1985. – 360 с.
3. Манжосов В.К. Продольный удар. – Ульяновск: УлГТУ, 2007.- 358 с.
4. Шапошников И.-И.Д. Некоторые задачи продольного соударения стержней // МашиноСтроение. – 2010. – №20. – С. 84-90.
5. Еремьянц В.Э. Волновые процессы в волноводе ударной системы «боёк – волновод – пластина» // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2011. – №1(53). – С. 35-38.
6. Еремьянц В.Э. К вопросу о рациональной форме бойков ударно-вращательных бурильных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №5. – С. 74-82.
7. Юнгмейстер Д.А. Модернизация ударных буровых механизмов / Д.А. Юнгмейстер, Л.К. Горшков, В.А. Пивнев и др. – СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. – 149 с.
8. Дворников Л.Т. Рациональное проектирование ударных систем технологического назначения / Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2012. – №2. – С. 15-20.
9. Жуков И.А. Теоретические основы создания и исследования системы «боек – волновод – инструмент» машин ударного действия, предназначенных для разрушения горной породы // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – №2. – С. 311-319.
10. Zhukov I.A. Rational designing two-stage anvil blocks of impact mechanisms / I.A. Zhukov, V.V. Molchanov // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 699-702. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.699.

11. Zhukov I.A. Development of the anvil blocks forms of impact machines as composition of different materials / I.A. Zhukov, E.V. Sarakhanova, Ya.A. Andreeva // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – P. 663-666. – doi: 10.1063/1.4899032.
12. Жуков И.А. Исходные основания к изучению влияния форм бойков на форму ударного импульса в машинах ударного действия // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №5(105). – С. 25-27.
13. Жукова Е.В., Жуков И.А., Подгорных Л.Б. Историческая ретроспектива исследований проблем теории продольного удара, применительно к машинам технологического назначения // МашиноСтроение. – 2014. – №23. – С. 21-34.
14. Zhukov I.A., Dvornikov L.T. New constructive solutions of anvil-blocks of percussion mining machines. – North Charleston: CreateSpace, 2015. – 130 p.
15. Иванов К.И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. Изд. 2, перераб. / К.И. Иванов, М.С. Варич, В.И. Дусев и др. – М.: Недра, 1974. – 408 с.
16. Жуков И.А. Автоматизированный программный комплекс для определения рациональных параметров ударных систем технологического назначения // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2013. – №1. – С. 32-35.
17. Тимофеев Е.Г. К разработке специализированного программного обеспечения для анализа сложных форм бойков ударных механизмов / Е.Г. Тимофеев, И.А.Жуков // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2014. – №2. – С. 7-10.
18. Жуков И.А. Моделирование продольных колебаний сложных бойков ударных систем / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев, В.В. Молчанов // Научное обозрение. – 2015. – №5. – С. 90-93.
19. Жуков И.А. Инструментальные средства для автоматизации проектирования машин и механизмов ударного действия / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев // Проблемы механики современных машин: Материалы VI Международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. –Т. 3. – С. 161-167.
20. Жуков И.А. Математическое и компьютерное моделирование ударных процессов в стержневой системе сложной геометрической формы / И.А. Жуков, Е.Г. Тимофеев, В.В. Молчанов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2015. – №3. – С. 7-11.

E.G. Timofeev, I.A. Zhukov

BY THE DEVELOP A NUMERICAL METHOD OF INVESTIGATION OF IMPACT PROCESSES IN THE CORE SYSTEM OF IMPACT MACHINES

Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

Abstract

The paper considered the development of a numerical method for the investigation of shock wave phenomena in shock nodes percussion machines. The developed numerical method is implemented as a set of software tools to simulate the firing pin given geometrical shape and find form and power characteristics generated in the rod-waveguide anvil-block shock impulse.

Key words: anvil-block, wave guide, impulse, numerical method.

REFERENCES

[1] Alimov O. D. Drilling machines / O. D. Alimov, L. T. Dvornikov, Moscow: Mashinostroenie, 1976. 295 p. (rus.)
[2] Alimov O.D. Hit. Propagation of strains in shock systems / O.D. Alimov, V.K. Manzhosov, V.E. Eremyants. M .: Nauka, 1985 360 p. (rus.)
[3] Manzhosov V.K. Longitudinal stroke. Ulyanovsk: Ulstu 2007. 358 p. (rus.)
[4] Shaposhnikov I.-I.D. Some tasks longitudinal impact rods // Mechanical Industry. 2010. №20. Pp. 84-90. (rus.)
[5] Eremyants V.E. Wave processes in the shock wave guide system "striker - waveguide - plate" // Bulletin of Ulyanovsk State Technical University. - 2011. №1 (53). Pp. 35-38. (rus.)
[6] Eremyants V.E. On the question of rational form strikers shock-rotary drilling machines // Physical and technical problems of mining. 2011. №5. Pp. 74-82. (rus.)
[7] Ungmeyster D.A. Modernization of percussion drilling machinery / D.A. Yungmeyster, L.K. Gorshkov, V.A. Pivnev etc. SPb .: Publishing house "Politehnica Service», 2012. 149 p. (rus.)
[8] Dvornikov L.T. Rational design of shock systems of technological assignment / L.T. Dvornikov, I.A. Zhukov // Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2012. №2. Pp. 15-20. (rus.)
[9] Zhukov I.A. Theoretical bases of creation and research system " anvil-block - wave guide - tools» Impact machines for breaking rock // Modern engineering. Science and education. 2012. №2. Pp. 311-319. (rus.)
[10] Zhukov I.A. Rational designing two-stage anvil blocks of impact mechanisms / I.A. Zhukov, V.V. Molchanov // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 699-702. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.699.
[11] Zhukov I.A. Development of the anvil-blocks forms of impact machines as composition of different materials / I.A. Zhukov, E.V. Sarakhanova, Ya.A. Andreeva // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1623. Pp. 663-666. doi: 10.1063/1.4899032.

[12] Zhukov I.A. The starting base to explore the impact of the anvil-blocks in the form of a shock impulse shape percussion machines // Herald of the Kuzbass State Technical University. 2014. №5 (105). Pp. 25-27. (rus.)
[13] Zhukova E.V., Zhukov I.A., L.B. Podgornykh Historical retrospective studies problems longitudinal impact theory, as applied to machines of technological assignment // Mechanical Industry. 2014. №23. Pp. 21-34. (rus.)
[14] Zhukov I.A., Dvornikov L.T. New constructive solutions of anvil-blocks of percussion mining machines. North Charleston: CreateSpace, 2015. 130 p.
[15] Ivanov K.I. Drilling Technique in the development of mineral deposits. Ed. 2, Revised. / K.I. Ivanov, M.S. Varich, V.I. Dusev etc.. Moscow. Nedra, 1974. 408 p. (rus.)
[16] Zhukov I.A. Automated software package to determine the rational parameters of shock systems of technological assignment // Computer-aided design in mechanical engineering. 2013. №1. Pp. 32-35. (rus.)
[17] Timofeev E.G. By the development of specialized software for the analysis of complex shapes anvil-blocks impact mechanisms / E.G. Timofeev, I.A. Zhukov // Computer-aided design in mechanical engineering. 2014. №2. Pp. 7-10. (rus.)
[18] Zhukov IA Simulation of longitudinal vibrations of complex systems Percussion anvil-blocs / I.A. Zhukov E.G. Timofeev V.V. Molchanov // Scientific Review. 2015. №5. Pp. 90-93. (rus.)
[19] Zhukov I.A. Tools for automation of design of machines and mechanisms of impact actions / I.A. Zhukov E.G. Timofeev // Problems of modern machines: Proceedings of the VI International Conference. Ulan-Ude: Izd VSGUTU, 2015.Vol. 3. Pp. 161-167. (rus.)
[20] Zhukov I.A. Mathematical and computer modeling of impact processes in the core system of complex geometric shapes / I.A. Zhukov E.G. Timofeev V.V. Molchanov // Computer-aided design in mechanical engineering. 2015. №3. Pp. 7-11. (rus.)

УДК 621.833 + 621.8.024.4; DOI 10.1872/MMF-2016-53

Б.П. Тимофеев[1], М.Ю. Сачков[2]

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТО-ПОВОДКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

[1]Борис Павлович Тимофеев, д.т.н., профессор
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 232-3150,E-mail: mechatronic@mail.ifmo.ru.

[2]Михаил Юрьевич Сачков, к.т.н.,
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 232-3150, E-mail: Urie2006@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы приближенных передач зацеплением на пересекающихся ортогональных осях. Результаты математического моделирования показали, что даже значительные погрешности изготовления и монтажа приводят к изменению ошибки функции перемещения на один порядок меньше ее номинального значения.

Ключевые слова: коническая зубчато-поводковая передача, погрешности изготовления и монтажа, функция перемещения, приближенная передача.

Введение

Конические зубчато-поводковые передачи работоспособны на параллельных [1-2] и пересекающихся ортогональных осях. Для определения параметров движения использовались матричные методы исследования пространственных зацеплений.[3-5] Системы координат, связанные с полученным трехзвенным механизмом представлены на рис. 1.

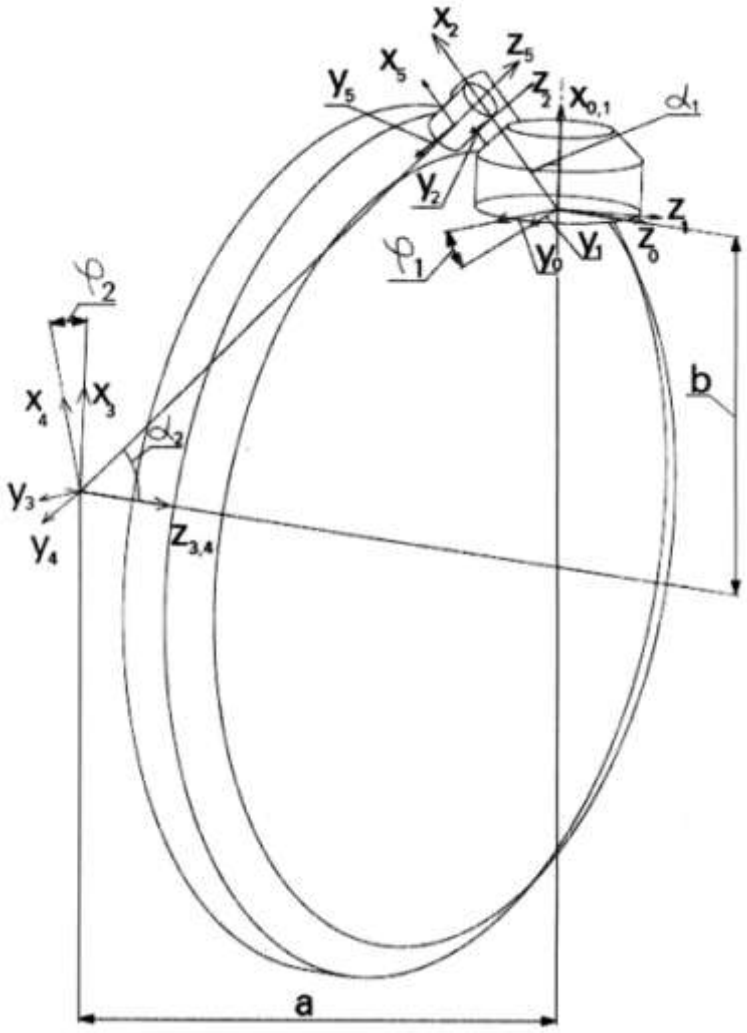


Рисунок 1. Взаимное расположение систем координат

Функция положения конической зубчато-поводковой передачи:

$$\begin{cases} R_1 ctg\alpha_1 + u_1\cos\alpha_1 + \rho_1\sin\alpha_1\sin\theta_1 - \left(R_2\cos\varphi_2 - b + u_2\cos\varphi_2\sin\alpha_2 - \rho_2\sin\varphi_2\sin\theta_2 + \rho_2\cos\varphi_2\cos\alpha_2\cos\theta_2\right) = 0; \\ R_1\sin\varphi_1 + u_1\sin\varphi_1\sin\alpha_1 + \rho_1\cos\varphi_1\cos\theta_1 - \rho_1\cos\alpha_1\sin\varphi_1\sin\theta_1 - \\ -\left(R_2\sin\varphi_2 + u_2\sin\varphi_2\sin\alpha_2 + \rho_2\cos\varphi_2\sin\theta_2 + \rho_2\cos\alpha_2\cos\theta_2\sin\varphi_2\right) = 0; \\ \rho_1\sin\varphi_1\cos\theta_1 - u_1\cos\varphi_1\sin\alpha_1 - R_1\cos\varphi_1 + \rho_1\cos\varphi_1\cos\alpha_1\sin\theta_1 - \left(R_2 ctg\alpha_2 - a + u_2\cos\alpha_2 - \rho_2\sin\alpha_2\cos\theta_2\right) = 0; \\ \sin\alpha_1\sin\theta_1 + \left(\cos\varphi_2\cos\alpha_2\cos\theta_2 - \sin\varphi_2\sin\theta_2\right) = 0; \\ \cos\varphi_1\cos\theta_1 - \cos\alpha_1\sin\varphi_1\sin\theta_1 + \left(\cos\varphi_2\sin\theta_2 + \cos\alpha_2\cos\theta_2\sin\varphi_2\right) = 0; \\ \sin\varphi_1\cos\theta_1 + \cos\varphi_1\cos\alpha_1\sin\theta_1 - \cos\theta_2\sin\alpha_2 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

Номинальные значения исходных данных математического моделирования зацепления примем следующими:

$z_1 = 10,\ z_2 = 49,\ \rho_1 = \rho_2 = 1{,}5\ [мм],\ \alpha_1 = \alpha_2 = \pi/4$,

Зубчато-поводковые колеса – сборочные единицы. В качестве поводка целесообразно использовать стандартные элементы, такие как цилиндрические штифты.[6,7] Их установка в ступицу сопровождается неизбежными погрешностями угла при вершине дополнительного конуса, образующими которого являются оси поводков. Выполнение ступицы из алюминиевых или композитных материалов позволяет существенно улучшить динамические параметры передачи. Цилиндрические штифты устанавливаются существующими технологическими методами.[8,9] Значение отклонения угла раствора конуса для каждого поводка будет индивидуален.

Анализ влияние погрешностей изготовления на параметры движения

Для количественной оценки выполним расчет ошибки функции перемещения и «скачка» передаточного отношения увеличив значение угла α_2 на величину допуска углового размера 10-й степени точности согласно ГОСТ 8908-81.[10] Расчетные значения представлены на рисунке 1(а, б).

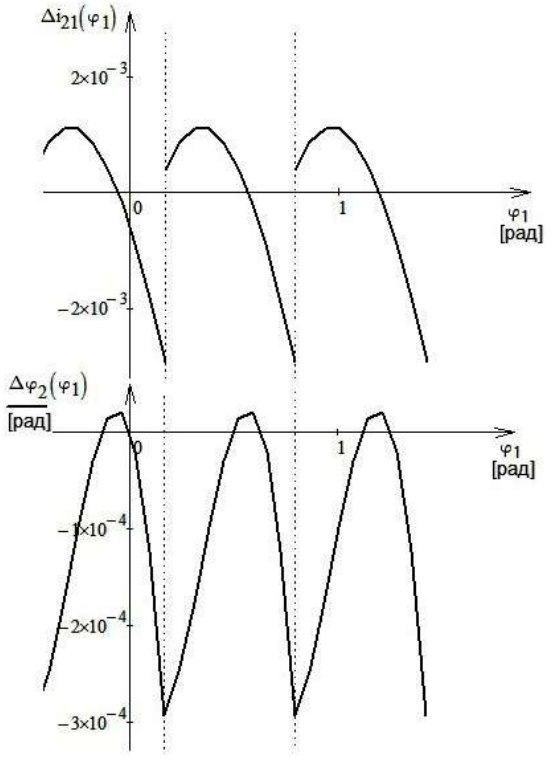


Рисунок 2. Зависимости $\Delta\varphi_2=f_2(\varphi_1)$, $\Delta i_{21}=i_{21Д}-i_{21Н}$

Расчетные данные подтверждают отсутствие кромочного контакта в зацеплении. Ошибка функции перемещения в точке пересопряжения равна $-3\cdot10^{-4}$ радиан и отличается от номинального на $1{,}2\cdot10^{-5}$. В свою очередь «скачок» передаточного отношения равен $3.6\cdot10^{-3}$, а его изменение на два

порядка меньше. Рассмотренная погрешность изготовления отклонения не влияют на линейность функции положения.

Угловая величина погрешности установки поводка в ступицу в плоскости, проходящей через ось поводка и перпендикулярной к плоскости заданной осью поводка и рабочей осью колеса, может быть охарактеризована погрешностью окружного шага. Угловой шаг на окружности аналога диаметра зубчато-поводкового колеса – $\delta = 360^0/z_1$. Смещая угловой шаг на 10% от номинального значения, проанализируем изменения функции перемещения для различных передаточных отношений чисел поводков ведущего колеса (Рис. 3 – Рис. 6).

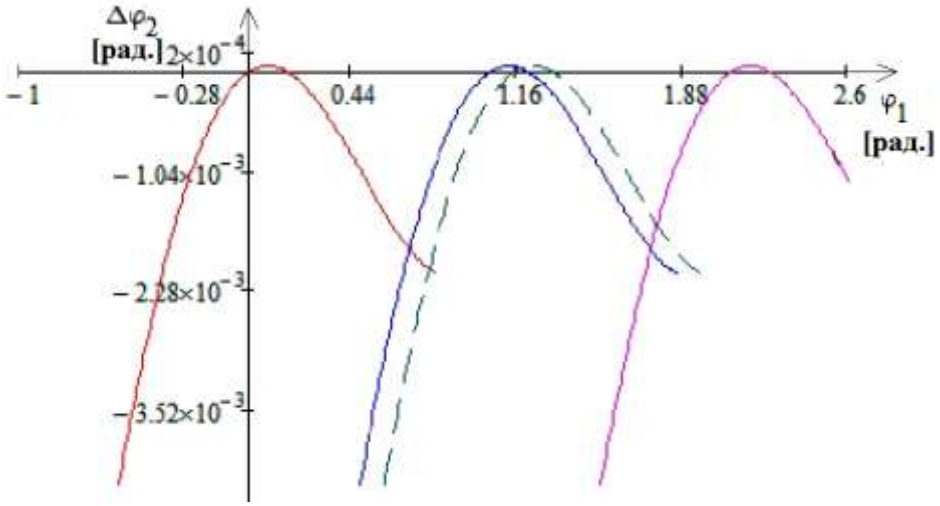


Рисунок 3. Изменение ошибки функции положения при ошибке углового шага равной 10% для зубчато-поводковой передачи с параметрами z_1=6, z_2=33

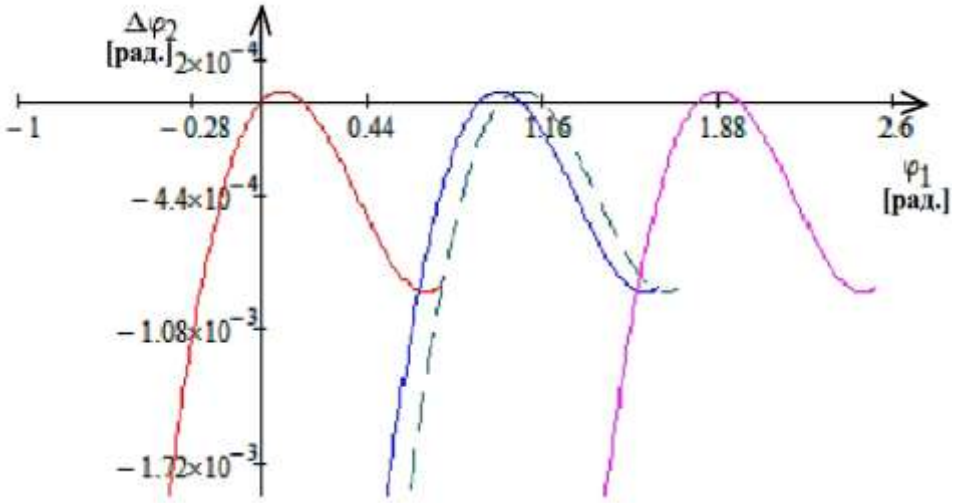


Рисунок 4. Изменение ошибки функции положения при ошибке углового шага равной 10% для зубчато-поводковой передачи с параметрами z_1=7, z_2=36

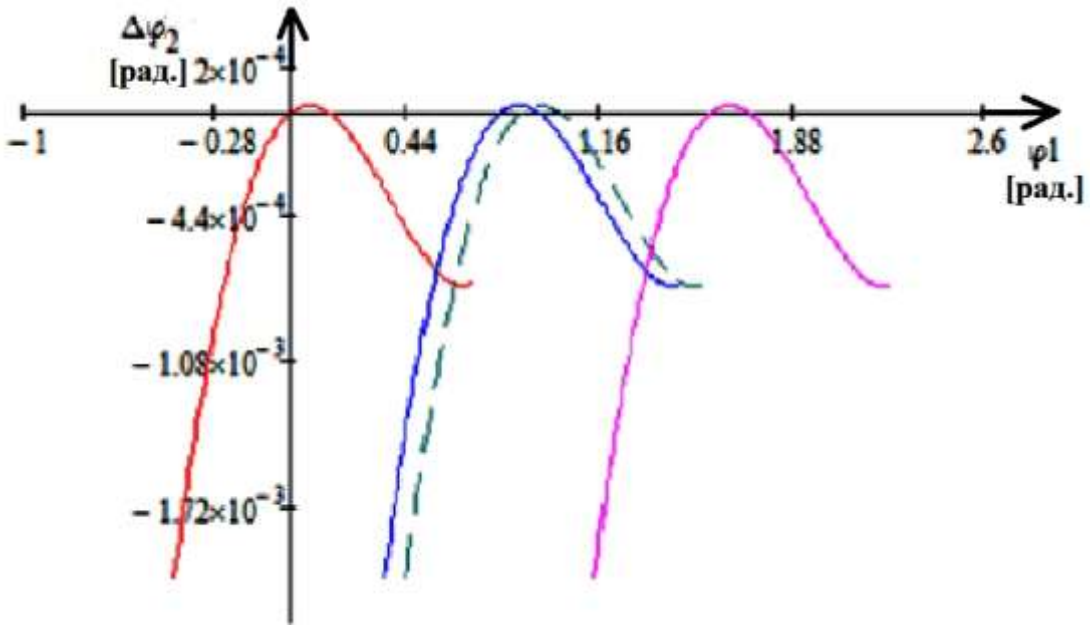


Рисунок 5. Изменение ошибки функции положения при ошибке углового шага равной 10% для зубчато-поводковой передачи с параметрами z_1=8, z_2=41

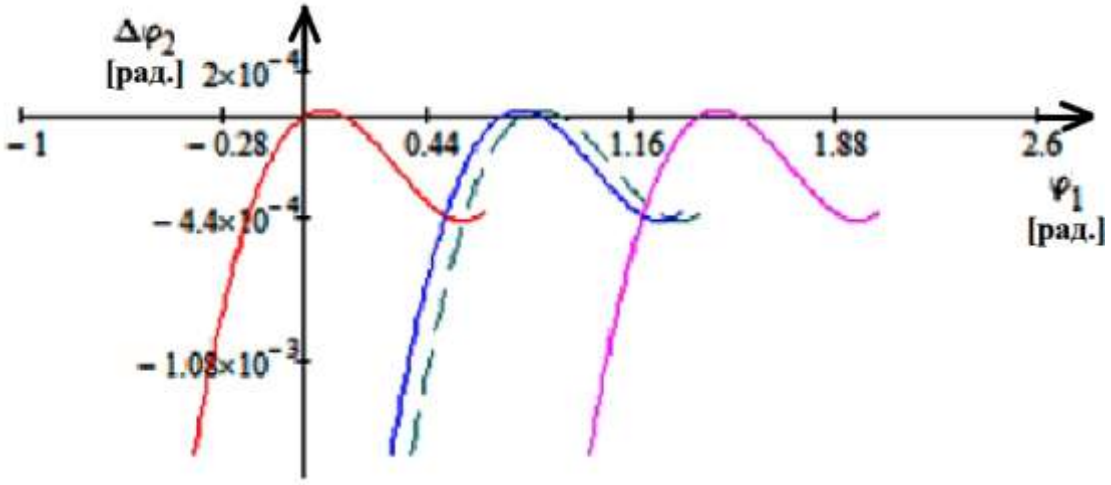


Рисунок 6. Изменение ошибки функции положения при ошибке углового шага равной 10% для зубчато-поводковой передачи с параметрами z_1=9, z_2=45

Таблица 1. Значения ошибки функции перемещения

	Номинальное значение [$\cdot 10^{-4}$ рад]	Ошибка функции перемещения с учетом погрешности шага [$\cdot 10^{-4}$ рад]	
$z_1 = 6\ z_2 = 33$	18.79	20.86	16.16
$z_1 = 7\ z_2 = 36$	9.03	8.75	8.41
$z_1 = 8\ z_2 = 41$	6.96	7.63	6.16
$z_1 = 9\ z_2 = 45$	4.50	4.60	3.95

Значение ошибки функции перемещения (см. табл. 1) уменьшается в точке пересопряжения на выходе из зацепления и увеличивается на входе для пары с учетом погрешности шага. Значение отклонения ошибки функции перемещения на один порядок меньше номинального, как и в случае цилиндрических зубчато-поводковых передач.

Анализ влияние погрешностей монтажа на параметры движения

Взаимное расположение колес относительно стойки характеризуется расстояниями «**a**» и «**b**» (Рис. 1). Рассмотрим влияния изменения расстояние *"a"* в зацеплении изменив его на величину допуска радиального биения шарикоподшипника согласно ГОСТ 520-2011 [11] шестого класса точности (Табл. 2 – 3).

Таблица 2. Значение параметров движения для различных значений чисел поводков

$z_1 = 6\ z_2 = 33\ i_{12} = 5.5$						$z_1 = 7\ z_2 = 36\ i_{12} = 5.143$					
φ_1 $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	φ_1 $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)
-3.0	0.35	13.97	-7.96	-4.49	1.37	-3.0	0.23	12.07	-7.07	-4.08	1.86
-2.4	0.45	9.6	-6.63	-4.02	0.58	-2.4	0.35	8.21	-5.81	-3.72	0.93
-1.8	0.56	6.02	-5.30	-3.42	-0.04	-1.8	0.46	5.10	-4.57	-3.21	0.19
-1.2	0.66	3.24	-4.00	-2.69	-0.49	-1.2	0.57	2.71	-3.38	-2.54	-0.34
-0.6	0.77	1.24	-2.69	-1.84	-0.76	-0.6	0.69	1.03	-2.25	-1.73	-0.67
0.0	0.88	0	-1.45	-0.86	-0.86	0.0	0.80	0	-1.19	-0.78	-0.78
0.6	0.99	-0.05	-0.29	0.24	-0.77	0.6	0.92	-0.42	-0.23	0.31	-0.67
1.2	1.10	-0.04	0.80	1.47	-0.48	1.2	1.04	-0.30	0.62	1.55	-0.33
1.8	1.20	0.04	1.76	2.81	0.02	1.8	1.15	0.29	1.33	2.93	0.25
2.4	1.32	1.73	2.61	4.28	0.72	2.4	1.27	1.27	1.90	4.45	1.07
3.0	1.43	3.51	3.30	5.88	1.65	3.0	1.39	2.53	2.30	6.12	2.15

Таблица 3. Значение параметров движения для различных значений чисел поводков

$z_1 = 8\ z_2 = 41\ i_{12} = 5.125$						$z_1 = 9\ z_2 = 45\ i_{12} = 5$					
φ_1 $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	φ_1 $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1)$ $\cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2)$ $\cdot 10^{-1}$ (мм)
-3.0	0.13	10.23	-6.13	-3.69	2.36	-3.0	0.05	9.07	-5.58	-3.33	2.84
-2.4	0.24	6.89	-5.00	-3.44	1.28	-2.4	0.17	6.05	-4.49	-3.18	1.61
-1.8	0.36	4.23	-3.89	-3.00	0.43	-1.8	0.29	3.67	-3.45	-2.82	0.65
-1.2	0.47	2.21	-2.83	-2.4	-0.18	-1.2	0.41	1.89	-2.50	-2.27	-0.05
-0.6	0.59	0.82	-1.83	-1.62	-0.55	-0.6	0.52	0.69	-1.56	-1.54	-0.47
0.0	0.71	0	-0.91	-0.68	-0.68	0.0	0.64	0	-0.74	-0.61	-0.61
0.6	0.82	-0.29	-0.07	0.43	-0.55	0.6	0.76	-0.22	-0.02	0.50	-0.47
1.2	0.94	-0.11	0.65	1.70	-0.16	1.2	0.88	-0.05	0.59	1.9	-0.03
1.8	1.06	0.47	1.26	3.13	0.49	1.8	1.00	0.45	1.06	3.27	0.71
2.4	1.18	0.14	1.72	4.73	1.43	2.4	1.12	1.20	1.39	4.94	1.76
3.0	1.29	0.25	2.02	6.50	2.66	3.0	1.24	2.09	1.55	6.79	3.14

По полученным данным (Табл. 2 – 3) можно сказать, что максимальное отклонение ошибки функции положения от номинального значения составляет $1.97 \cdot 10^{-4}$ радиан, отклонение «скачка» передаточного отношения – $0.17 \cdot 10^{-3}$, а линия контакта не выходит на кромку.

Рассмотрим влияние изменения расстояния «**b**» (Рис. 1) аналогично расстоянию «**a**», при неизменных прочих условиях (Табл. 4 – 5).

Таблица 4. Значение параметров движения для различных значений чисел поводков

$z_1 = 6\ z_2 = 33\ i_{12} = 5.5$						$z_1 = 7\ z_2 = 36\ i_{12} = 5.143$					
$\varphi_1 \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1) \cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$\varphi_1 \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1) \cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2) \cdot 10^{-1}$ (мм)
-3.0	0.35	14.86	-8.25	-4.64	1.36	-3.0	0.23	12.88	-7.33	-4.22	1.86
-2.4	0.45	10.30	-6.93	-4.17	0.58	-2.4	0.35	8.86	-6.08	-3.86	0.92
-1.8	0.56	6.55	-5.59	-3.57	-0.04	-1.8	0.46	5.58	-4.84	-3.35	0.19
-1.2	0.66	3.59	-4.27	-2.84	-0.49	-1.2	0.57	3.04	-3.65	-2.69	-0.35
-0.6	0.77	1.42	-2.99	-1.98	-0.76	-0.6	0.69	1.19	-2.52	-1.88	-0.67
0.0	0.88	0	-1.75	-1.00	-0.86	0.0	0.80	0	-1.46	-0.92	-0.78
0.6	0.99	-0.69	-0.58	0.10	-0.77	0.6	0.92	-0.58	-0.50	0.17	-0.67
1.2	1.10	-0.71	0.51	1.33	-0.48	1.2	1.04	-0.62	0.35	1.41	-0.33
1.8	1.20	-0.11	1.48	2.67	0.02	1.8	1.15	-0.19	1.07	2.79	0.24
2.4	1.32	1.04	2.33	4.14	0.72	2.4	1.27	0.64	1.64	4.31	1.07
3.0	1.43	2.66	3.03	5.73	1.65	3.0	1.39	1.75	2.05	5.98	2.15

Таблица 5. Значение параметров движения для различных значений чисел поводков

$z_1 = 8\ z_2 = 41\ i_{12} = 5.125$						$z_1 = 9\ z_2 = 45\ i_{12} = 5$					
$\varphi_1 \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1) \cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$\varphi_1 \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-1}$ (рад)	$\Delta\varphi_2(\varphi_1) \cdot 10^{-4}$ (рад)	$\Delta i_{12}(\varphi_1) \cdot 10^{-3}$ (рад)	$u_1(\theta_1) \cdot 10^{-1}$ (мм)	$u_2(\theta_2) \cdot 10^{-1}$ (мм)
-3.0	0.13	10.94	-6.37	-3.84	2.36	-3.0	0.05	9.71	-5.79	-3.48	2.84
-2.4	0.24	7.46	-5.23	-3.58	1.28	-2.4	0.17	6.57	-4.71	-3.32	1.61
-1.8	0.36	4.66	-4.13	-3.14	0.43	-1.8	0.29	4.06	-3.67	-2.97	0.65
-1.2	0.47	2.50	-3.07	-2.54	-0.18	-1.2	0.41	2.15	-2.67	-2.42	-0.05
-0.6	0.59	0.96	-2.07	-1.76	-0.55	-0.6	0.52	0.82	-1.78	-1.68	-0.47
0.0	0.71	0	-1.14	-0.82	-0.68	0.0	0.64	0	-0.96	-0.75	-0.61
0.6	0.82	-0.43	-0.31	0.29	-0.55	0.6	0.76	-0.35	-0.23	0.36	-0.47
1.2	0.94	-0.39	0.42	1.56	-0.16	1.2	0.88	-0.30	0.38	1.65	-0.03
1.8	1.06	0.05	1.03	2.99	0.49	1.8	1.00	0.07	0.85	3.13	0.71
2.4	1.18	0.81	1.49	4.59	1.43	2.4	1.12	0.69	1.18	4.80	1.76
3.0	1.29	1.81	1.80	6.36	2.65	3.0	1.24	1.46	1.35	6.65	3.13

При изменении расстояния «**b**» ошибка функции положения и изменение передаточного отношения отличаются от своих номинальных значений на величины – $0{,}52 \cdot 10^{-4}$ радиан и $0{,}18 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

Смещение расстояния «**b**» в большей степени на параметры движения меньше чем смещение «**a**».

По полученным данным, можно заключить, что коническая зубчато-поводковая передача в большей степени чувствительна к погрешностям монтажа, чем изготовления. Полученные расчетные данные подтверждают работоспособность передачи и малые значения кинематических погрешностей. Данная передача может найти применение в приводах отраслей приборостроения и машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б.П. Тимофеев, М.Ю. Сачков. Синтез зубчато-поводковых передач по условию отсутствия кромочного контакта// Теория механизмов и машин. – 2015. – Т.13. – № 2(26). – С. 23-32.
2. Патент № 146159. Российская Федерация, МПК F16H 55/10 F15H 55/17. Колесо для передачи вращательного движения // Тимофеев Б.П., Сачков М.Ю.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики". – № 2014120175/11; заявл. 19.05.2014 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
3. D. Babichev, S. Lagutin, N. Barmina. Review of the Russian school in the theory and geometry of gearing Part 1. Origins of the theory of gearing and its Golden period of 1935-1975 // Proceedings of 2015 IFToMM Workshop on History of Mechanism and Machine Science. - St-Petersburg, Russia, 2015.
4. Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. Л., «Машиностроение», 1973. 696 с.
5. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Физматгиз, 1960. – 444 с.
6. ГОСТ 3128-70 Штифты цилиндрические незакаленные. Технические условия. Введ. 30.06.1971. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8 с.
7. DIN EN 22338 Unhardened parallel pins (ISO 2338:1986); german version EN 22338. 01.10.1992.
8. И.М. Морозов, В.Ю. Шамин. Основы технологии сборки в машиностроении: Учебное пособие. Компьютерная версия. — 2-е изд., перер. и доп. — Челябинск: ЮУрГУ, 2006. — 72 с.
9. П.И. Орлов. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие В 2-х кн. Кн. 2. Под ред. П.Н. Учаева – 3-е изд., исправл – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с. ил.
10. ГОСТ 8908-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные углы и допуски углов. Введ. 01.01.1982. М.: Изд-во стандартов, 1982. 10 с.
11. ГОСТ 520-2002 Подшипники качения. Общие технические условия. Введ. 01.07.2012. М.: Изд-во стандартов, 2012. 65 с.

B.P.Timofeev[1], M.Yu.Sachkov[2]

MATHEMATICAL MODELING OF BEVEL ROD-TOOTHED TRANSMISSION

all: The ITMO University, Russia

Abstract

The paper deals with the approximate gearing on intersecting orthogonal axes. Mathematical modeling results showed that even significant errors of manufacturing and installation lead to the displacement error function changing an order of magnitude less than the nominal value.

Key words: bevel rod-toothed transmission, error of manufacture and assembly, function of the movement, approximate transmission.

REFERENCES

[1] Timofeev B.P., Sachkov M.Yu. Synthesis of the rod-toothed transmission by the hypothesis of a lack of edge // Theory of mechanisms and machines. 2015. Vol. 13. № 2(26). Pp. 23-32.

[2] Patent № 146159. Russian Federation, IPC F16H 55/10 F15H 55/17. Wheel to transmit rotary motion // Timofeev BP, Sachkov M.Yu. . The applicant and the patentee Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics." - № 2014120175/11; appl. 05/19/2014; publ. 10.10.2014, Bull. Number 28.

[3] D.Babichev, S.Lagutin, N.Barmina. Review of the Russian school in the theory and geometry of gearing Part 1. Origins of the theory of gearing and its Golden period of 1935-1975. Proceedings of 2015 IFToMM Workshop on History of Mechanism and Machine Science. St-Petersburg, Russia, 2015.

[4] Litvin F.L. Designing mechanisms and details of devices. Leningrad. "Engineering", 1973. 696 p.

[5] Litvin F.L. Theory of gearing. Moscow. Fizmatgiz, 1960. - 444 p.

[6] GOST 3128-70 Cylindrical pins unhardened. Specifications. Introduced. 06.30.1971. Moscow. Publishing House of Standards, 1992. 8.

[7] DIN EN 22338 Unhardened parallel pins (ISO 2338: 1986); German version EN 22338. 01.10.1992.

[8] I.M. Morozov, V.Y. Savin. Fundamentals of assembly technology in mechanical engineering: Textbook. The PC version. - 2nd ed, revised and supplemente. - Chelyabinsk: South Ural State University, 2006. - 72 p.

[9] P.I. Orlov. Fundamentals of design. Reference handbook In 2 books. Book 2. Edited by P.N. Uchaeva - 3rd Edition, corrected. Moscow. Engineering, 1988. 544 p.

[10] GOST 8908-81 Basic norms of interchangeability. Normal tolerances of angles and corners. Introduced. 01.01.1982. Moscow. Publishing House of Standards, 1982. 10 p.

[11] GOST 520-2002 Rolling bearings. General specifications. Introduced. 01.07.2012. Moscow. Publishing House of Standards, 2012. 65 p

УДК 004.942 + 621.81; DOI 10.1872/MMF-2016-54

В.Л. Полонский[1], А.П. Тюрин[2]

ОПЫТ ПРЕПОДАВАНИЯ. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИНЖИНИРИНГ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

[1]Владимир Львович Полонский, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская федерация, Санкт-Петербург,
Тел.: (812) 552-6429, E-mail: Vladidir.polonsky@gmail.com.

[2]Александр Петрович Тюрин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская федерация, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)552-6429, E-mail: Alexander.p.tyurin@gmail.com

Аннотация

В работе обобщен опыт преподавания новой дисциплины "Компьютерный инжиниринг и вычислительная механика" в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого на кафедре "Машиноведение и основы конструирования" института Металлургии, машиностроения и транспорта. Приведены примеры 3D-моделирования машиностроительных конструкций и результаты прочностных расчетов, выполненных методом конечных элементов.

Ключевые слова: проектирование, прочность, жесткость, 3D-моделирование, метод конечных элементов, SolidWorks, Simulation.

В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в институте Металлургии, машиностроения и транспорта ведется подготовка конструкторов и технологов, владеющих современными компьютерными технологиями, включая весь комплекс программного обеспечения современного производства CAD/CAM/CAE. Кафедра "Машиноведение и основы конструирования" активно участвует в этой работе, готовя магистров в рамках направления "Прикладная механика" по специальности "Динамика и прочность машин".

Кроме общетехнической подготовки и традиционного курса "Детали машин и основы конструирования" и других дисциплин общетехнической подготовки [1-5] на кафедре преподается новая специальная дисциплина

"Компьютерный инжиниринг и вычислительная механика" для студентов пятого курса. Курс рассчитан на два семестра по четыре часа в неделю (одно длинное занятие в компьютерном классе). Предполагается, что студенты к началу занятий имеют представление о 3D-проектировании, свободно владеют компьютером и имеют представление о методе конечных элементов.

Основная цель дисциплины – познакомить студентов современным методам проектирования и расчета достаточно сложных изделий машиностроения. В процессе обучения моделируется полный цикл профессиональной деятельности конструктора от согласования технического задания до 3D-моделирования, расчетов на прочность и жесткость методом конечных элементов и оформления рабочей конструкторской документации. В качестве основного объекта проектирования не случайно выбран литой корпус многоступенчатого редуктора, валы-шестерни, зубчатые и червячные колеса, детали муфт, стаканы и крышки, так как конструкция этих изделий знакома студентам по опыту выполнения курсового проекта на третьем курсе по дисциплине "Детали машин и основы конструирования".

Рассматриваемая дисциплина содержит два связанных между собой раздела: "Компьютерный инжиниринг" и "Вычислительная механика".

В осеннем семестре в процессе обучения по первой части курса "Компьютерный инжиниринг" изучаются основные приемы 3D-проектирования. В качестве инструмента используется программа SolidWorks [6]. Программа SolidWorks широко используется на машиностроительных предприятиях как в России, так и за рубежом. Выбор программы для обучения студентов обусловлен привычным и удобным интерфейсом, так как SolidWorks является приложением операционной системы Windows. Программа русифицирована, давно присутствует на компьютерном рынке и содержит все необходимые инструменты для успешной работы.

Моделирование деталей и сборочных единиц студенты выполняют самостоятельно по индивидуальным заданиям после демонстрации на экране возможностей программы и пояснений преподавателя. При проверке моделей преподаватель обращает внимание на соответствие разработок существующим нормам и стандартам, а также на грамотное использование стандартных элементов, предоставляемых программой. Особое внимание уделяется использованию при проектировании элементов механических передач отечественной разработке фирмы Аскон программы "Валы и механические передачи" из пакета программы КОМПАС-3D. Данная программа позволяет выполнять геометрические и прочностные расчеты передач на высоком профессиональном уровне и использовать при 3D-моделировании библиотеку стандартных элементов, выполненных по российским стандартам. Не менее важное значение

уделяется рациональному выбору материала деталей, способам термической и химико-термической обработки.

Обучение студентов в осеннем семестре заканчивается оформлением пояснительной записки курсовой работы по результатам выполнения наиболее трудоемкого задания – проектирования корпуса редуктора, представленного в виде 3D-модели сборочной единицы, состоящей из литого корпуса, крышек и крепежных элементов (рис. 1).

Рис. 1. Пример 3D модели корпуса редуктора

Вторая часть курса "Вычислительная механика" посвящена в основном прочностным расчетам методом конечных элементов с помощью программы SolidWorks Simulation [7]. На примере стандартных задач теории упругости (Лямэ, Кирша, Герца, консольная балка, работающая на изгиб и кручение) изучаются основные возможности программы [8,9].

Для обучения расчетам более сложных объектов используются 3D-модели ранее спроектированных изделий, например, фланцевых муфт, в двух конфигурациях (с болтами, установленнымисв отверстия фланцев с зазором и без зазора). Студенты изучают приемы разбивки на конечные элементы сложные по геометрии конструкции, способы уплотнения сетки конечно-элементной модели. Особое внимание уделяется правилам выбора граничных условий, контактного взаимодействия деталей в сборке (контактные задачи), эмуляции различными способами затяжки резьбовых

соединений, поиску ошибок, анализу результатов расчета и оценки работоспособности изделия.

На заключительном этапе обучения студентам предлагается оценить работоспособность редуктора, используя ранее выполненную 3D-модель литого корпуса. Разрабатываются два варианта конечно-элементной модели корпуса.

Первая модель – только корпус и подшипниковыми крышками и крепежными элементами (рис. 1-3). Нагружение корпуса осуществляется от реакций в подшипниковых узлах от действия усилий, возникающих в зубчатых и червячных зацеплениях. При этом учитываются также нагрузки на консольные участки валов редуктора.

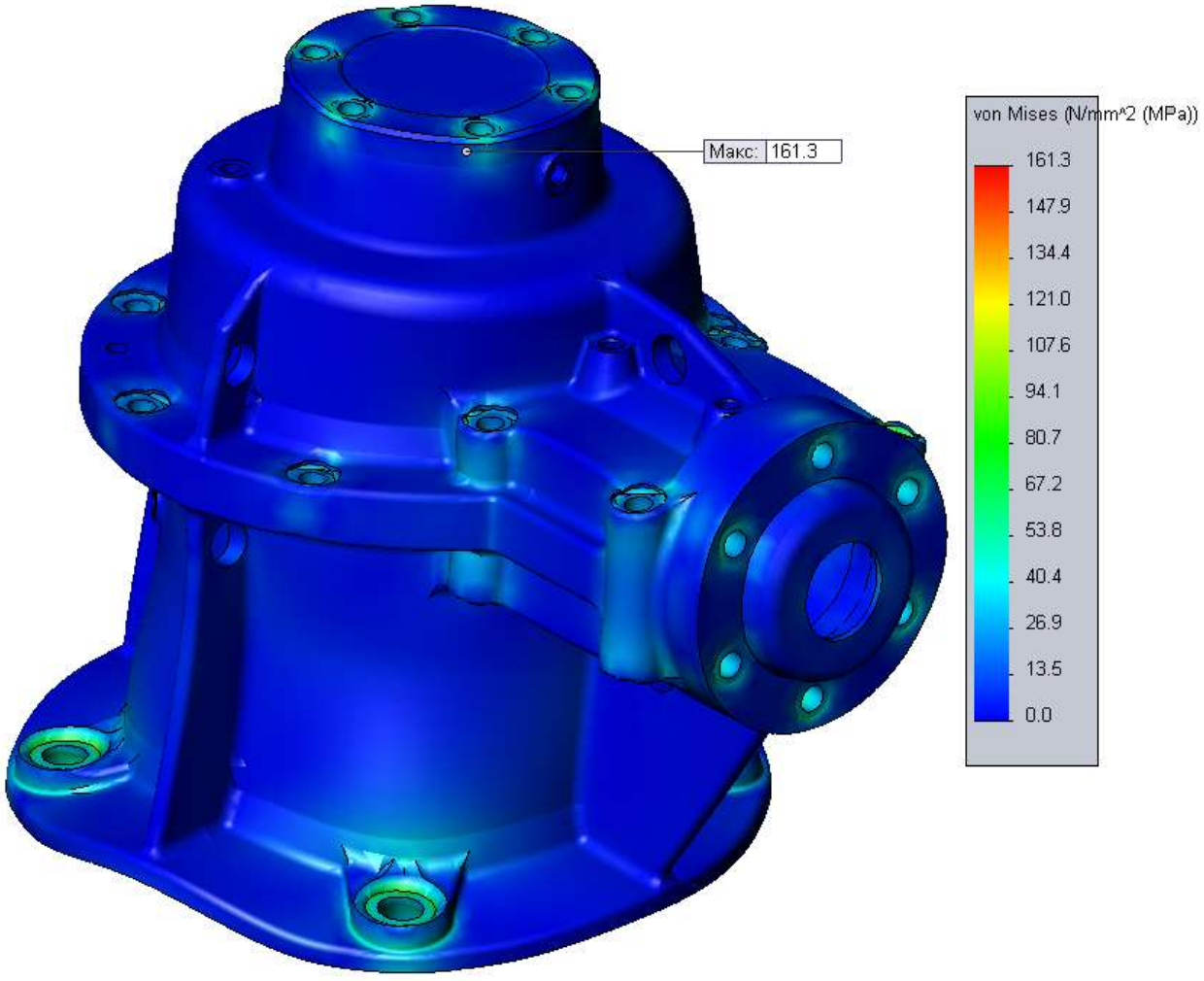


Рис. 2. Поле напряжений корпуса редуктора по критерию фон Мизеса

Вторая модель кроме корпуса, крышек и крепежных элементов содержит упрощенные модели валов, колес и подшипников (рис.4, рис.5). Упрощение состоит в том, что раз конечно-элементный анализ этих деталей в данном задании не требуется, то вал с соответствующими колесами и подшипниками можно рассматривать как единое тело.

Упрощенные модели валов позволяют напрямую задавать усилия в зацеплениях, полученные при расчетах зубчатых и червячных передач.

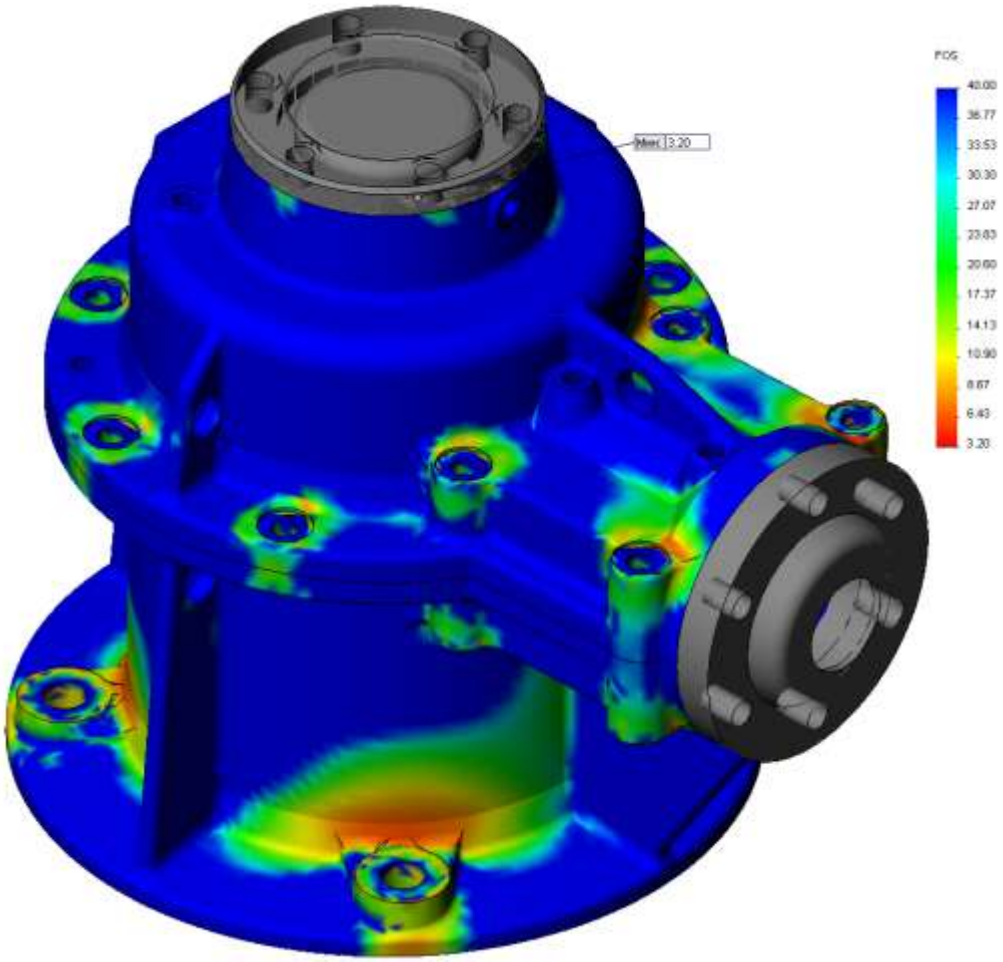


Рис. 3. Поля напряжений корпуса редуктора по критерию коэффициент запаса прочности

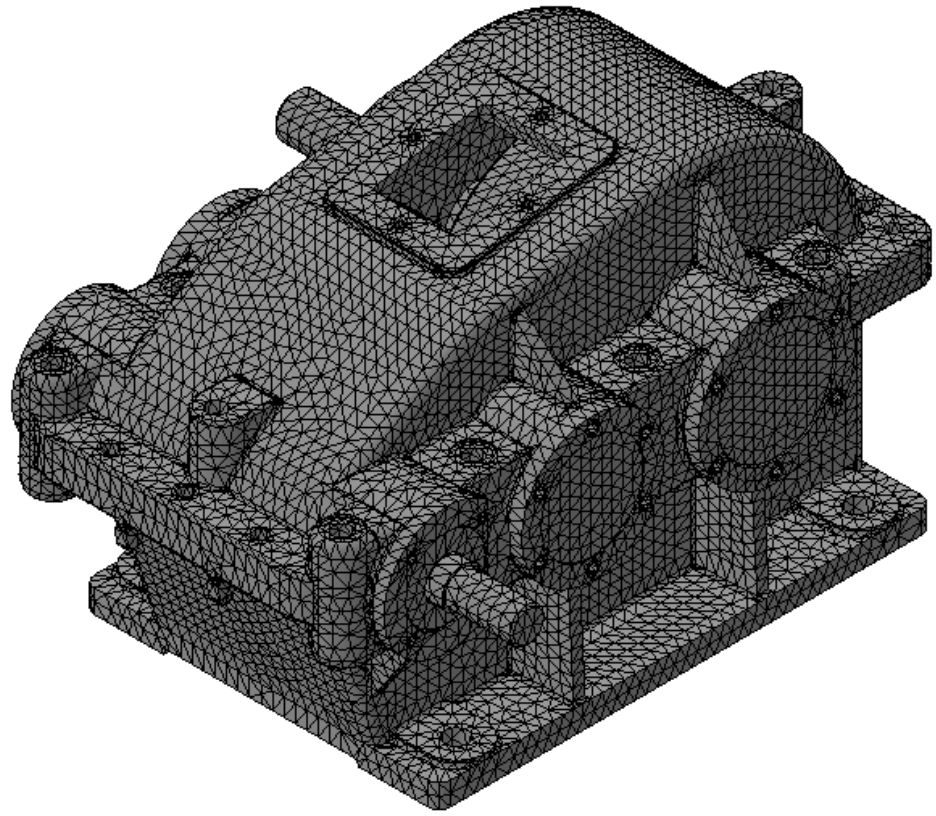


Рис. 4. Конечно-элементная модель корпуса редуктора

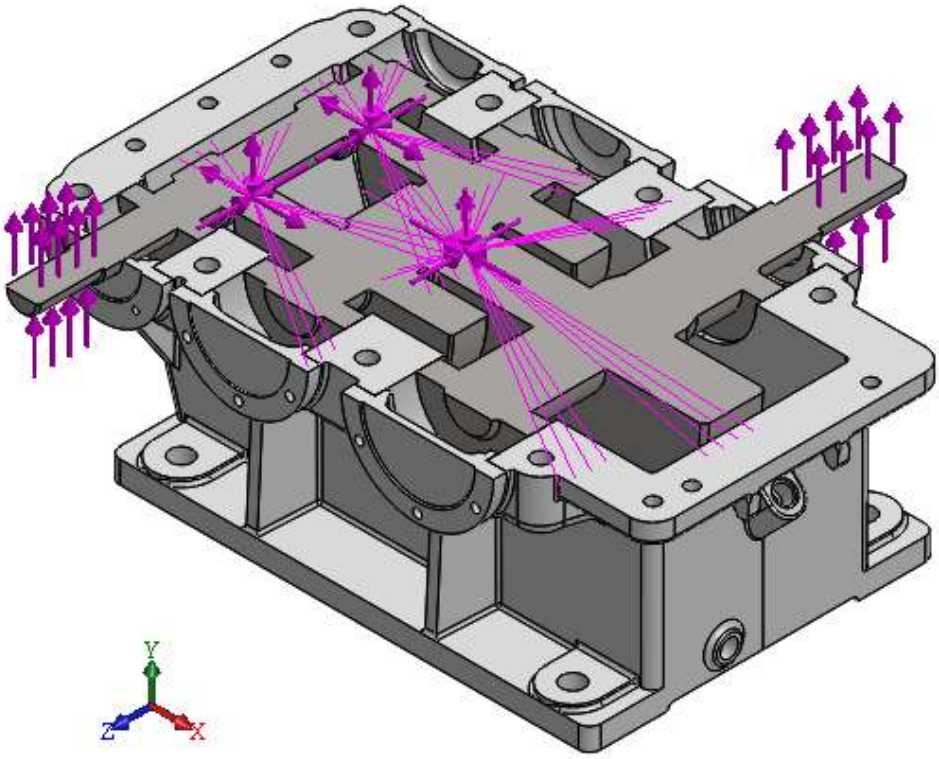


Рис. 5. Граничные условия,задаваемые при расчете корпуса редуктора

Пояснительная записка курсового проекта по дисциплине "Компьютерный инжиниринг и вычислительная механика" содержит описание каждого этапа проектирования корпуса редуктора, расчеты нагрузочной способности механических передач, конечно-элементные модели корпуса, расчеты корпуса по заданным критериям работоспособности (обычно по критериям прочности и жесткости) и заключение о работоспособности разработанной конструкции.

Экзамен проходит в форме защиты студента выполненного проекта. Несмотря на кажущуюся простоту экзамена, студентам пятого курса бывает достаточно трудно подготовить короткий, но содержательный доклад и четко формулировать ответы на вопросы экзаменационной комиссии. Поэтому мы считаем, что подготовка к выступлению на экзамене и полученные навыки в умении грамотно излагать свои мысли поможет студентам в дальнейшем при защите магистерской диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин А.П. Опыт преподавания дисциплины "Системы приводов и механические передачи" в Санкт-Петербургском государственном университете // Современное машиностроение. Наука и образование: Сб. материалов межд. научно-практ. конф. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2011. – С. 94-97.
2. Корнилов В.И., Тюрин А.П.. Детали машин и основы конструирования: Методические указания по решению задач // СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 54 С.
3. Тюрин А.П., Корнилов В.И.. Детали машин и основы конструирования. Задачник [Электронный ресурс]: Учебное пособие // Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Кафедра машиноведения и основ конструирования, – 2015. URL: http://elib.spbstu.ru/d1/2/5223.pdf.
4. Тюрин А.П. Детали машин и основы конструирования [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсовому проектированию // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра "Машиноведения и основы конструирования", – 2016. URL: http://elib.spbstu.ru/d1/2/s16-26.pdf.
5. Егоров В.И., Заборский Е.В., Корнилов В.И., Макарова Р.Д., Михайлов Ю.К., Тюрин А.П.. Детали машин. Разработка и оформление конструкторской документации курсового проекта// СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 40 С.
6. Алямовский А.А.. SolidWorks 2007/2008: Компьютерное моделирование в инженерной практике // СПб.: БХВ-Петербург, 2008 .— 1040 С.

7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. // М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 С.
8. Ашейчик А.А., Полонский В.Л., Чулкин С.Г. Вычислительная механика: расчет деталей машин методом конечных элементов: учебное пособие // СПб: Изд-во СПбГПУ, 2011. – 301 С.
9. Лазарев С.О., Полонский В.Л., Ашейчик А.А. Вычислительная механика. Часть 2: учебное пособие// СПб: Изд-во СПбГПУ, 2007. – 122 С.
10. Лазарев С.О., Полонский В.Л. Вычислительная механика: учебное пособие// СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. – 86 С.

V.L. Polonsky, A.P. Tyurin

EXPERIENCE OF TEACHING. COMPUTER ENGINEERING AND COMPUTATIONAL MECHANICS

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The experience of teaching new discipline "Computer engineering and computational mechanics" at the St. Petersburg polytechnic university of Peter the Great on department "Engineering Science and Bases of Designing" of institute of Metallurgy, mechanical engineering and transport is generalized in the article. Examples 3D-modeling of machine construction designs and results of the strength calculations executed by method of finite elements are given.

Key words: design, strength, rigidity 3D-modeling, finite elements method, SolidWorks, Simulation.

REFERENCES

[1] Tyurin A.H. Opyt prepodavaniya discipliny "sistemy privodov i mexanicheskie peredachi" v sankt-peterburgskom gosudarstvennom universitete// sovremennoe mashinostroenie. nauka i obrazovanie: sb. materialov mezhd. nauchno-prakt. konf. – spb: izd-vo spbgpu, 2011. Pp. 94-97. (rus.)
[2] V.I. Kornilov, A.P. Tyurin. Detali mashin i osnovy konstruirovaniya: metodicheskie ukazaniya po resheniyu zadach // SPb.: izd-vo politexn. un-ta, 2009. – 54 p. (rus.)
[3] A.P. Tyurin, V.I. Kornilov. Detali mashin i osnovy konstruirovaniya. zadachnik [elektronnyj resurs]: uchebnoe posobie // Sankt-peterburgskij gosudarstvennyj politexnicheskij universitet. institut metallurgii, mashinostroeniya i transporta. kafedra mashinovedeniya i osnov konstruirovaniya, – 2015. Url: http://elib.spbstu.ru/d1/2/5223.pdf. (rus.)

[4] Tyurin A.P. Detali mashin i osnovy konstruirovaniya [elektronnyj resurs]: uchebnoe posobie po kursovomu proektirovaniyu // sankt-peterburgskij politexnicheskij universitet petra velikogo, institut metallurgii, mashinostroeniya i transporta, kafedra "mashinovedeniya i osnovy konstruirovaniya", – 2016. Url: http://elib.spbstu.ru/d1/2/s16-26.pdf. (rus.)
[5] V.I. Egorov, E.V. Zaborskij, V.I. Kornilov, R.D. Makarova, Y.K. Mixajlov, A.P. Tyurin. Detali mashin. Razrabotka i oformlenie konstruktorskoj dokumentacii kursovogo proekta// SPb: izd-vo spbgpu, 2003. 40 p. (rus.)
[6] Alyamovskij A.A.. Solidworks 2007/2008: Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike // SPb.: bxv-peterburg, 2008 . 1040 p. (rus.)
[7] Alyamovskij A.A. Solidworks simulation. Inzhenernyj analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendacii. // Moscow. dmk press, 2015. 562 p. (rus.)
[8] Ashejchik A.A., Polonsky V.L., Chulkin S.G. Vychislitelnaya mexanika: raschet detalej mashin metodom konechnyx elementov: uchebnoe posobie// SPb: izd-vo spbgpu, 2011. 301 p. (rus.)
[9] Lazarev S.O., Polonsky V.L., Ashejchik A.A. Vychislitelnaya mexanika. chast 2: uchebnoe posobie// SPb: izd-vo spbgpu, 2007. 122 p. (rus.)
[10] Lazarev S.O., Polonsky V.L. Vychislitelnaya mexanika: uchebnoe posobie// SPb: izd-vo spbgpu, 2002. 86 p. (rus.)

УДК 621825; DOI 10.1872/MMF-2016-55

Б.Д. Кукаленко[1], С.Г. Чулкин[2]

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БАЛЛОНА ШИННО-ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МУФТЫ

[1]Борис Дмитриевич Кукаленко – к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)752-0009.

[2]Сергей Георгиевич Чулкин – д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: uwc99@mail.ru

Аннотация

Работа посвящается расчету основных элементов конструкции баллона шинно-пневматической муфты, применяемой в судовом и нефтегазовом машиностроении.

Получены выражения, позволяющие при проектировании резино-кордных баллонов шинно-пневматических муфт рассчитывать допускаемую вытяжку их кордного каркаса при вулканизации и определять периметр камеры, на которой собирают основные элементы изделия.

Рассмотрен расчет и построение профилей наружного и внутреннего протекторов резино-кордного баллона шинно-пневматической муфты с применением объемного метода, основанного на постоянстве объема резиновых смесей при шприцевании заготовок, сборке и вулканизации баллона в пресс-форме.

Показано, что предложенные зависимости обеспечивают надежную и рациональную технологию производства, исключающую дефекты (недопрессовку боковин, расслоение элементов), гарантируют требуемую работоспособность баллона и муфты в целом, и могут быть использованы при модернизации и разработке новой методики расчета шинно-пневматических муфт.

Ключевые слова: резино-кордный баллон, шинно-пневматическая муфта, прочность, долговечность.

Введение

Прочность и долговечность резино-кордных баллонов (РКБ) шинно-пневматических муфт (ШПМ), широко применяемых в приводах машин и оборудования различного назначения предопределяются не только

правильным и целесообразным выбором конструкции их несущего кордного каркаса и конфигурацией профиля баллона, определением оптимальных размеров, выбором марки резин (эластомеров), но и установлением рациональной технологии их изготовления (сборке, формовке и вулканизации изделия на специальном и типовом оборудовании шинного производства [1, с. 38-52].

Полная реализация ценных физико-механических свойств, применяемых в конструкции РКБ материалов, достигается при условии правильного конструирования баллонов и выбора таких нагрузок, которые не должны вызывать перенапряжения основных элементов (камеры, кордного каркаса, наружного и внутреннего протекторов) и чрезмерного их нагрева, появления больших деформаций и других разрушающих явлений.

Поэтому при проектировании РКБ ШПМ обязательно следует рассчитывать допускаемую вытяжку кордного каркаса при вулканизации баллонов и определять периметр вулканизованной камеры, на которой собирают основные детали баллона. Величина допускаемой вытяжки кордного каркаса при вулканизации практически не ограничена определенными нормами.

При проектировании автомобильных пневматических шин такие нормы установлены. Нарушение их приводит к возникновению технологических дефектов в вулканизованном изделии [2, 3].

1.Расчет допускаемой вытяжки кордного каркаса и периметра камеры баллона шинно-пневматической муфты

При производстве РКБ ШПМ превышение вытяжки их кордного каркаса может привести к появлению ряда технологических дефектов, таких как «недопрессовка боковины», «вздутие» в виде «пузыря» на боковине, приводящего к расслоению элементов (камеры, каркаса, боковин протектора) и др. Для исключения возникновения упомянутых дефектов расчет допускаемой вытяжки кордного каркаса баллона следует производить из условия обеспечения заранее заданной величины удельного давления прессования между стенкой пресс-формы и боковиной баллона.

Расчетная схема прессования боковин РКБ ШПМ представлена на рис.1, на котором приняты следующие обозначения:

О-О – ось вращения баллона по пресс-форме; r_1, мм – наименьший радиус вращения срединной поверхности кордного каркаса; r_2, мм – наибольший радиус вращения срединной поверхности кордного каркаса; r_0, мм – средний радиус вращения полости камеры и кордного каркаса; $\delta_к$, мм – толщина стенки камеры; $\delta_{кр}$, мм – толщина кордного каркаса; $p_{пр}$, Н/м^2 – давление прессования резины на поверхности между боковиной баллона и

стенкой пресс-формы при вулканизации; $p_г$, Н/м^2 – давление гидравлики (перегретой воды) в камере баллона; $ч_{m1}$, Н/м – единичное меридиональное усилие в каркасе на поверхности радиуса r_1; $ч_{m2}$, Н/м – единичное меридиональное усилие в каркасе на поверхности радиуса r_2; ρ_m, м – радиус меридиональной кривизны внутренней поверхности камеры.

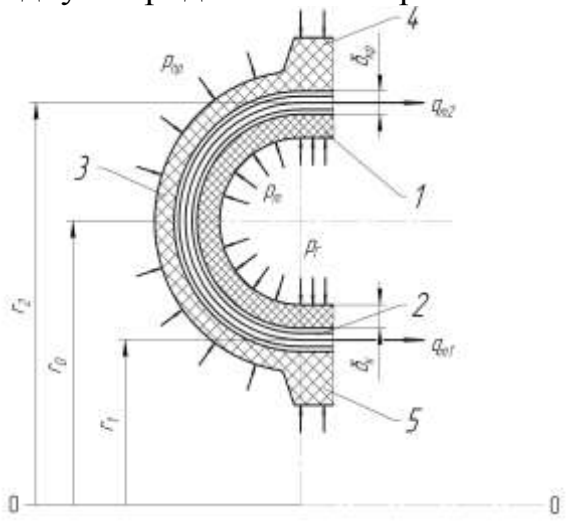


Рис. 1 Расчетная схема прессования боковин резино-кордного баллона шинно-пневматической муфты: 1 – резиновая камера; 2 – кордный каркас; 3 – боковина резинового протектора; 4 – наружный протектор; 5 – внутренний протектор

При расчете могут быть приняты следующие допущения:

- каркас представляет собой оболочку бесконечно малой толщины, расположенной на срединной поверхности реального каркаса;
- стенки камеры и протекторы баллона не сопротивляются растяжению вдоль оси О-О;
- давление $p_{пр}$ передается на каркас при вулканизации баллона как гидростатическое;
- напряжения в резине пренебрежимо малы.

Уравнения равновесия сил, приложенных к каркасу, в проекции на ось О-О можно представить в следующем виде:

$$2\left(r_2 \cdot q_{m_2} + r_1 \cdot q_{m_1}\right) = \left\{(r_2 - r_1) \cdot \rho_r - \left[r_2 - r_1 + 2\left(\delta_к + \delta_{кр}\right)\right] - \right.$$
$$\left. -\rho_{пр}(r_2 - r_1)\right\}. \qquad (1)$$

Соотношения между $ч_{m2}$ и $ч_{m1}$ могут быть определены на основании выражений, применяемых в расчетах автомобильных пневматических шин [2]. Полагая, что при $r = r_2$ и $r = r_1$ нормаль к оболочке перпендикулярна к оси вращения О-О из выражений, характеризующих условие равновесия элементарного участка каркаса под действием внутреннего давления p, а также меридионального $ч_m$ и окружного $ч_\tau$ усилий, представленных как:

$$q_{\tau = q_m \cdot tg^2\beta}$$

и

$$\frac{q_m}{\rho_m} + \frac{q_\tau}{\rho_\tau} = p$$

(подробно смотри выражения (15) и (16) [4, с. 130].

Получим:

$$q_{m_2}=\frac{\rho'\left(r_2^2-r_0^2\right)}{2r_2} \quad (2)$$

и

$$q_{m_1}=\frac{\rho'\left(r_0^2-r_1^2\right)}{2r_1} \quad , \quad (3)$$

где p, Н/м^2 – давление, растягивающее нити кордного каркаса.

Из выражений (2) и (3) следует:

$$q_{m_1}=\frac{r_2}{r_1}\cdot q_{m_2}\cdot\frac{r_0^2-r_1^2}{r_2^2-r_0^2} \quad (4)$$

Подставляя выражение (27) [4, с. 131]

$$N_1-N_2=\frac{\rho\left(r_2^2-r_0^2\right)}{Z_{\text{сл}}\cdot i_2\cdot r_2\cdot\cos^2\beta},$$

где N_1, Н/нить – наибольшее усилие в нити; N_2, Н/нить – наименьшее усилие в нити; $Z_{\text{сл}}$ – число слоев корда в каркасе; i_2, Н/нить – частота нитей в слое корда по нормали; β, град – угол между нитью и радиальной плоскостью сечения,

в формулу (4), получим

$$q_{m_1}=\frac{r_2}{r_1}\cdot q_{m_2}\cdot\frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1} \quad . \quad (5)$$

Из выражений (1) и (5), соответственно, можно найти:

$$q_{m_2}=\frac{\left\{(r_2-r_1)\cdot p_{\text{г}}-\left[r_2-r_1+2\left(\delta_{\text{к}}+\delta_{\text{кр}}\right)\right]\cdot p_{\text{пр}}\right\}(r_1+r_2)\cdot\cos\beta_1}{2r_2(\cos\beta_1+\cos\beta_2)} \quad (6)$$

и

$$q_{m_1}=\frac{\left\{(r_2-r_1)\cdot p_{\text{г}}-\left[r_2-r_1+2\left(\delta_{\text{к}}+\delta_{\text{кр}}\right)\right]\cdot p_{\text{пр}}\right\}(r_1+r_2)\cdot\cos\beta_2}{2r_1(\cos\beta_1+\cos\beta_2)}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) можно найти усилия Nr_1 и Nr_2, действующие в нитях кордного каркаса при вулканизации с использованием формул для автомобильных шин [2].

$$N=\frac{q_m}{Z_{\text{сл}}i\cos^2\beta} \text{ и } i_2=i_1\frac{r_1}{r_2}\cdot\frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_2}.$$

Наибольшая Nr_2 и наименьшая Nr_1 нагрузки, растягивающие нити каркаса будут, соответственно, в сечениях с радиусами вращения r_1 и r_2, т.е. $N=Nr_2$ при $r=r_2$ и $N=Nr_1$ при $r=r_1$.

Соответственно, из формул (6) и (7) следует:

$$\text{Nr}_2=\frac{\left\{(r_2-r_1)\cdot p_{\text{г}}-\left[r_2-r_1+2\left(\delta_{\text{К}}+\delta_{\text{Кр}}\right)\right]\cdot\rho_{\text{пр}}\right\}(r_1+r_2)}{2z_{\text{сл}}i_1r_1(\cos\beta_1+\cos\beta_2)\cos\beta_2} \quad (8)$$

и

$$\text{Nr 1}=\frac{\left\{(r_2-r_1)\cdot\rho_r-\left[r_2-r_1+2\left(\delta_{\text{К}}+\delta_{\text{Кр}}\right)\right]\cdot\rho_{\text{пр}}\right\}(r_1+r_2)\cos\beta_2}{2z_{\text{сл}}i_1r_1(\cos\beta_1+\cos\beta_2)\cos^2\beta_1} \quad (9)$$

Относительная средняя допускаемая вытяжка кордного каркаса при вулканизации баллона может быть определена по следующему выражению:

$$\varepsilon_{\text{доп}}\leq\frac{50}{\text{E}_{\text{К}}\cdot F_K}\left(N_{r_1}+N_{r_2}\right), \quad (10)$$

где $\varepsilon_{доп}$, % - средняя относительная допускаемая вытяжка каркаса; $E_К$, Н/м^2 – модуль упругости кордной нити; $F_К$, см^2 – площадь поперечного сечения нити; 50 – переводной коэффициент.

Величины $E_К$ и $F_К$, как правило, определяются совместно в виде произведения $E_К \cdot F_К$, по данным физико-механических испытаний нити.

Расчетное значение $E_К \cdot F_К$ находится по выражению:

$$E_К \cdot F_K \cong \frac{\sum_{i=1}^{i=K} N_i^2}{\sum_{i=1}^{i=K} N_i \varepsilon_i},$$

где 1, 2, …К – текущий номер испытания; N, Н/нить, ε_i, % - соответственно усилие в нити и относительное удлинение при i^{ом} испытании.

Из выражений (8) и (9) следует:

$$\varepsilon_{доп} \leq \frac{2500\{(r_2-r_1)\cdot p_г-[r_2-r_1+2(\delta_К+\delta_{Кр})]\cdot\rho_{пр}\}(r_1+r_2)(\cos^2\beta_1+\cos^2\beta_2)}{z_{сл} i_1 r_1 E_К \cdot F_K(\cos\beta_1+\cos\beta_2)\cos^2\beta_1\cos\beta_2} \quad (11)$$

Величина $p_{пр}$ в значительной степени зависит от пластичности протекторной резины РКБ (чем пластичнее резина, тем меньше $p_{пр}$).

Приближенно по опыту производства [1, 2 и 3] можно принять, что $p_{пр}$=0,4МПа.

Значения $\cos\beta_1$ и $\cos\beta_2$ могут быть рассчитаны по выражениям:

$$\cos\beta_1 = \sqrt{1-\frac{4\pi^2 r_1^2}{L_{сб}^2}}\sin\alpha_{закр} \quad (12)$$

и

$$\cos\beta_2 = \sqrt{1-\frac{4\pi^2 r_2^2}{L_{сб}^2}}\sin^2\alpha_{закр}, \quad (13)$$

где $\alpha_{закр}$, град – угол закроя корда.

Обычно корд для диагональной конструкции каркаса РКБ закраивают под углом $\alpha_{закр}$ = 30-38°, для каркаса радиальной конструкции – под углом $\alpha_{закр}$ = 0°[5]. От точности угла закроя корда зависит расположение нитей основы корда в каркасе готового изделия.

$L_{сб}$, м – длина продольного периметра каркаса по срединной поверхности со стороны фрикционных колодок при сборке баллона.

Величина i_1 может быть определена по выражению:

$$i_1 = i_{\alpha_{закр}} \frac{L_{сб}}{2\pi r_1} \cdot \frac{\cos\alpha_{закр}}{\cos\beta_1}, \quad (14)$$

где $i_{\alpha_{закр}}$, нить/м – частота нитей в слое обрезиненного корда при раскрое на диагонально-резательной машине для сборки каркаса РКБ [1].

Конструкция камеры по принятой технологии изготовления РКБ характеризуется ее основными параметрами: наружным и внутренним диаметрами и периметром по форме, толщиной стенок, а также изменением ее размеров при подаче сжатого воздуха в баллон – величиной некоторой вытяжки камеры.

Камера РКБ должна обладать достаточной герметичностью и прочностью. Склеенная с кордным каркасом по всему периметру, камера деформируется на величину, допускаемую конструкцией каркаса. Вытяжка

камеры по периметру профиля каркаса баллона при вулканизации зависит от прочности резин, остаточных удлинений, сопротивления раздиру и др.

От толщины $\delta_к$ стенки камеры зависит ее прочность. С увеличением толщины стенки камеры уменьшается ее газопроницаемость, повышаются демпфирующие свойства, но одновременно увеличивается теплообразование в массиве баллона.

После определения допускаемой вытяжки каркаса РКБ необходимо рассчитать периметр $П_к$ поперечного сечения вулканизованной камеры после ее усадки по выражению:

$$П_К = \left(\frac{П_В}{1+0{,}01\varepsilon_{доп}} - \pi\delta_{КР}\sqrt{\frac{L_{сбк}}{L_К}}\right), \quad (15)$$

где $П_В$, м – периметр поперечного сечения срединной поверхности каркаса, измеренный по чертежу распределения материалов в вулканизованном РКБ; $L_{сбк}$, м. – длина продольного периметра камеры на сборочном станке; $L_К$, м. – длина продольного периметра вулканизованной камеры после ее усадки.

Периметры $L_{сбк}$ и $L_К$ необходимо измерять по срединной поверхности плоскосложенной камеры. Длина заготовки сырой камеры после стыковки должна быть такой, чтобы перед закладкой камеры в пресс-вулканизатор и последующем формовании длина внутренней окружности камеры уменьшилась на 1…3%. При большем уменьшении могут образовываться технологические складки, при меньшем – сырую камеру сложно размещать в вулканизационной форме. Толщина стенок заготовки рассчитывается в зависимости от ее вытяжки по наружной и внутренней стенкам. Одновременно должны быть сохранены общий объем резины и заданная толщина стенок вулканизованной камеры.

2.Расчет профиля протектора баллона шинно-пневматической муфты

В конструкции резино-кордного баллона, представляющего в поперечном сечении форму замкнутого овального кольца, и являющимся основным несущим элементом при передаче вращающего момента шинно-пневматической муфты (ШПМ), немаловажную роль играют внутренний и наружный резиновые протекторы. Помимо защиты кордного каркаса РКБ от вредного воздействия окружающей среды и механических повреждений протекторы выполняют, наряду с передачей вращающего момента, роль демпфирующего и звукоизолирующего элемента муфты.

Внутренний протектор, образующий рабочее основание баллона, имеет отверстия для установки шпилек (валиков), которыми к баллону крепятся металлические колодки, облицованные фрикционными накладками и прижимающиеся к барабану трения при включении муфты.

Наружным протектором РКБ крепится к наружному ободу муфты болтами, которые ввинчивают в металлические планки, привулканизованн-

ные к наружной поверхности баллона на равных расстояниях друг от друга. В массиве наружного протектора завулканизован также один и несколько (в зависимости от размера РКБ) металлический ниппель для подачи во внутреннюю полость баллона сжатого воздуха и который для лучшей герметизации привулканизован к камере [1].

Поэтому при проектировании РКБ ШПМ наряду с расчетом допускаемой вытяжки кордного каркаса при вулканизации баллона и определении периметра вулканизованной камеры, на который собирают основные детали изделия, для обеспечения основных функций РКБ [1] крайне важно производить расчет и построение профиля внутреннего и наружного протекторов баллона.

Для построения профиля невулканизованного («сырого») протектора (внутреннего и наружного) РКБ следует рекомендовать применить объемный метод, при котором расчет формы профиля протекторов и боковин основан на постоянстве объема резиновых смесей при шприцевании заготовки, сборки (конфекции) и последующей вулканизации баллона в пресс-форме.

Такой расчет позволяет построить соответствующий профиль протекторов и боковин РКБ, в котором до минимума снижается перетекание резины (эластомера) в пресс-форме и распределение материалов в вулканизованном баллоне близко к теоретическому.

Расчетная схема построения профиля протекторов (внутреннего и наружного) представлена на рис. 2 и которая является в сечении частью распределения материалов в РКБ невулканизованного «сырого» (I) и вулканизованного (II) состояния.

Очертания «сырого» баллона строятся таким образом, чтобы они, по возможности, легче принимали форму вулканизованного изделия при поддувке сжатым воздухом. В противном случае может получиться недопрессовка в местах, имеющих большую кривизну.

Ширина основания В протектора РКБ не может назначаться произвольно и не должна быть больше ширины воздушной полости резиновой камеры равной параметру А. Толщина наружного протектора зависит от длины резьбовых бобышек планок крепления баллона к ободу муфты. Толщина внутреннего протектора должна обеспечивать образование рабочего основания баллона с отверстиями для установки шпилек крепления фрикционных колодок.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- для вулканизованного баллона:

О-О – ось вращения РКБ по прессформе; $r_{нар}$, м – радиус вращения по наружному протектору; r_0, м –радиус вращения по срединной линии боковин; $r_{вн}$, м – радиус вращения по внутреннему протектору; $B_{нар}$, м – ширина наружного протектора; $B_{вн}$, м – ширина внутреннего протектора; Δb, мм – ширина кольцевых элементов по периметру каркаса РКБ;

- для невулканизованного «сырого» баллона – соответственно: $r'_{\text{нар}}$, м; r'_0, м; $r'_{\text{вн}}$, м – обозначения со штрихом.

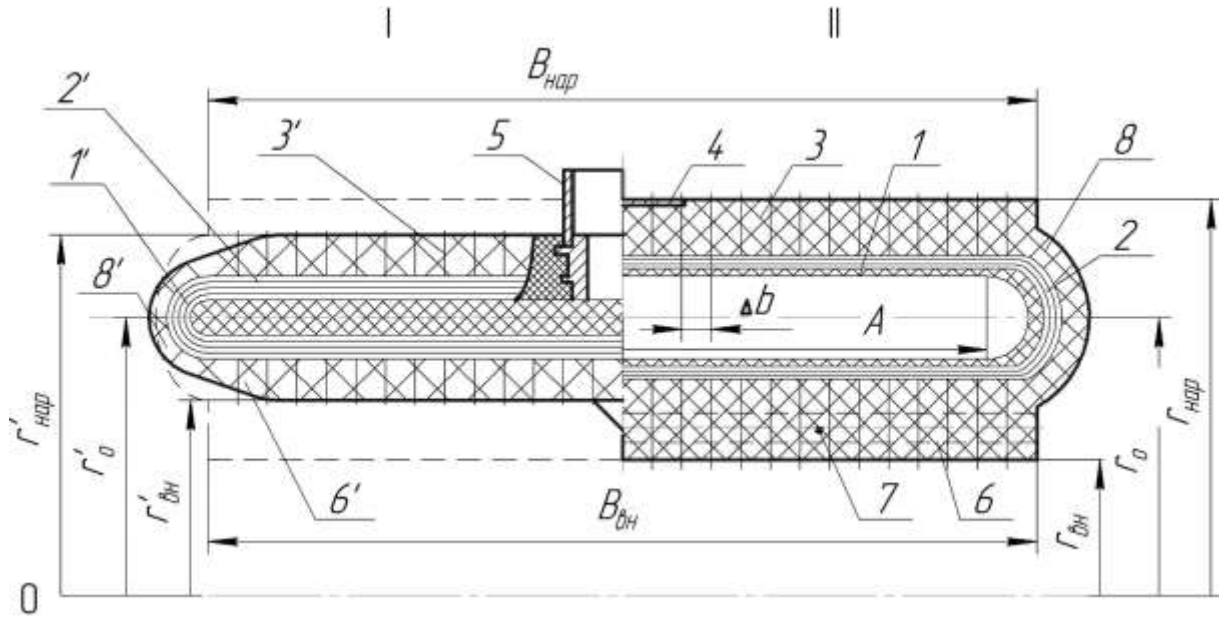


Рис. 2. Расчетная схема построения профиля протекторов РКБ ШПМ:
I-невулканизованный «сырой» баллон;
II-вулканизованный баллон
1 – внутренняя резиновая камера; 2 – кордный каркас; 3 – наружный протектор; 4 – планки; 5 – ниппель; 6 – внутренний протектор; 7 – отверстия под шпильки; 8 – боковина – в вулканизованном баллоне; 1',2',3',6',8' – то же в невулканизованном баллоне

Сущность объемного метода может быть представлена в следующей последовательности:

- вначале профиль вулканизованных наружного и внутреннего протекторов и боковины должны быть разбиты на большое количество возможно малых кольцевых элементов (см. рис. 2), заключенных между нормальными к кордному каркасу поверхностями; ширина кольцевых элементов по периметру протекторов также принята равной Δb;

- затем подсчитывается объем V_i резины каждого из кольцевых элементов с учетом в выделенном элементе наружного протектора наличия металлоарматуры (планок для крепления баллона к наружному ободу муфты и ниппеля для подачи во внутреннюю полость баллона сжатого воздуха) и внутреннего протектора наличия отверстий для установки шпилек крепления фрикционных колодок; объем резины, занимаемый ими должен быть вычтен из общего объема кольцевого элемента;

- далее рассчитывается высота h_i сплошного протектора длиной $L_{пр}$ по выражению:

$$h_i = \frac{V_i}{L_{пр} \cdot \Delta b} \cdot К_{ир} \quad , \qquad (16)$$

где $К_{ир} \approx 1{,}1 \div 1{,}15$ – коэффициент, учитывающий избыток резины, необходимый для качественного формования протектора и исключения недопрессовки изделия;

- наконец, строится теоретический профиль невулканизованного «сырого» протектора; для этого от оси симметрии профиля откладывается столько же участков шириной $\Delta b'$, насколько кольцевых сечений шириной Δb разбит профиль вулканизованного протектора РКБ; при этом, в каждом сечении соответственно откладывается высота h_i.

Построенный таким образом теоретический профиль невулканизованного «сырого» протектора РКБ представлен на рис. 3.

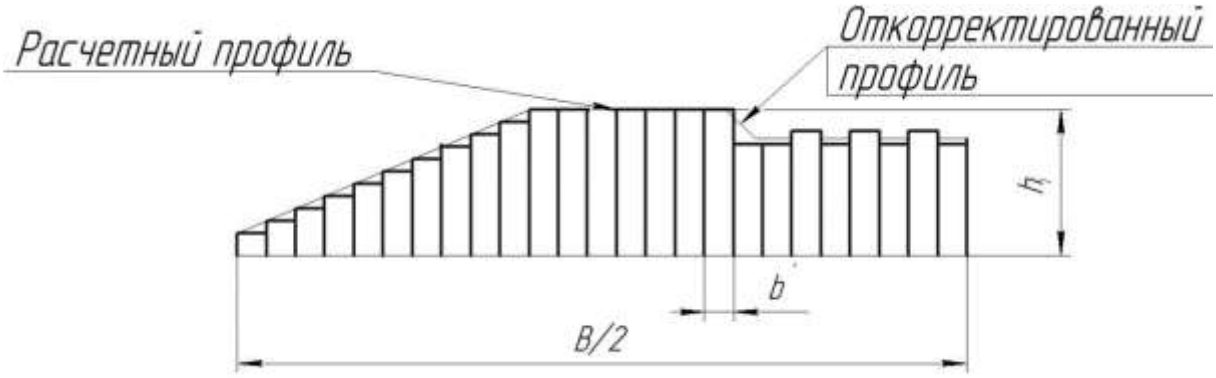


Рис. 3. Теоретический профиль невулканизованного «сырого» протектора РКБ

При этом необходимо учитывать, что заготовка «сырого» протектора должна быть технологична и проста в изготовлении. Поэтому расчетный профиль протектора должен корректироваться (откорректированный профиль), то есть проводится контур профиля по усредненным значениям высоты h_i при обязательном условии, что объем резины V_i остается в протекторе практически неизменным.

При расчете высоты откорректированного профиля предложенным объемным методом необходимо также учитывать следующее, а именно:

- в случае, если в вулканизированном протекторе несколько смежных полосок имеют один и тот же объем резины следует вместо нескольких одинаковых полосок рассматривать одну уширенную полоску. Поэтому, как пример, весь массив резины наружного протектора от кромки до начала металлических планок может быть принят как одна полоска; всю центральную часть внутреннего протектора РКБ можно также рассматривать как одну полоску;

- объем резины в сплошной цилиндрической полоске протектора можно рассчитывать по выражению:

$$V_{i\text{цп}} = 2\pi\left(r_{i\text{нар}}^2 - r_{i\text{вн}}^2\right) \cdot \Delta b \ ; \qquad (17)$$

- объем резины сплошной полоски, расположенной на боковине протектора РКБ может быть определен в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 4, на котором приняты следующие обозначения:
О-О – ось вращения баллона по прессформе; ABCD – криволинейный четырехугольник; ABD и BCD – криволинейные треугольники; $r_{\text{цт}_1}$, м – центр тяжести площади треугольника ABD; $r_{\text{цт}_2}$, м – центр тяжести площади треугольника BCD.

Тогда соответственно принятым обозначениям, объем резины $V_{i\text{Б}}$ в сплошной полоске боковин протектора РКБ может быть рассчитан по выражению:

$$V_{i\text{Б}} = 2\pi\left(r_{\text{цт}_1} \cdot Q_1 + r_{\text{цт}_2} \cdot Q_2\right) \ , \qquad (18)$$

где Q_1, мм^2 – площадь треугольника ABD; Q_2, мм^2 – площадь треугольника BCD;

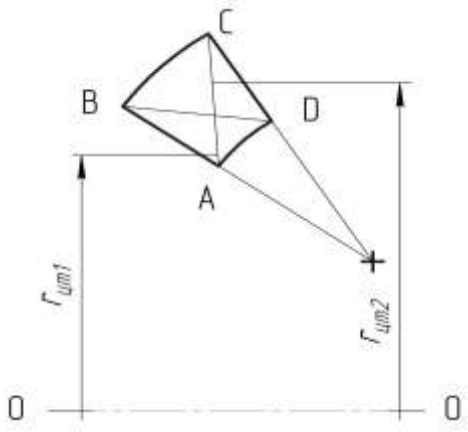


Рис. 4. Расчетная схема объема резины сплошной полоски боковины РКБ

Треугольники ABD и BCD можно условно принять прямолинейными. Поэтому для вычисления их площадей Q_1 и Q_2, а также координат центров тяжести могут быть применены формулы элементарной математики для расчета площадей геометрических фигур;

- объем резины в центральной части внутреннего протектора РКБ необходимо уменьшить на величину объема резины, занимаемого отверстиями для шпилек и поперечных полуцилиндрических впадин.

На рис. 5 представлена расчетная схема объема резины, занимаемой отверстиями для шпилек крепления фрикционных колодок и поперечных впадин, обеспечивающих уменьшение жесткости внутреннего протектора, а также являющимися вентиляционными каналами для охлаждения РКБ в зоне трения муфты.

На рис. 5 приняты следующие обозначения:

$r_{вп}$, мм – радиус кривизны поперечного сечения впадины; $r_{шп}$, мм – радиус кривизны поперечного сечения отверстия под шпильки крепления фрикционных колодок; R_{min}, м – наименьший радиус вращения внутреннего протектора по пресс-форме.

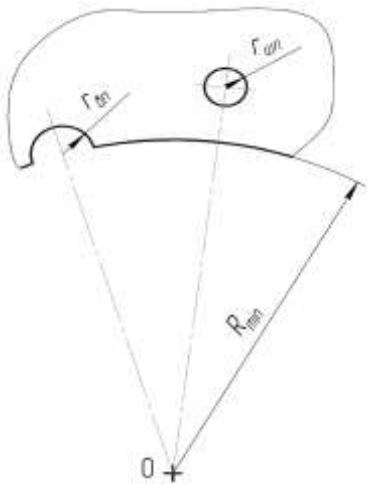


Рис. 5. Расчетная схема объема резины, занимаемой отверстиями для шпилек и поперечных впадин внутреннего протектора РКБ

Из рис. 5 следует, что объем резины $V_{вп,шп}$, занимаемой поперечными впадинами и отверстиями под шпильки может быть определен как величина, на которую должен быть уменьшен объем резины внутреннего протектора РКБ и может быть рассчитан по выражению:

$$V_{вп,шб} = -B_{вн}\left\{m_{вп}\left[r_{вп}^2 arc\sin\frac{\sqrt{4R_{min}^2}-r_{вп}^2}{4R_{min}} - R_{min}^2 \cdot arc\sin\frac{r_{вп}\sqrt{4R_{min}^2}-r_{вп}^2}{4R_{min}^2} + 0.5r_{вп}\left(1-\frac{r_{вп}^2}{R_{min}^2}\right)\sqrt{4R_{min}^2 - r_{вп}^2} + m_{шп}\cdot\pi\cdot r_{шп}^2\right]\right\}, \quad (19)$$

где: $B_{вн}$, мм – ширина основания внутреннего протектора; $m_{вп}$ – количество поперечных впадин; $m_{шп}$ – количество шпилек крепления фрикционных колодок;

- поскольку в массиве наружного протектора РКБ завулканизованы планки с отверстиями и резьбовые втулки с болтами, ввернутые в них, а также ниппель для подачи сжатого воздуха во внутреннюю полость баллона, то для учета поправок к общему объему резины кольцевых элементов наружного протектора можно применять выражение для подсчета площади полоски шириной Δв, вырезанной из круга с радиусом $r_{кр}$.

На рис. 6 представлена расчетная схема объема резины, занимаемой в отверстиях планок, резьбовых втулок с болтами и ниппеля наружного проектора РКБ.

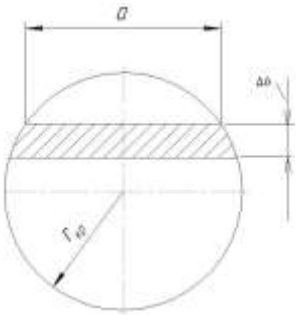


Рис. 6. Расчетная схема объема резины, занимаемой в отверстиях планок, резьбовых втулок с болтами и ниппеля наружного протектора РКБ

На рис. 6 приняты следующие обозначения: a, мм – наименьшая продольная сторона полоски; Δb, мм – ширина полоски; $r_{\text{кр}}$, мм – радиус круга.

Площадь полоски $F_{\text{полкр}}$, вырезанной из круга, может быть рассчитана по выражению:

$$F_{\text{полкр}} = r_{\text{кр}}^2 \left\{ arc\,cos \frac{1}{r_{\text{кр}}} \left[0{,}5\sqrt{4r_{\text{кр}}^2 - a^2} - \Delta\text{в} \right] - arc\sin \frac{a}{2r_{\text{кр}}} \right\} -$$

$$- \left(0{,}5\sqrt{4r_{\text{кр}}^2 - a^2} - \Delta\text{в} \right) \times \left(\sqrt{0{,}25a^2 + \Delta\text{в}\sqrt{4r_{\text{кр}}^2 - a^2} - \Delta\text{в}} \right) +$$

$$+ 0{,}25a\sqrt{4r_{\text{кр}}^2 - a^2}. \qquad (20)$$

Тогда объем полоски $V_{\text{полкр}}$ может быть вычислен по выражению:

$$V_{\text{полкр}} = F_{\text{полкр}} \cdot \delta_{\text{полкр}}, \qquad (21)$$

где $\delta_{\text{полкр}}$, мм – толщина полоски.

Следовательно по выражениям (20) и (21) могут быть рассчитаны объемы отверстий в планках и резьбовых втулок с болтами, ввернутыми в планки, а также ниппеля.

При этом величина $V_{\text{полкр}}$ принимается положительной для отверстия в планке и отрицательной для резьбовых втулок с болтами и ниппеля. В зависимости от значения а и Δв по выражению (20) может быть получена площадь части или полного круга.

Следует также обратить внимание на то, что для РКБ ШПМ расчет профиля наружного протектора может быть осложнен вследствие того, что фактически не учитывается картина течения резины относительно планок.

Таким образом, на форму вулканизованного наружного протектора баллона значительное влияние будут оказывать такие факторы, как размеры и формы планок (в зависимости от типоразмера РКБ), относительная площадь отверстий на планке, пластичность «сырой» протекторной резины, внутреннего давления теплоносителя в резиновой камере баллона при вулканизации в прессформе.

Заключение

В заключении следует отметить, что принятый ряд допущений, предложенные выражения и способ расчета профиля внутреннего и

наружного протекторов РКБ ШПМ с применением объемного метода позволяют при проектировании РКБ ШПМ рассчитывать допускаемую вытяжку кордного каркаса при вулканизации баллона, определять периметр вулканизованной камеры, обеспечивать надежную и рациональную технологию их изготовления, а также гарантировать требуемую работоспособность баллона и муфты в целом.

Предложенные расчетные выражения в дополнение к ранее представленным [4-12], могут быть использованы при модернизации существующих и разработке новой методики расчета и проектирования ШПМ с повышенными эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кукаленко, Б.Д. Силовые элементы упругих муфт. Конструирование, производство, эксплуатация [Текст] / Б.Д. Кукаленко. – Л.: Химия, 1977. – 143с.
2. Бидерман, В.Л. Автмообильные шины. Конструкция, расчет, испытание, эксплуатация. [Текст] / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер, С.П. Захаров [и др.] – М.: ГХИ, 1963. – 383с.
3. Салтыков, А.В. Основы современной технологии автомобильных шин. [Текст] /А.В.Салтыков. – М.: Химия, 1974. – 472 с.
4. Кукаленко, Б.Д. Исследование и расчет основных статических нагрузок баллонов шинно-пневматических муфт [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости СПб ГПУ (Наука и образование). – 2012, № 3. – (2) (154), С. 125-132.
5. Кукаленко, Б.Д. Расчет статических нагрузок баллонов с радиальным каркасом шинно-пневматических муфт [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, СПб. Выпуск № 4 (26), 2014. – С. 85-94.
6. Кукаленко, Б.Д. Нагрев поверхности трения шинно-пневматических муфт агрегатов нефтебуровых и газобуровых установок [Текст] / Б.Д. Кукаленко. С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости СПб ГПУ (Наука и образование). – 2011. - № 3 (130). - С. 241-247.
7. Кукаленко, Б.Д. Упруго-демпфирующие характеристики шинно-пневматических муфт [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Научно-технические ведомости СПб ГПУ (Наука и образование). – 2011.- № 4 (135). - С. 138-141.
8. Кукаленко, Б.Д. Исследование характеристик шинно-пневматических муфт [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы Международной научно-практической конференции. 14-15 июня 2011 года. Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2011. – С.292-295.
9. Чулкин, С.Г. Исследование возможности повышения момента вращения бесколодочных баллонов шинно-пневматических муфт

[Текст] / С.Г. Чулкин, Б.Д. Кукаленко // Речной транспорт XXI век – 2013, №5 (64). – С. 56-61.
10. Кукаленко, Б.Д. Исследование и расчет температурного поля в баллонах шинно-пневматических муфт судовых установок [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин / Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте: Труды V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «ТРАНСТРИБО-2013», 10-11 октября 2013 г. /Под общ.ред. С.Г. Чулкина и В.М. Петрова. - СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О.Макарова, 2013.- С.123-141.
11. Чулкин, С.Г. Расчет максимально-допустимого зазора в шинно-пневматических муфтах [Текст] / С. Г. Чулкин, Б. Д. Кукаленко // Журнал университета водных коммуникаций. – 2013.- №3 (19) – с. 63-75.
12. Кукаленко, Б.Д. Графоаналитический метод определения максимально допустимого зазора в шинно-пневматической муфте [Текст] / Б.Д. Кукаленко, С.Г. Чулкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2014. – Вып. 1(23). – С.74-77.

B.D.Kukalenko[1], S.G.Chulkin[2]

THE CALCULATION OF THE MAIN STRUCTURAL MEMBERS OF THE BALLOON TIRE-PNEUMATIC CLUTCH

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2] St.Petersburg State Marine Technical University, Russia.

Abstract

The work is devoted to the calculation of the main structural members of the balloon tire-pneumatic clutch used in marine and oil and gas engineering.

The expressions are received, allowing for the design of rubber-cord balloon bus-pneumatic muffs to calculate their allowable extraction cord of the carcass during vulcanization and define the perimeter of the camera, which gather the main elements of the product.

We consider the calculation and plotting of profiles of the outer and inner tread rubber-cord balloon tire-pneumatic clutch using the volume method, based on the constancy of the volume of rubber mixtures during molding of workpieces, assembling and vulcanizing of the container in the mold.

It is shown that the proposed according to provide reliable and rational production technology, eliminating the defect (the imperfection of the sidewalls, the separation of the elements), guarantee the required operability of the cylinder and the coupling as a whole, and can be used when upgrading and the development of a new methodology for calculating bus-pneumatic muffs.

Key words: rubber-cord balloon, tire-pneumatic clutch, strength, durability.

REFERENCES

[1] Kukalenko B.D. Strength elements flexible couplings. Design, production, operation. – L.: Chemistry, 1977. – 143 p. (rus).

[2] Biderman, V.L., Gosliner R.L., Zakharov, S.P. [and others]. Avtomobilnye tires. Design, calculation, testing, maintenance. – M.: GHEE, 1963. – 383 p. (rus.)

[3] Saltykov V. A. foundations of modern technologies of automobile tires.– M.: Chemistry, 1974. – 472 p. (rus.).

[4] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. Analysis and calculation of the main steady-state loads balloon bus-pneumatic muffs // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg GPU (Science and education). – 2012, № 3. – (2) (154), P. 125-132. (rus.).

[5] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. The Calculation of static loads of cylinders with a radial carcass tire is a pneumatic couplings // Bulletin of state University of sea and river fleet named after Admiral S. O. Makarov, St. Petersburg. Issue No. 4 (26), 2014. – P. 85-94. (rus.).

[6] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. Heating of the surface friction bus-pneumatic muffs units oil and gozaburo installations // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg GPU (Science and education). – 2011. - № 3 (130). - P. 241-247. (rus.).

[7] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. Elastic-damping characteristics of bus-pneumatic muffs // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg GPU (Science and education). – 2011. - № 4 (135). - P. 138-141. (rus.).

[8] Kukalenko, B.D., Chulkin S. G. Investigation of the characteristics of bus-pneumatic muffs // Modern mechanical engineering. Science and education. Materials of the International scientifically-practical conference. 14-15 June 2011. Saint-Petersburg. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic. Univ. – 2011. – P. 292-295. (rus.).

[9] Chulkin S.G., Kukalenko B.D. Study of the possibility of increasing the torque beskydech balloon bus-pneumatic muffs // River transport XXI century. – 2013, №5 (64). – P. 56-61. (rus.).

[10] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. Analysis and calculation of temperature field in the balloon bus-pneumatic muffs ship installations / Improved wear resistance and durability of machines and mechanisms for water transport: Proceedings of V International Symposium on transport tribo-engineering "TRANSCRIBO-2013", October 10-11, 2013. - SPb.: SUSRF named after Admiral S. O. Makarov, 2013.- P.123-141. (rus.).

[11] Chulkin S.G., Kukalenko B.D. Calculation of maximum permissible gap in tire is a pneumatic couplings // Journal of University of water communications. – 2013.- №3 (19). – P. 63-75. (rus.).

[12] Kukalenko B.D., Chulkin S.G. Graphic-analytical method of determining the maximum allowable gap in tire-pneumatic clutch // Bulletin of state University of sea and river fleet named after Admiral S. O. Makarov, 2014. – Vol. 1(23). – P. 74-77. (rus.).

УДК 621.43; DOI 10.1872/MMF-2016-55

Шабанов А.Ю.[1], Галышев Ю.В.[2], Сидоров А.А.[3], Ивановский Д.К.[4]

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗНОШЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

[1]Шабанов Александр Юрьевич, к.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: aush2003@mail.ru

[2]Галышев Юрий Виталиевич, д.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: galyshev57@yandex.ru

[3]Сидоров Анатолий Алексеевич, к.т.н., доцент
Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: turbo_motor@mail.ru

[4]Ивановский Дмитрий Константинович, аспирант
Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: ivanko89@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена анализу возможностей компенсации износа узлов трения поршневых ДВС путем использования специальных триботехнических составов. Разработана методика стендовых испытаний процесса безразборного ремонта бензинового ДВС, приведены результаты испытаний триботехнических составов различного типа как средства восстановления рабочих поверхностей двигателя с заданной степенью износа.

Ключевые слова: поршневой двигатель, износ, ремонт, триботехнический состав

Возможность безразборного ремонта двигателя с помощью использования триботехнических составов является одной из противоречивых и неоднозначных тем в современной теории и практике

эксплуатации ДВС. Возможно ли поднять мощностные и экономические показатели изношенного двигателя вводом в моторное масло триботехнического состава и насколько? Обычно ответ на этот вопрос находится в области эксплуатационных испытаний реальных технических объектов, путем набора определенного объема статистических данных. Однако, при использовании статистических данных имеется значительный риск потери полной объективности, поскольку именно в области восстановления изношенных технических систем есть большое количество случайных факторов, принципиально влияющих на итоговый результат. В то же время, авторам не известно каких-либо попыток провести научное исследование этой проблемы, исключающее влияние недетерминированных факторов, существенно влияющих на процессы восстановления технико-экономических параметров двигателя.

На кафедре «Инжиниринг силовых установок и транспортных систем» ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого» были проведены сравнительные стендовые моторные испытания, целью которых было исследование возможностей, динамики работы и особенностей применения триботехнических составов различного типа при их применении в процессе безразборного ремонта поршневого ДВС, имеющего идентичные повреждения.

Были подготовлены пять бензиновых двигателей семейства ВАЗ, одного рабочего объема, в полностью сопоставимом исходном состоянии, для чего для каждого из них был проведен ремонт с восстановлением поверхностей трения, заменой на новые основных деталей узлов трения (поршней, поршневых колец, вкладышей подшипников). При сборке двигателей максимальным образом сохранялись идентичные величины монтажных зазоров. После сборки все двигатели прошли типовой цикл начальной обкатки по специальной программе. Замеры итоговых показателей двигателя по окончании циклов обкатки по всей выборке выявили расхождение по мощностным показателям, не превышающее 0,5% , по расходу топлива – не более 1,0%.

Были проведены измерения начальных характеристик двигателей после цикла обкатки по внешней скоростной и двум нагрузочным характеристикам, а также замер мощности механических потерь двигателей методом прокрутки.

Далее двигатели были демонтированы со стендов, разобраны и на рабочие поверхности вкладышей подшипников коленчатого вала и поршневых колец с помощью специального приспособления нанесены эталонные повреждения – продольные кольцевые риски фиксированного размера (0,25, 0,50, 0.75 мм) (рис.1).

После этого двигатели снова были собраны, проведена короткая их обкатка в течение одного моточаса и повторены замеры характеристики двигателей по программе, описанной выше.

Результаты замеров показали заметное влияние повреждения рабочих поверхностей узлов трения на показатели мощности трения, расхода топлива и давления масла в системе смазывания двигателей (рис. 2,3).

Рис. 1. Вкладыши подшипников коленчатого вала с искусственными повреждениями

Ухудшение условий смазывания вызвано уменьшением несущей способности поврежденных подшипников коленчатого вала. На пусковых оборотах (300...400 об/мин) и для исправных, и для поврежденных подшипников преобладает режим граничного трения, разделяющий масляный слой практически отсутствует. Поэтому влияние повреждений подшипников в этой зоне минимально. При увеличении частоты вращения коленчатого вала растет эффект глиссирования в подшипниках, растет их несущая способность. В этих условиях зона граничного трения уменьшается. Повреждения подшипников замедляют переход подшипников из режима граничного в гидродинамическое трение. Здесь становится заметна разница в мощности механических потерь для исправного и поврежденного двигателя. При дальнейшем увеличении частоты вращения коленчатого вала разница в механических потерях двигателя с искусственно поврежденными и исправными подшипниками несколько уменьшается. Очевидно, введенная степень повреждения на этих режимах не приводит к срыву гидродинамического режима трения.

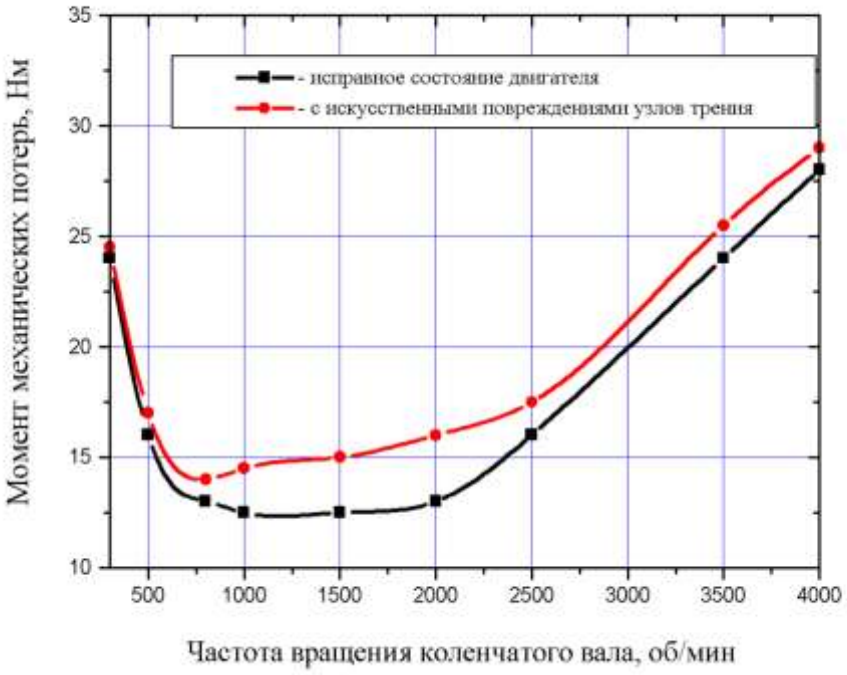


Рис. 2. Момент механических потерь, замеренный методом прокрутки двигателя от стенда, для исправного состояния двигателя, и двигателя, имеющего искусственные повреждения узлов трения

Рост нагрузки на двигатель при фиксированных оборотах коленчатого вала приводит к уменьшению толщин разделяющих слоев и в пределе – снова к возникновению зон граничного трения. Сказывается рост удельных внешних давлений и температуры масла в узлах трения. Повреждения подшипников увеличивают эти зоны граничного трения при высоких нагрузках, поэтому в них также наблюдается рост мощности механических потерь. Это фиксируется ростом удельного расхода топлива двигателя в этих зонах, измеряемого при работе двигателя по нагрузочным характеристикам. При этом эта разница выше в зоне режимов с малой, и, наоборот, при высокой частоте вращения коленчатого вала (близкой к номинальной). Поскольку измерить мощность трения при высоких нагрузках методом прокрутки двигателя от стенда невозможно, для подтверждения этого факта приходится пользоваться косвенными данными, получаемыми измерением мгновенного расхода топлива.

Очевидным последствием искусственного повреждения узлов трения двигателя является заметное снижение давления масла в системе смазывания. Особенно заметно уменьшение давления в зоне режимов холостого хода и малых частот вращения двигателя. Ухудшение маслообеспечения подшипников, обусловленное наличием дефектов трения на поверхностях вкладышей, также способствует росту механических потерь в двигателе.

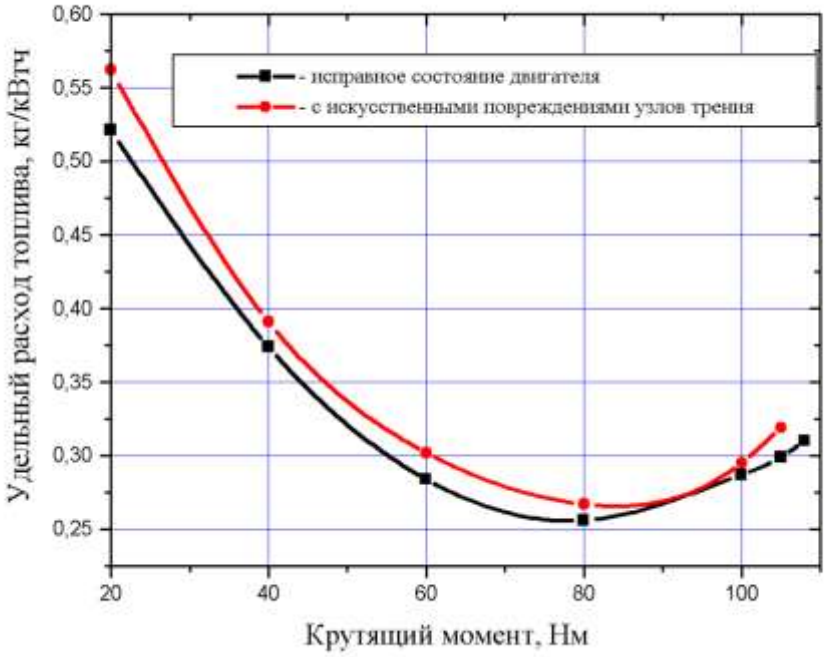


Рис. 3. Результаты замеров удельного расхода топлива по нагрузочной характеристике, n=2000 об/мин, для исправного состояния двигателя, и двигателя, имеющего искусственные повреждения узлов трения

На следующей стадии испытаний двигатели с искусственно поврежденными деталями трения были обработаны триботехническими составами различного механизма действия. Использовались следующие составы:

- триботехнический состав «СУПРОТЕК Актив» группы геомодификаторов трения на базе мелкофракционных минеральных порошков серпентина;
- триботехнический состав «Liqui Moly Ceratec», реализующий металлоплакирование поверхностей трения, сочетаемое с упрочнением микрокерамикой;
- триботехнический состав «Bardahl Full Metal», в котором также реализован комплексный принцип воздействия на поверхности путем их плакирования с добавкой фуллереновых композиций на базе углерода C_{60}.

Обработка двигателей проводилась в строгом соответствии с инструкциями производителей.

После наработки каждого из двигателей заданного длительного времени на идентичных режимах работы, были повторно замерены показатели мощности, расхода топлива, давления и температуры масла на фиксированных режимах работы по двум нагрузочным характеристикам, а

также измерена мощность механических потерь методом прокрутки двигателей от стенда.

Результаты измерений показали существенное улучшение всех показателей работы двигателей после их обработки триботехническими составами. Для оценки средних за цикл испытаний эффектов обработок, были усреднены результаты измерений по двенадцати точкам замеров нагрузочных характеристик. Полученные результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1. Усредненные за цикл испытаний эффекты обработок двигателей с изначально искусственно поврежденными узлами трения

Триботехнический состав	Моторные эффекты, %		Эффекты по токсичности, %	
	Расход топлива	Механический КПД	CO	CH
Bardahle Full Metal	-10,4	7,6	-6,1	-19,4
Liqui Moly Ceratec	-9,4	7,0	-6,2	-17,6
СУПРОТЕК Актив	-8,9	6,5	-11,2	16,4

Как следует из полученных результатов, все примененные триботехнические составы обеспечили существенное восстановление характеристик двигателей, изначально имевших эталонные искусственные повреждения узлов трения.

Для выяснения механизма и степени восстановления деталей все двигатели были разобраны, произведены замеры их размеров, после чего были сняты микропрофили рабочих поверхностей узлов трения, на которые наносились искусственные повреждения. Кроме того, из вкладышей шатунных подшипников изготовлены образцы для машины трения для замеров величин коэффициентов трения в подшипниковых узлах.

Анализ изменения величин зазоров в цилиндро-поршневой группе и подшипниках коленчатого вала не выявил какого-либо значимого их изменения после обработки двигателей всеми триботехническими составами.

Рис. 4. Состояние рабочих поверхностей вкладышей подшипников коленчатого вала с искусственными повреждениями после обработки двигателя триботехническим составом

При этом глубина искусственно созданных дефектов трения как на поршневых кольцах, так и на поверхностях вкладышей подшипников после обработки существенно уменьшилась, вплоть до полной части ликвидации дефектов трения (рис.4).

Наилучший эффект по этому параметру обеспечили триботехнические составы, имеющие в основе металлоплакирующие активные компоненты (табл.2).

Триботехнические испытания образцов деталей, прошедших обработку триботехническими составами, проводились на машине трения ИИ-5018 методом сравнения характеристик модели узла трения «шейка коленчатого вала – вкладыш подшипника». В качестве вала использовались образцы трения – диски, шлифованные как шейки коленчатого вала; в качестве вкладышей подшипников использовались натуральные шатунные вкладыши, прошедшие цикл моторных стендовых испытаний с обработкой двигателей с тремя различными триботехническими составами.

Схема испытаний - «диск по вкладышу» (диск - d=46, h=12, вкладыш наклеен на колодку для крепления - d=49, h=20), смазка осуществляется разбрызгиванием образцом (погружен в масло на 1 – 2 см, объем масла – 150 мл). Продолжительность 250 тысяч циклов (2 часа). Использовалось

масло, слитое с соответствующего двигателя, содержащее испытуемый триботехнический состав.

Таблица 2. Изменение параметров микропрофилей рабочих поверхностей деталей узлов трения до и после обработки триботехническими составами

	Параметры вкладыша шатунного подшипника до испытаний						Параметры вкладыша шатунного подшипника после испытаний					
	Точка 1			Точка 2			Точка 1			Точка 2		
	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм
Bardahle Full Metal	3,18	32,3	115,0	2,75	14,6	43,9	1,89	12,2	45,6	1,81	9,10	29,7
Liqui Moly Ceratec	3,04	26,6	101,0	3,24	22,0	55,8	3,95	22,4	55,5	1,89	11,5	26,1
СУПРОТЕК Актив	2,52	30,8	84,3	2,51	17,4	45,2	2,17	11,1	41,6	3,41	15,4	34,7
	Параметры вкладыша коренного подшипника до испытаний						Параметры вкладыша коренного подшипника после испытаний					
	Точка 1			Точка 2			Точка 1			Точка 2		
	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм
Bardahle Full Metal	3,57	29,5	116	2,36	18,0	73,4	1,23	7,61	20,7	1,36	8,04	16,4
Liqui Moly Ceratec	3,29	25,2	114	1,22	9,00	31,4	1,94	14,9	36,1	1,14	6,61	18,9
СУПРОТЕК Актив	5,24	37,8	124	2,49	19,0	75,4	1,79	13,6	28,0	3,10	18,4	54,2
	Параметры поршневого кольца до испытаний			Параметры поршневого кольца после испытаний		
	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax мкм
Bardahle Full Metal	3,30	18,90	52,12	0,40	4,26	14,56
Liqui Moly Ceratec	2,39	14,70	47,05	3,08	12,54	41,13
СУПРОТЕК Актив	4,85	29,70	53,90	1,80	8,57	31,40

В процессе испытаний регистрировались момент сопротивления трения, температура масла в камере, число циклов.

Износ образца (диска - $\Delta m_о$) и контробразца (вкладыша - $\Delta m_{к/о}$) определялся взвешиванием до и после испытаний на электронных аналитических весах АВ210М-01А с погрешностью до 0,1 мг.

Результаты испытаний сведены в табл.3. Анализ результатов позволяет сделать некоторые выводы, характеризующие особенности и динамику работы испытуемых триботехнических составов.

На начальной стадии испытаний на машине трения для всех образцов фиксируются низкие значения коэффициентов трения, меньшие 0,1. Лучший показатель наблюдается у образца, прошедшего обработку составом «Bardahl Full Metal», сочетающего в своем принципе действия металлоплакирование с антифрикционной обработкой добавкой фуллеренов. Однако, в процессе испытаний, динамика изменения коэффициента трения при работе с этим составом характеризуется сначала снижением до абсолютно минимальных среди всех образцов значения (0,017), но потом начинается его рост. В итоге, к окончанию испытаний величина коэффициента трения возвращается к начальным значениям. Полностью аналогичная картина повторилась и при испытаниях состава «Liqui Moly Ceratec», имеющего близкий механизм действия.

Таблица 3. Результаты триботехнических испытаний образцов пар трения, прошедших триботехническую обработку

	Коэффициент трения			Температура масла, град.С			Потеря массы, мг	
	Через 20 тыс. циклов	Через 100 тыс. циклов	Через 250 тыс. циклов	Через 20 тыс. циклов	Через 100 тыс. циклов	Через 250 тыс. циклов	Вкладыш	Вал
Bardahle Full Metal	0,039	0,017	0,039	49,9	63,2	61,3	-0,2	-0,5
Liqui Moly Ceratec	0,094	0,061	0,090	58,9	68,2	79,6	-5,5	-3,6
СУПРОТЕК Актив	0,049	0,028	0,025	47,5	56,4	57,5	-1,7	-1,9

В то же время, динамика изменения коэффициента трения при испытаниях состава СУПРОТЕК Актив, имеющего в качестве активной компоненты минеральные порошки геомодификаторов трения, существенно другая. В процессе его работы наблюдается устойчивое

снижение сил трения в модели триботехнического узла, при этом на момент окончания испытаний величина коэффициента трения оказалась самой низкой среди всех испытуемых образцов. Анализ динамики изменения температуры масла в камере машины трения подтверждают полученные результаты по величинам коэффициентов трения. Очевидно, такая динамика определяется процессом формирования защитного слоя, развивающегося во времени в присутствии триботехнического состава.

Таблица 4. Результаты измерения твердости шеек коленчатого вала до и после обработки двигателей триботехническими составами.

	До испытаний					После испытаний				
	Шатунные шейки, номер шейки					Шатунные шейки, номер шейки				
	1	2	3	4	Среднее	1	2	3	4	Среднее
Bardahle Full Metal	265	287	262	297	278	301	280	259	302	286
Liqui Moly Ceratec	299	294	283	297	293	297	285	275	300	289
СУПРОТЕК Актив	288	290	281	262	280	299	295	297	278	292

	До испытаний						После испытаний					
	Коренные шейки, номер шейки						Коренные шейки, номер шейки					
	1	2	3	4	5	Среднее	1	2	3	4	5	Среднее
Bardahle Full Metal	310	305	242	298	304	292	308	288	231	296	299	284
Liqui Moly Ceratec	309	299	298	295	309	302	299	276	297	302	292	293
СУПРОТЕК Актив	273	286	292	282	281	283	294	299	295	297	288	295

Наилучшие показатели по защите от износа показал триботехнический состав «Bardahl Full Metal», что определяется механизмом его работы, связанном с формированием металлоплакирующего слоя на рабочих поверхностях трения. Перенос активной компоненты состава из масла на поверхности компенсирует убыль массы за счет износа.

Низкие скорости износа пар трения, обработанных составом «СУПРОТЕК Актив» объясняются иначе. Здесь главную роль в эффекте защиты от износа играет существенное улучшение условий смазывания, что подтверждается самым низким значением коэффициента трения, а также определенное упрочнение поверхностей трения, в первую очередь – шейки вала. Для подтверждения этого были произведены измерения

твердости поверхностей шеек коленчатых валов всех трех двигателей до и после испытаний. Результаты приведены в табл.4.

Результаты, приведенные в табл.4 свидетельствую о том, что только после применения триботехнического состава «СУПРОТЕК Актив» наблюдалось некоторое увеличение твердости поверхностей чугунных поверхностей вала. Использование металлоплакирующих составов, содержащих в качестве активных компонент порошков мягких металлов, такого эффекта не дает.

Таким образом, комплекс проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- Наличие повреждений рабочих поверхностей узлов трения поршневого ДВС приводит к существенному увеличению мощности механических потерь в нем, что проявляется снижением мощности и экономичности двигателя. Это является следствием нескольких действия факторов, влияющих на работу узлов трения двигателя, среди которых основным является ухудшение условий смазывания и снижение несущей способности подшипниковых узлов. При этом увеличивается протяженность зоны граничного трения, что влечет за собой рост механических потерь и скорости износа рабочих поверхностей узлов трения. Важным фактором, при наличии дефектов трения влияющим на триботехнические процессы в двигателе, является снижение давления масла в системе смазывания. При этом ухудшается маслообеспечение узлов трения, растет температура масла в рабочих зонах подшипников. Кроме того, повреждения рабочих поверхностей поршневых колец и цилиндров двигателя приводит к ухудшению герметичности цилиндров, что в свою очередь снижает индикаторный к.п.д. рабочего цикла.

- Обработка двигателя с поврежденными рабочими поверхностями узлов трения испытанными в рамках настоящей работы триботехническими составами приводит к частичному восстановлению начальных параметров его работы. При этом на процесс восстановления влияют следующие факторы. Во-первых, это постепенное уменьшение размеров вплоть до полной ликвидации дефектов трения на рабочих поверхностях узлов трения. Наилучшим образом в этом процессе проявили себя триботехнические составы, имеющие в своем составе металлоплакирующие компоненты. Составы, работающие по принципу геомодификации, также дают эффект восстановления, однако для его развития требуется больше времени работы двигателя в присутствии триботехнического состава. Но эффект восстановления, обеспечиваемый этой группой триботехнических составов является стойким, и сохраняет свое действие даже после вывода триботехнического состава из двигателя, в отличие от металлоплакирующих составов, сохраняемость эффекта которых зависит от концентрации активной компоненты в масле. Уменьшение размеров дефектов трения улучшает условия смазывания и

повышает несущую способность подшипников, снижает мощность механических потерь за счет уменьшения протяженности зон граничного трения. Во-вторых, на снижение потерь трения двигателя в процессе (и по результату) его обработки влияет уменьшение коэффициентов трения в подшипниковых узлах, являющееся следствием формирования на их поверхностях специфических антифрикционных слоев. Наибольший эффект по итогу обработки в этом плане показал геомодифицирующий состав (в рассматриваемом тесте – «СУПРОТЕК Актив»). В-третьих, определенное положительное воздействие на снижение скоростей износа узлов трения дает повышение твердости их поверхностей, обеспечиваемое применением триботехнических составов на базе геомодификаторов трения. Однако, этот фактор полностью отсутствует в случае применения металлоплакирующих составов. В-четвертых, восстановление технических показателей двигателя отчасти обеспечивается улучшением уплотнения цилиндров и связанным с ним повышением давления конца сжатия. Снижение массы протечек из камеры сгорания приводит к росту эффективности ДВС.

Очевидно, что применение технология частичного восстановления изношенных ДВС с помощью триботехнических составов имеет значительные ограничения по степени износа двигателя и характеру его загрязненности. Но в случае наличия сравнительного небольшого износа, такая методика способна обеспечить вполне значимый эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство МСХА», 2001. – 616 с.
2. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник / Р.М. Матвеевский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
3. Быков Р.В. Эксплуатационные материалы: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 78 с.
4. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А. Трибохимия силикатов // Трение и смазка в машинах и механизмах, №11, 2013. – С.17-31.
5. Долгополов К.Н., Потеха В.Л., Любимов Д.Н. Трибология геомодифицированных смазочных материалов: монография. – Гродно: ГГАУ, 2013. – 430 с.
6. Адаптивные механизмы структурно-термической приспособляемости силикатных покрытий / Долгополов К.Н. и др. // Трение и износ. – 2014 (35), №2. – С. 188-197.
7. Двуединая проблема введения серпентиновых добавок как результат общности механизмов механохимического синтеза силикатных пленок / Долгополов К.Н. и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах, № 10, 2014. – С.14-28

8. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Рыженков Ю.В. Влияние состояния поверхностей трения двигателя внутреннего сгорания на износ деталей и характеристики его работы. - Научно-технические ведомости СПбГПУ. Основной выпуск. № 2 (54) / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. с. 199-202
9. Дунаев А.В. Совершенствование системы регламентного технического обслуживания МТП АПК // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт, №3. 2014. – С. 26-31.
10. Yuansheng J., Shenghua L. Superlubricity of in Situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of Mg6Si4O10(OH)8 // Superlubricity, – Edited by Dr. A. Erdemir& Dr. J-M. Martin. – Elsevier, 2007. – PP. 445-470.

Shabanov A.Yu., Galyshev Yu.V., Sidorov A.A., Ivanovskiy D. K.

RESEARCH OF EFFICIENCY OF RECOVERY OF TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF THE WORN-OUT ENGINE WITH USE OF TRIBOTECHNICAL MIXES OF STRUCTURES

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the analysis of opportunities of compensation of wear of frictional units of piston DVS by use of special tribotechnical structures. The technique of bench tests of process of in-place repair of petrol DVS is developed, results of tests of tribotechnical structures of various type as means of restoration of working surfaces of the engine with the set wear degree are given.

Key words: piston engine, wear, repair, tribotechnical mixes of structure

REFERENCES

[1] Garkunov of D. N. Tribotekhnik (wear and bezyznosnost): Textbook. - 4 prod., reslave. and additional. Moscow. "MSHA publishing house", 2001. 616 p. (rus.)
[2] Lubricants: Antifrictional and antiwear properties. Test methods: The reference book / R. M. Matveevsky, etc. Moscow. Mechanical engineering, 1989. 224 p. (rus.)
[3] Bykov R. V. Operational materials: manual. - Chelyabinsk: Publishing house SUSU, 2007. 78 p. (rus.)
[4] Dolgopolov K.N., Lyubimov D.N., Glazunova E.A. Tribokhimy of silicates // Friction and greasing in machines and mechanisms, No. 11, 2013. Pp. 17-31 (rus.)

[5] Dolgopolov K.N., Poteha V. L., Lyubimov of D. N. Tribologiya of the geomodified lubricants: monograph. Grodno: GGAU, 2013. 430 p. (rus.)
[6] Adaptive mechanisms of structural and thermal adaptability of silicate coverings / Dolgopolov K.N., etc. // Friction and wear. 2014 (35), No. 2. Pp. 188-197 (rus.)
[7] Two-uniform problem of introduction of serpentinovy additives as result of a community of mechanisms of mechanochemical synthesis of silicate films / Dolgopolov K.N., etc. // Friction and greasing in machines and mechanisms, No. 10, 2014. Pp. 14-28 (rus.)
[8] Shabanov A.Yu., Zaytsev A.B., Ryzhenkov Yu.V. Influence of a condition of surfaces of friction of an internal combustion engine on wear of details and characteristic of its work. - Scientific and technical sheets СПбГПУ. Main release. No. 2 (54) / SPb.: Publishing house Politekhn. un-that, 2008. Pp. 199-202 (rus.)
[9] Dunayev A.V. Improvement of system of procedural maintenance of MTP agrarian and industrial complex // Agricultural machinery: service and repair, No. 3. 2014. Pp. 26-31 (rus.)
[10] Yuansheng J., Shenghua L. Superlubricity of in Situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of Mg6Si4O10(OH)8 // Superlubricity, - Edited by Dr. A. Erdemir& Dr. J-M. Martin. Elsevier, 2007. Pp. 445-470

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 681.5; DOI 10.1872/MMF-2016-56

Аракчеев Е.Н.[1], Брунман М.В. [2], Дьяченко В.А. [3],
Коняшин А.В. [4], Петкова А.П[5]

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫМ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫМ АГРЕГАТОМ СИНТЕЗА АНОЛИТА И ФЕРРАТА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ И ОБРАБОТКИ СТОКОВ

[1]Аракчеев Евгений Николаевич, аспирант,
главный инженер ООО «ГК «Спецмаш», Россия, Дзержинск
Тел.: (8313) 27-11-10, E-mail: arakcheew@yandex.ru

[2]Брунман Михаил Владимирович, аспирант, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86 , E-mail: brunman-m@mail.ru

[3]Дьяченко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-85-30, E-mail: dva40@inbox.ru

[4]Коняшин Александр Викторович, аспирант, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86 , E-mail: akonyashin@yandex.ru

[5]Петкова Ани Петрова, д.т.н., главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86, E-mail: apetkova@inbox.ru.

Аннотация

Рассмотрены принципы построения и практическая реализация адаптивной системы автоматического управления параллельным электролизным синтезом анолита и феррата. Показана экологическая и энергетическая эффективность автоматизации процесса обеззараживания питьевых, технических и сточных вод с помощью мембранного комплексного электролизного агрегата (КЭА). Приведено техническое решение системы управления и ее технические характеристики.

Ключевые слова: Мембранный электролиз, анолит, феррат, обеззараживание воды и стоков, система адаптивного управления, алгоритмы, экологическая безопасность, энергоэффективность.

Применение хлорсодержащих реагентов, несмотря на ряд недостатков, является на сегодняшний день основным методом обеззараживания природных и сточных вод, позволяющим обеспечить пролонгированное действие обеззараживающих реагентов [1, 2]. Наиболее перспективным хлорсодержащим реагентом на коммунальных водопроводах является анолит [3], получаемый электролизом насыщенного раствора поваренной соли в воде, а для очистки стоков – феррат (VI) [4-8].

Наиболее производительным и экономичным методом для получения анолита и ферратов является мембранный электролиз (МЭ) с катионообменной мембранной, обеспечивающий большую единичную мощность установки и позволяющий регулировать энергопотребление процесса электролиза в зависимости от требуемой производительности [8]. Метод МЭ при реализации конструкций с плоскопараллельными ячейками и электродами обеспечивает большую единичную мощность установки по сравнению с электролизом гипохлорита и феррата в неразделенной ячейке и позволяет регулировать энергопотребление процесса электролиза в зависимости от требуемой производительности [9].

Основными достоинствами метода мембранного электролиза являются экологическая чистота, экономия энергозатрат и расходных материалов, высокое качество получаемых продуктов, удобство эксплуатации оборудования, малые требуемые производственные площади. Суммарные энергозатраты при мембранном электролизе на 25 - 40% ниже, а удельный расход соли в 2,5-3 раза меньше, чем в электролизерах с неразделенной ячейкой, производящих гипохлорит. Для мембранного электролиза анолита характерны меньший удельный расход электроэнергии, получение чистого едкого натра и отсутствие загрязнений окружающей среды. Поэтому анолит, получаемый мембранным электролизом насыщенного раствора поваренной соли в воде, является наиболее перспективным и безопасным реагентом для очистки питьевой воды [10, 11]. Побочным отходом этого процесса является концентрированная щелочь, которая может быть использована для производства наиболее сильного из известных окислителей – феррата натрия, также с помощью мембранного электролиза [8]. Данный окислитель может быть эффективно применен для очистки сточных вод.

Авторами предложена концепция построения комплексной электролизной установки - КЭА (рис. 1), которая одновременно производит анолит (первый модуль) для обеззараживания питьевой или технической воды и феррат (второй модуль) для очистки стоков [8-9].

Побочными продуктами этой установки являются водород и кислород, смешанные с парами щелочи.

Рис. 1. Общий вид комплексной установки для производства анолита и феррата

В первом модуле КЭА (хлораторе) получают анолит на месте его применения путем мембранного электролиза солевого насыщенного раствора NaCl в воде под действием постоянного тока. Анолит представляет собой хлорсодержащий агент (газообразный Cl_2, ClO_2 и др.) пролонгированного действия, предназначенный для обеззараживания воды, в котором концентрация по активному хлору может достигать 3 г/л, по этому при обеззараживании анолит разбавляется до 0.8 – 3 мг/л. Анолит эффективен против всех патогенных микроорганизмов, включая бактерии, вирусы, микобактерии, возбудители анаэробных инфекции, возбудители особо опасных инфекций, грибы, споры.

При применении хлорсодержащих агентов, в том числе и анолита, для обеззараживания воды, концентрация в воде остаточного связанного хлора должна находиться в пределах 0,8-1,2 мг/л перед поступлением ее в систему водоснабжения [1-2]. Поэтому актуальной проблемой является контроль и регулирование количества остаточного хлора в воде перед поступлением ее в систему водоснабжения для предотвращения перехлорирования или недохлорирования. Эта проблема решается путем автоматизации управления хлоратором, система управления которого предусматривает контроль количества остаточного хлора в воде перед поступлением ее в систему водоснабжения и оптимизирует рабочие параметры установки для обеспечения концентрации хлора в необходимых

пределах.

Производство феррата во втором модуле КЭА (фераторе) более энергозатратно, что требует экономии реагента и, как следствие, определенной технологии управления производством феррата и его подачей в обрабатываемые воды.

Адаптианая система управления КЭА позволит обеспечивать заданную концентрацию по анолиту и феррату в обеззараживаемой воде и стоках, а также автоматизировать управление процессов очистки воды и стоков и их удаленный мониторинг на подобных установках.

Внедрение таких КЭА с системами автоматического управления (САУ) синтезом анолита и феррата обеспечит конкурентоспособность отечественных систем водоочистки по сравнению с известными аналогами в части стоимости и энергоэффективности.

1. А*даптивное управление КЭА с минимизацией ошибки регулирования по хлору*

Предложенный принцип построения САУ КЭА основывается на поточном измерении остаточного связанного хлора в очищаемой воде и концентрации феррата на выходе из установки. Однако, существенное изменение мгновенного значения водопотребления может привести к недо- или перехлорированию ввиду инерционности системы производства анолита. Наличие и величина этого несоответствия между требуемым уровнем хлора и фактическим является ошибкой регулирования данной САУ. Данную ошибку необходимо минимизировать. В случае с производством феррата устранение подобной ошибки не является критичным ввиду того, что феррат не обладает прологированным действием и избыток этого реагента за короткое время разложится на нетоксичные элементы.

Чтобы минимизировать ошибку регулирования производства хлора без дополнительной установки дорогостоящего оборудования предлагается следующий способ оптимизации принятого принципа управления. Задающим воздействием для определения текущей производительности хлоратора является расход воды в текущий момент времени, а обратная связь осуществляется по результату очистки, то есть по измеренной концентрации связанного хлора в обрабатываемой воде. Однако критерии обратной связи по этой величине предлагается сделать адаптивными на основании статистических данных.

В соответствии с законодательством Российской Федерации, по ГОСТ 2874-82 концентрация остаточного связанного хлора в питьевой воде после резервуара чистой воды должна лежать в диапазоне от 0,8 до 1,2 мг/л. Данный диапазон является пределом регулирования.

Основной идеей предлагаемой методики является выбор уровня регулирования внутри указанного диапазона. В случае, если выбранный уровень регулирования перед предполагаемым увеличением

водопотребления приблизить к верхней границе диапазона, а не к середине, то при резком изменении фактического водопотребления время работы системы с ошибкой по управлению уменьшится. Это достигается максимально дозволенным перерегулирование по хлору при условии, что отклонения водопотребления в сторону уменьшения и в сторону увеличения не равновероятны. реализации Даннsq принцип и алгоритмы автоматического управления параметрами электролиза анолита и производительностью первого модуля (хлоратора) как по статистическим данным суточного/сезонного водопотребления, так и по результатам текущего контроля параметров реализованы в [11]. Такой подход к адаптации управления по величине остаточного связанного хлора позволяет достаточно инерционной системе подготовиться к предполагаемым изменениям водопотребления, а использование круглогодичных данных минимизирует влияние сезонности на результат.

2. Принципы управления произоводством феррата

Исходным сырьем для производства феррата в КЭА является водный раствор NaOH, являющийся продуктом параллельного производства анолита. Соответственно, объем производства этого сырья связан с объемом производства анолита. Таким образом, при расчете параметров работы модуля производства феррата в первую очередь учитывается наличие запаса сырья в соответствующем баке. При наличии сигнала о минимальном уровне сырья в баке основным параметром становится текущий объем его производства. При наличии запаса сырья производство осуществляется, исходя из оптимальных по энергопотреблению параметров. При отсутствии сырья параметры выбираются таким образом, чтобы обеспечить, при необходимости, максимальный выход феррата при минимальных затратах сырья.

3. Принципы построения, алгоритм и структура САУ

Для исследования принципов построения, схемных и конструктивных решений системы управления, отработки и оптимизации системы управления и режимов работы установки был разрабатан экспериментальный образец КЭА (рис. 2), исходя из производительности по вырабатываемому анолиту (в пересчете на хлор) не менее 1,56 кг/сут (65 г/ч) при энергопотреблении не более 3,5 кВтч/кг хлора и по феррату до 0,6 кг/сут (25 г/ч) при энергопотреблении до 6 кВтч/кг феррата.

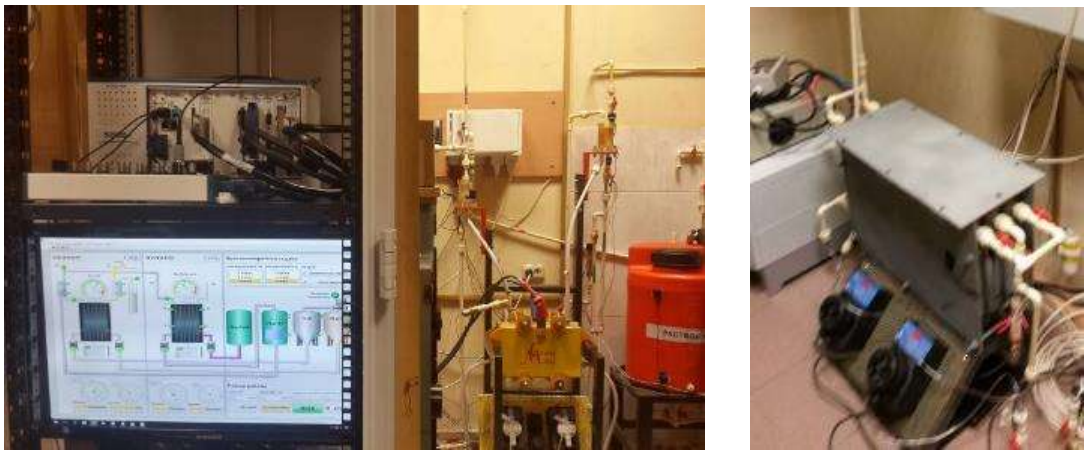


Рис.2 Экспериментальный образец КЭА и его модули

САУ обеспечивает управление элементами мембранных электролизеров, регулирует параметров рабочих компонентов по заданным алгоритмам, сбор, регистрацию, отображение, хранение и обработку информации всех необходимых сигналов и параметров процесса электролиза обоих реагентов. Это позволяет оптимизировать работу электролизеров и минимизировать энергозатраты на производство обоих реагентов вместе с поддержанием заданной концентрации раствора анолита в проточной воде и феррата в очищаемых стоках.

Работа каждого из двух электролизеров, входящих в состав КЭА, предполагает 4 вида функционирования: запуск электролизера, работу в непрерывном режиме, а также штатную и внештатную остановку.

Система автоматического управления КЭА предназначена для управления технологическим процессом (ТП) в автоматизированном режиме с минимальным вмешательством обслуживающего персонала. Помимо осуществления управления ТП, САУ контролирует параметры процесса и датчики в помещении для своевременного обнаружения неисправностей. Также САУ предоставляет оператору интерфейс для интерактивного управления агрегатами хлоратора и ферратора, сохраняет и предоставляет архивные данные. САУ КЭА может функционировать в режимах ручного и автоматического управления.

В ручном режиме САУ осуществляет сбор информации с датчиков и устройств обоих электролизеров и отображение полученных данных на мониторе оператора. Также САУ в ручном режиме позволяет задавать расход электролита и токовую нагрузку на электролизерах, осуществлять их пуск и остановку. Автоматическое регулирование параметров работы и возможность автоматического аварийного отключения в ручном режиме не используются.

В автоматическом режиме САУ осуществляет управление доступными параметрами процесса, а при наличии аварийных ситуаций останавливает ТП с подачей аварийного сигнала. В автоматическом

режиме управляющий сигнал самостоятельно формируется в зависимости от показаний работающих в режиме реального времени проточных датчиков: хлора, фиксирующего его содержание в воде, и феррата, фиксирующего его концентрацию в производимом реагенте. Оператором выставляются необходимые значения, которые дальше поддерживаются в установленном диапазоне с учетом расхода сырья и других параметров.

САУ строится на базе программируемых контроллеров CompactRIO производства компании «National Instruments» (США). Программное обеспечение САУ разработано в среде графического программирования LabVIEW.

Разработанная САУ представляет собой многоуровневую распределенную автоматизированную систему, позволяющую осуществлять одновременное управление несколькими процессами электролиза на трех уровнях:

a) Нижний уровень управления реализован на измертельном преобразователе контроллера PXIe 8133, наборе датчиков уровня и температуры, мембранных насосах и источниках постоянного тока. Он обеспечивает получение информации о параметрах технологических процессов производства анолита и феррата на отдельно взятых электролизерах и управление этими процессами в режиме реального времени в соответствии с разработанными алгоритмами оптимизации производительности;

b) Средний уровень реализован на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) реконфигурируемого шасси PXIe 1078 и осуществляет комплексный обмен данными с устройствами нижнего уровня и обработку этих данных;

c) Верхний уровень управления реализован на основе сигнального процессора контроллера автоматизации PXIe 8133, связанного с пультом управления оператора КЭА. Верхний уровень выполняет следующие функции:

- сбор данных с распределённых контроллеров среднего уровня, осуществляющих непосредственное управление электролизными установками, по сети Internet;
- подготовка, создание и хранение циклограмм работы;
- визуализация процесса испытаний в удобном графическом, табличном и текстовом виде;
- запись всех параметров процесса электролиза в журнал на сетевом дисковом массиве;
- быстрая и удобная подготовка отчёта с результатами процесса электролиза;
- отображение регулируемых параметров на дисплее пульта управления оператора;
- осуществление обратной связи с удаленным комплексным

электролизным агрегатом на основании анализа и обработки данных электролиза;

- интеллектуальное управление процессом электролиза в зависимости от прогнозируемого расхода питьевой воды, количества обрабатываемых стоков, наличия запасов водного раствора NaOH и сезонными особенностями;

- удаленный контроль и управление работой любого из электролизеров, объединенных в общую сеть, из любой точки мира.

САУ позволяет получать объективную информацию о работе КЭА в различных режимах эксплуатации. Такой подход позволяет эффективно, с минимальными трудозатратами исследовать широкий спектр параметров и получать оперативный доступ к большим объемам данных. Мониторинг параметров электролизных установок в условиях эксплуатации открывает новые возможности по изучению и оценке реальных режимов работы и других параметров обеззараживания воды и стоков. Собранная информация может быть использована для отработки новых технических и технологических решений, повышающих эффективность работы и КПД установок мембранного электролиза для производства анолита и феррата, и реализации интеллектуального многопараметрического управления хлоратором и ферратором.

4. Устройство экспериментального образца КЭА и его системы управления

В зависимости от расстояния между электродами (0,15-1,5 мм для хлоратора и 0,5-2,5 см для ферратора) изменяется напряжение на электролизной ячейке, которое должно находиться в интервале 2,5-4 В. Площадь электродов выбирается из расчета обеспечения плотности тока в интервале 1000-1800 А/м^2 для хлоратора и 250-750 А/м^2 для ферратора. Сила тока подбирается из условия обеспечения запланированного количества получаемого хлора (не менее 65 г/ч) и феррата (не менее 25 г/ч) и энергопотребления не более 3,5 кВтч/кг хлора и 6 кВтч/кг феррата с учетом планируемого выхода по току. Электролизеры работают без избыточного давления (под налив). Режим работы – периодический или постоянный. Состав устройств, входящих в КЭА, и их функциональные взаимосвязи приведены на рис. 3.

В ручном режиме САУ осуществляет сбор информации с датчиков и устройств КЭА и отображение полученных данных на пульте оператора (рис. 3). Также САУ осуществляет передачу на устройства хлоратора команд, полученных с пульта оператора. В ручном режиме в зависимости от расхода воды задаются вручную параметры производительности насосов-дозаторов сырья, а также задается токовая нагрузка на электролизерах. В этом режиме не активны функции автоматического регулирования параметров работы и автоматического аварийного отключения электролизеров.

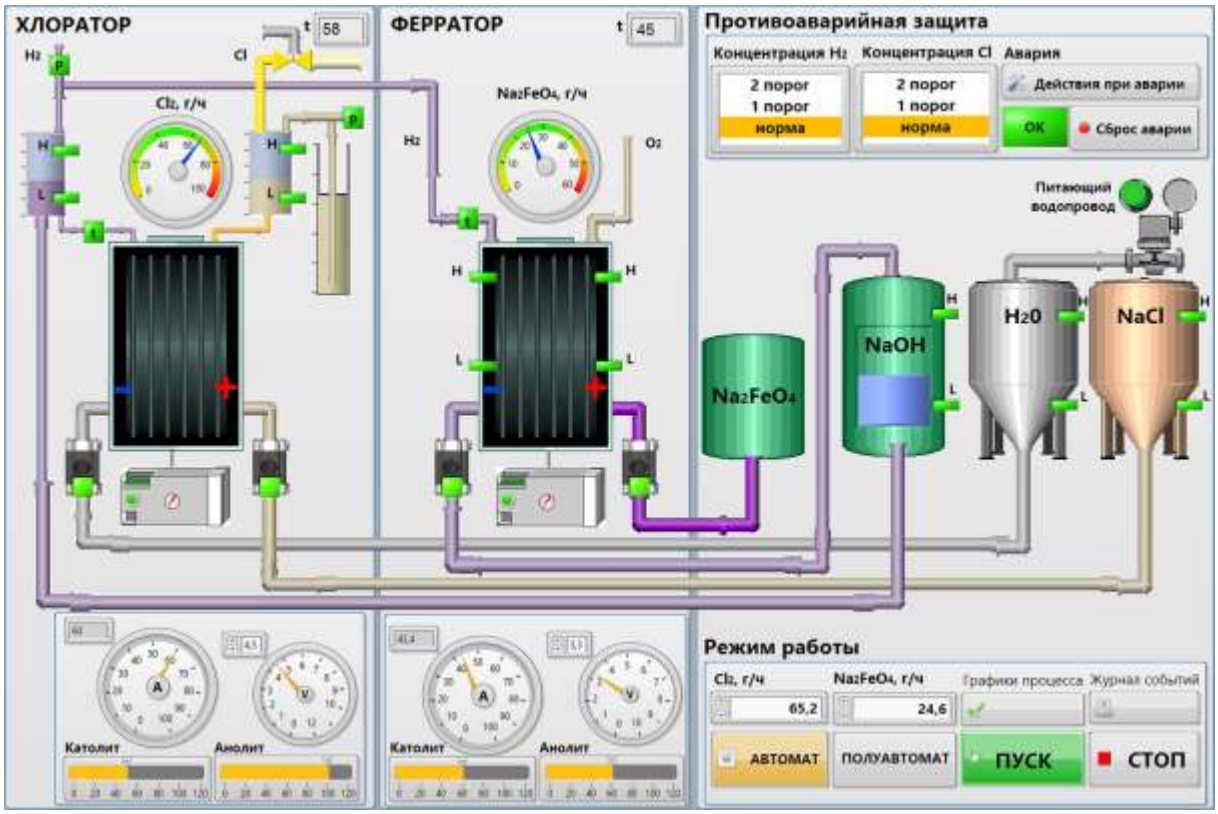


Рис. 3. SCADA-интерфейс САУ КЭА

САУ КЭА включает в себя устройство управления, комплект датчиков для контроля технологического процесса Д1.1 – Д5 и содержания хлора и водорода в помещении Д9-Д10 для своевременного обнаружения неисправностей в хлораторе и ферраторе, управляемую задвижку З1 для отключения подачи воды (рис. 4). Устройство управления представляет из себя модульный контроллер типа NI PXIe 8133 и панель управления оператора.

Если в полуавтоматическом режиме расход сырья и токовые нагрузки на хлораторе и ферраторе задаются вручную, то в автоматическом режиме управляющий сигнал формируется автоматически, корректируя токовые нагрузки на электролизерах и производительность насосов-дозаторов в большую или меньшую сторону в зависимости от показаний проточных датчиков хлора, показывающих его содержание в воде в режиме реального времени, и поточного анализатора концентрации феррата, а также наличия запаса раствора щелочи и других параметров.

Экспериментальный образец КЭА и его система управления представлены на рисунке 2.

Система также позволяет отслеживать все неисправности, возникшие в процессе эксплуатации, имитировать аварии и их устранение, вести журнал неисправностей.

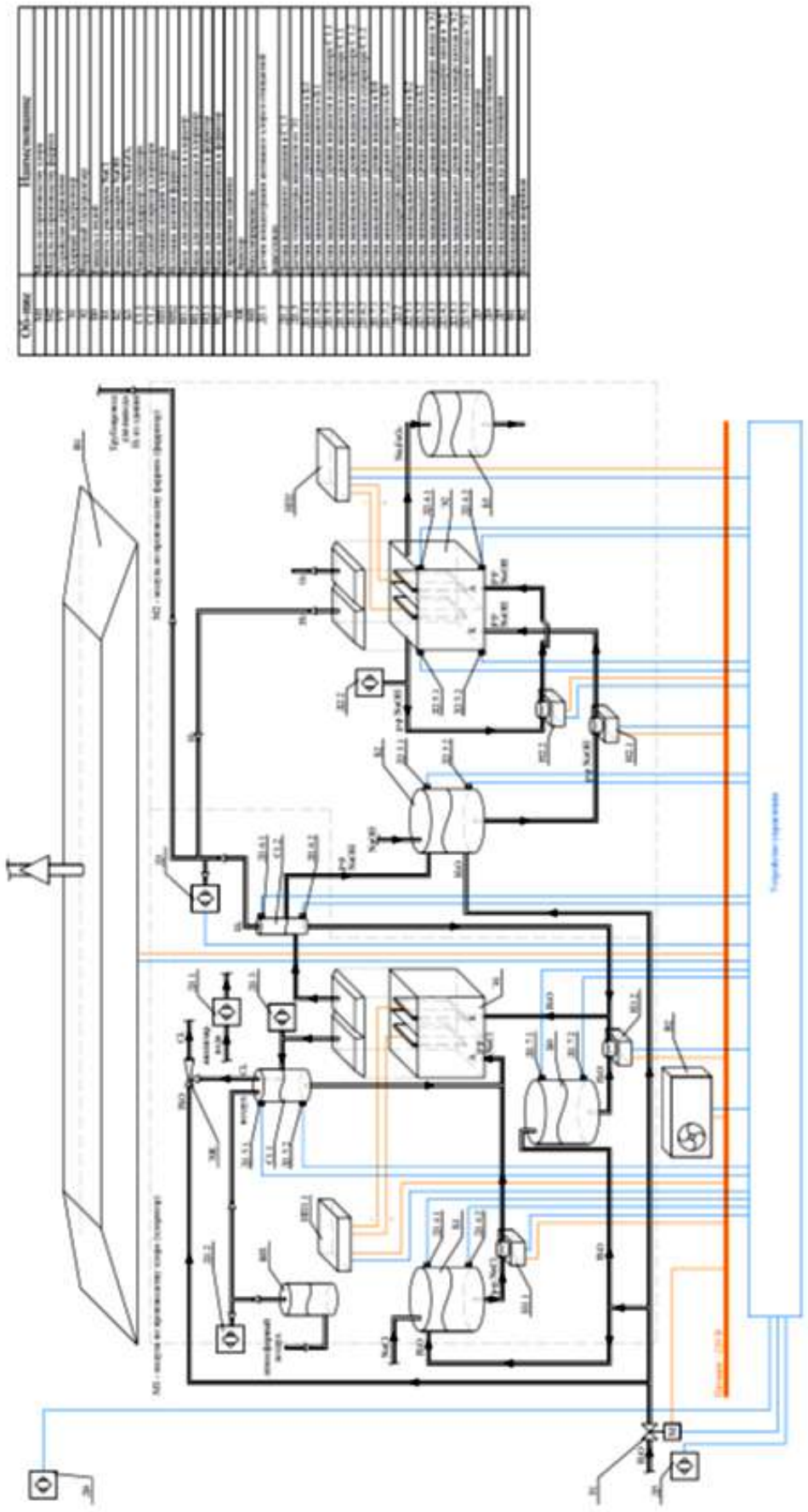


Рис. 4. Структурно-функциональная схема КЭА

Выводы

1. Разработаны принципы управления комплексным электролизным агрегатом одновременной выработки анолита для обеззараживания воды и феррата для обработки стоков, обеспечивающие:

- повышение безопасности обеззараживания воды анолитом (хлором) и стоков ферратом в результате автоматизации ТП получения реагентов мембранным электролизом с их использованием непосредственно на месте производства;

- повышение энергоэффективности ТП и снижения стоимости обеззараживания воды и стоков за счет применения адаптивной системы автоматизированного управления КЭА.

2. Разработанные алгоритм и САУ предназначены для управления технологическим процессом (ТП) в автоматизированном режиме с минимальным вмешательством обслуживающего персонала. САУ осуществляет интерактивное управление ТП в ручном и автоматическом режимах, контролирует рабочие параметры процесса и датчики в помещении для своевременного обнаружения неисправностей, сохраняет и предоставляет архивные данные ТП.

3. САУ КЭА построена на базе модульного контроллера автоматизации PXIe 8133 производства компании «National Instruments». Программное обеспечение САУ разработано в среде графического программирования LabVIEW.

4. В ручном режиме САУ осуществляет сбор информации с датчиков и устройств КЭА и отображение полученных данных на пульте оператора. Также САУ позволяет задавать расход сырья и токовую нагрузку на электролизерах в зависимости от условий производства, осуществлять пуск и остановку хлоратора и ферратора.

5. В автоматическом режиме САУ КЭА осуществляет управление доступными параметрами производства анолита и феррата, а при наличии аварийных ситуаций останавливает ТП с подачей аварийного сигнала. Управляющий сигнал самостоятельно формируется в зависимости от показаний проточных датчиков хлора, фиксирующих его содержание в воде в режиме реального времени, и заданного уровня загрязненности стоков. Оператором выставляются необходимые значения при первичном (вторичном) хлорировании и обработке сточных вод, которые дальше поддерживаются в необходимом диапазоне с учетом расхода воды и ее хлоропоглощаемости, количества и загрязненности стоков за счет корректировки токовой нагрузки хлоратора и ферратора и производительности насосов-дозаторов обоих электролизеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством
2. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества
3. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии. - М.: ВНИИИМТ, 2005. - 176 с.; - ил.
4. Jiang, J.Q., Yin, Q., Zhou, J.L. and Pearce, P. (2005) Occurrence and treatment trials of endocrine disrupting chemicals (EDCs) in wastewaters. Chemosphere 6l(4), 544-550.
5. Sharma V.K. Oxidation of inorganic compounds by ferrate (VI) and ferrate (V): One-electron and two-electron transfer steps. Environ. Sci. Technol. 2010; 44 (13): 5148–52.
6. Light S., Yu X. Recent Advances in Fe(VI) Synthesis. In: Virender K. Sharma, ed. Ferrates. Synthesis, Properties, and Applications in Water and Wastewater Treatment. American Chemical Society; 2008: 2–51.
7. Пат. 2379136 Российская Федерация, МПКВ09С1/08, С02F1/72. Способ детоксикации от органических загрязнителей почвенных и водных сред / Н.А. Кручинин, Г. М. Николаева, Г.М. Костылев, Г.Н. Кручинина, О.В. Арапов, Е.А. Копылова. - 2007.
8. Аракчеев Е. Н., Брунман В. Е., Волков А. Н., Дьяченко В. А., Петкова А. П., Брунман М. В., Коняшин А. В. Обеззараживание и очистка воды с помощью анолита и феррата натрия и установка для их комплексного производства // Вода и экология, № 1, 2016. С. 26-36.
9. Пат. 160773 РФ, МПК С25В, С01D, С01G, С02F. Установка для комплексного получения хлорсодержащих реагентов и феррата натрия / Волков А. Н., Брунман В. Е., Коняшин А. В., Брунман М. В., Петкова А. П., Дьяченко В. А., Аракчеев Е. Н. – 2015.
10. Пат 113735 РФ, МПК С02F. Станция обеззараживания воды / Новичков Е. П., Аракчеев Е. Н., Коняхин О. А., Африн С. А. - 2011.
11. Официальный сайт ГК «Спецмаш»: http://www.specmach.ru (дата последнего посещения 21.04.2016 г.)

E. Arakcheev[1], M. Brunman[2], V. Dyachenko[2], A. Konyashin[2] and A. Petkova[2]

ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF COMPLEX ELECTROLYSIS UNIT FOR ANOLYTE AND SODIUM FERRATE SYNTHESIS FOR WATER DISINFECTION AND WASTEWATERS TREATMENT

[1]GC "Spetsmash", Dzerzhinsk, Russia
[2]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Article describes construction principles and design of adaptive automatic

control system of electrolysis unit that produces both the anolyte and the ferrate. The environmental and energy efficiency of automation of membrane Complex Electrolysis Unit for disinfection of drinking, process and waste water is shown. Article provides technical solution of control system and its performance attributes.

Key words: Membrane electrolysis, anolyte, ferrate, water and wastewater disinfection, adaptive control system, algorithms, environmental safety, energy efficiency.

REFERENCES

[1] State standard 2874-82. Drinking water. Hygienic requirements and quality control. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1982.

[2] Sanitary and epidemiological rules and norms 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow: Minzdrav Rossii; 2002.

[3] V. Bahir, J. Zadorozhnii, B. Leonov, S. Panova, V. Prilutsky Electrochemical activation: a universal tool of green chemistry. - M .: VNIIIMT, 2005. - 176 p.; - Ill.

[4] Jiang, J.Q., Yin, Q., Zhou, J.L. and Pearce, P. (2005) Occurrence and treatment trials of endocrine disrupting chemicals (EDCs) in wastewaters. Chemosphere 6l(4), 544-550.

[5] Sharma V.K. Oxidation of inorganic compounds by ferrate (VI) and ferrate (V): One-electron and two-electron transfer steps. Environ. Sci. Technol. 2010; 44 (13): 5148–52.

[6] Light S., Yu X. Recent Advances in Fe(VI) Synthesis. In: Virender K. Sharma, ed. Ferrates. Synthesis, Properties, and Applications in Water and Wastewater Treatment. American Chemical Society; 2008: 2–51.

[7] Pat. 2379136 RU, IPC B09C1/08, C02F1/72. Way of detoxication of soil and water enviroments from organic pollutants. Kurichin N. A., Nikolaeva G. M., Kostilev G. M., Kruchinina G. N., Arapov O. V., Kopilova E. A.; 2007.

[8] Arakcheev E. N., Brunman V. E., Volkov A. N., Djachenko V. A., Petkova A. P., Brunman M. V., Konyashin A. V. Disinfection and water treatment using anode liquor and sodium ferrate and apparatus for their integrated production. Water and ecology. 2016; 1: 26-36.

[9] Pat. 160773 RU, IPC C25B, C01D, C01G, C02F. Apparatus for complex production of chlorine containing reagents and sodium ferrate. Volkov A. N., Brunman V. E., Konyashin A. V., Brunman M. V., Petkova A. P., Dyachenko V. A., Arakcheev E. N.; 2015.

[10] Pat. 113735 RU, IPC C02F. Water treatment station. Novichkov E. P., Arakcheev E. N., Konyakhin O. A., Afrin S. A.; 2011.

[11] GK "Specmash" official website: http://www.specmach.ru (last attendance 21.04.2016)

УДК 621.651; 621.05.03; 621.65.07, 62-82; DOI 10.1872/MMF-2016-57

В.Е. Брунман[1], А.С. Ватаев[2], А.Н. Волков[3], А.П. Петкова[4]

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕДОБЫЧИ НИЗКОДЕБИТНЫХ СКВАЖИН ШТАНГОВЫМИ ГЛУБИННЫМИ НАСОСАМИ

[1]Брунман Владимир Евгеньевич, к.э.н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86, E-mail: brunman@yandex.ru

[2]Ватаев Андрей Сергеевич, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-85-30, E-mail: avataev@yandex.ru

[3]Волков Андрей Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматы», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86 , E-mail: automats@inbox.ru

[4]Петкова Ани Петрова, д.т.н., главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-96-86, E-mail: apetkova@inbox.ru.

Аннотация

Выполнены сравнительные исследования путей повышения эффективности разработки низкодебитных скважин штанговыми глубинными насосами (ШГН), и на этой основе разработаны конструкция энергоэффективного мобильного отечественного привода штангового глубинного насоса, принципы управления группой приводов единой адаптивной системой управления, позволяющей одновременно и энергоэффективно управлять несколькими приводами ШГН. Полученные результаты позволили минимизировать капитальные, эксплуатационные затраты и энергопотребление системы по сравнению с одиночными приводами с индивидуальными системами автоматического управления (САУ).

Ключевые слова: Штанговый глубинный насос, привод, балансирный привод, скважина, нефтедобывающие установки, насос, трансмиссия,

кинематическая схема, редуктор, фундамент, станок-качалка, двигатель, уравновешивающее устройство, балансир, полированный шток, уравновешивание, линейный привод, зубчатое колесо, гибкая связь, мотор-редуктор, электропривод, рейка.

Сложная ситуация на мировом рынке углеводородов, выражающаяся в снижении цены на нефть, а также неблагоприятная экономическая ситуация, обусловленная введенными в отношении Российской Федерации экономическими санкциями, приводят к тому, что нефтедобывающие компании вынуждены искать способы для снижения себестоимости добываемой нефти. Следует отметить, что одним из факторов, существенно повышающих себестоимость добычи, является неблагоприятная геолого-технологическая структура запасов нефти, характерная для нефтяной промышленности Российской Федерации, выражающаяся в наличии месторождений с низкопродуктивными пластами, а также переход месторождений в завершающую стадию разработки и их истощение. Все это приводит к значительному возрастанию числа малодебитных добывающих скважин [1, 3].

В нашей стране для эксплуатации низко- и среднедебитных скважин наиболее часто применяются приводы штанговых глубинных насосов на базе балансирных и безбалансирных станков-качалок. Эти приводы имеют низкую производительность, неудовлетворительные массогабаритные показатели, низкие надежность и КПД. Необходимость обустройства фундамента для этих установок увеличивают финансовые и временные затраты по вводу скважины в эксплуатацию. Следует также отметить, что станки-качалки малопригодны для эксплуатации малодебитных скважин, поскольку с их помощью невозможно изменять число качаний в широких пределах [1]. Вместе с тем, эффективность нефтедобычи во многом зависит от эффективности работы штангового глубинного насоса [6]. На эффективную работу насоса в свою очередь оказывают воздействие большое количество разнообразных факторов, таких как параметры среды, условия эксплуатации отдельных деталей и узлов оборудования, а также режимные показатели откачки жидкости. В целом же эффективность работы привода ШГН определяется тремя показателями: производительностью насоса, надежностью оборудования и дебитом скважины.

В настоящей работе, проводимой при финансовой поддержке Минобрнауки, (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57815X0132), выполнен сравнительный анализ факторов, влияющих на эффективность процесса нефтедобычи штанговыми глубинными насосами, а именно:

1. Надежность работы привода ШГН;
2. Энергопотребление привода ШГН;
3. Производительность ШГН;

Также были рассмотрены факторы, влияющие на себестоимость процесса нефтедобычи:

4. Технологичность производства привода ШГН
5. Необходимость обустройства фундамента и дополнительных пуско-наладочных операций
6. Массогабаритные показатели, мобильность

Для сравнительной оценки направлений повышения эффективности работы штанговых глубинных насосов составлена таблица 1, в которую внесены рассмотренные выше факторы, а также основные используемые в настоящее время направления повышения эффективности работы ШГН:

а) совершенствование конструкции ШГН, в частности применение ШГН с управляемыми клапанами

б) правильный выбор оборудования насосной установки

в) совершенствование конструкции привода ШГН в части приводного двигателя и преобразователя механической энергии из вращательного движения вала двигателя в возвратно-поступательное движение полированного штока.

г) применение адаптивной САУ, совершенствование алгоритмов управления с целью согласования дебита скважины и производительности СШНУ, обеспечения взаимного уравновешивания приводов путем рационального использования энергии, генерируемой двигателями привода ШГН при ходе штанг вниз.

д) совершенствование систем управления двигателями привода ШГН

е) оптимизация компоновки приводов с целью обеспечения электромагнитной совместимости и надежности, а также норм взрыво- и пожаробезопасности.

В настоящей работе степень влияния на эффективность нефтедобычи оценена следующими показателями (см. табл.1):

- оказывает отрицательное влияние (увеличивает стоимость, снижает надежность и т.д.)
- не оказывает влияния или влияние фактора незначительно
- оказывает положительное влияние, способствует достижению оптимальных показателей.

Степени влияния каждой из мер с помощью балльной оценки: отрицательное влияние – минус 1 балл, нейтральное / слабо выраженное влияние – ноль баллов; положительное влияние – 1 балл.

Суммирование баллов позволило выделить наиболее эффективные направления повышения эффективности работы ШГН.

Из анализа таблицы 1 следует вывод о том, что наиболее эффективными направлениями повышения эффективности работы ШГН являются:

- совершенствование конструкции привода ШГН в части приводного двигателя и преобразователя механической энергии из вращательного

движения вала двигателя в возвратно-поступательное движение полированного штока.

- применение адаптивной САУ, совершенствование алгоритмов управления с целью согласования дебита скважины и производительности СШНУ, обеспечения взаимного уравновешивания приводов путем рационального использования энергии, генерируемой двигателями привода ШГН при ходе штанг вниз.

Таблица 1

Основные направления повышения эффективности штанговых глубинных насосов

Факторы / Направления исследований	влияющие на эффективность процесса нефтедобычи				влияющие на себестоимость процесса нефтедобычи				Сумма баллов
	Надежность работы	Энергопотребление	Производительность	Эксплуатационные издержки	Технологичность производства СШНУ	Стоимость СШНУ	Затраты при монтаже и наладке	Массогабаритные показатели, мобильность	
а) совершенствование конструкции ШГН в частности применение ШГН с управляемыми клапанами	**1**	**–1**	**1**	**–1**	**–1**	**–1**	**0**	**0**	**-2**
б) правильный выбор оборудования	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**5**
в) совершенствование конструкции привода ШГН в части приводного двигателя и преобразователя механической энергии из вращательного движения вала двигателя в возвратно-поступательное движение полированного штока	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**8**
г) применение адаптивной САУ, совершенствование алгоритмов управления с целью согласования дебита скважины и производительности ШГН, обеспечения взаимного уравновешивания приводов путем рационального использования энергии, генерируемой двигателями привода ШГН при ходе штанг вниз.	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**1**	**0**	**1**	**6**
д) совершенствование систем управления двигателями привода ШГН	**1**	**1**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**4**
е) оптимизация компоновки приводов с целью обеспечения электромагнитной совместимости и надежности, а также норм взрыво- и пожаробезопасности	**1**	**1**	**0**	**–1**	**1**	**–1**	**1**	**0**	**2**

Ввиду того, что создание новой конструкции привода ШГН требует адаптации алгоритма управления процессом нефтедобычи, задача повышения эффективности процесса нефтедобычи была разбита на два

этапа: совершенствование конструкции и создание адаптивной САУ, позволяющей энергоэффективно управлять разработанным приводом или группой приводов.

Выполненный в настоящей работе анализ конструкций приводов позволил также сформулировать требования к перспективному энергоэффективному приводу ШГН и системе управления им:

- Возможность крепления к устью скважины.
- Низкие затраты на обустройство.
- Мобильность.
- Низкая металлоемкость, малые масса и габариты.
- Безопасность при обслуживании (отсутствие открытых движущихся механизмов, элементов под высоким давлением).
- Простота монтажа и обслуживания (не требуется балансировка, центровка, настройка ременной передачи, механизмов ограничения хода штока).
- Простота конструкции.
- Обеспечение перевода двигателя в генераторный режим, низкие потери в редукторе и системе, преобразующей вращательное движение ротора электродвигателя в возвратно-поступательное движение устьевого штока.
- Широкий диапазон регулирования производительности насоса.
- Отсутствие гибкого звена, соединяющего привод и насосную штангу (тросов и цепей), обрыв которых может привести к разрушению устьевого оборудования скважины.
- Управляемость и малоинерционность.
- Применение системы прямого управления моментом асинхронного двигателя и преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.

Выполненные исследования показали, что линейный привод ШГН с передачей *зубчатое колесо - рейка* на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором наиболее полно отвечает требованиям к конструкции привода ШГН и обеспечивает работу ШГН в условиях нефтедобычи из низкодебитной скважины.

Разработана конструкция линейного привода СШНУ и изготовлены экспериментальные образцы. За основу при разработке были взяты линейные приводы ШГН фирмы Unico [2], конструкция которых была существенным образом доработана с целью повышения эффективности и надежности нефтедобычи.

Известно также, что для повышения дебитности скважин и эффективности нефтедобычи целесообразно объединение нескольких пластов в один эксплуатационный объект и применение адаптивной системы разработки нефтяных месторождений [5]. Эффективность такой

системы существенно зависит от алгоритма управления насосами, который может обеспечить максимальную нефтеотдачу месторождения при оптимальном энергопотреблении.

В настоящей работе разработана структура системы управления линейными приводами СШНУ, предназначенной для кустовой разработки низкодебитных скважин (см. рис. 1).

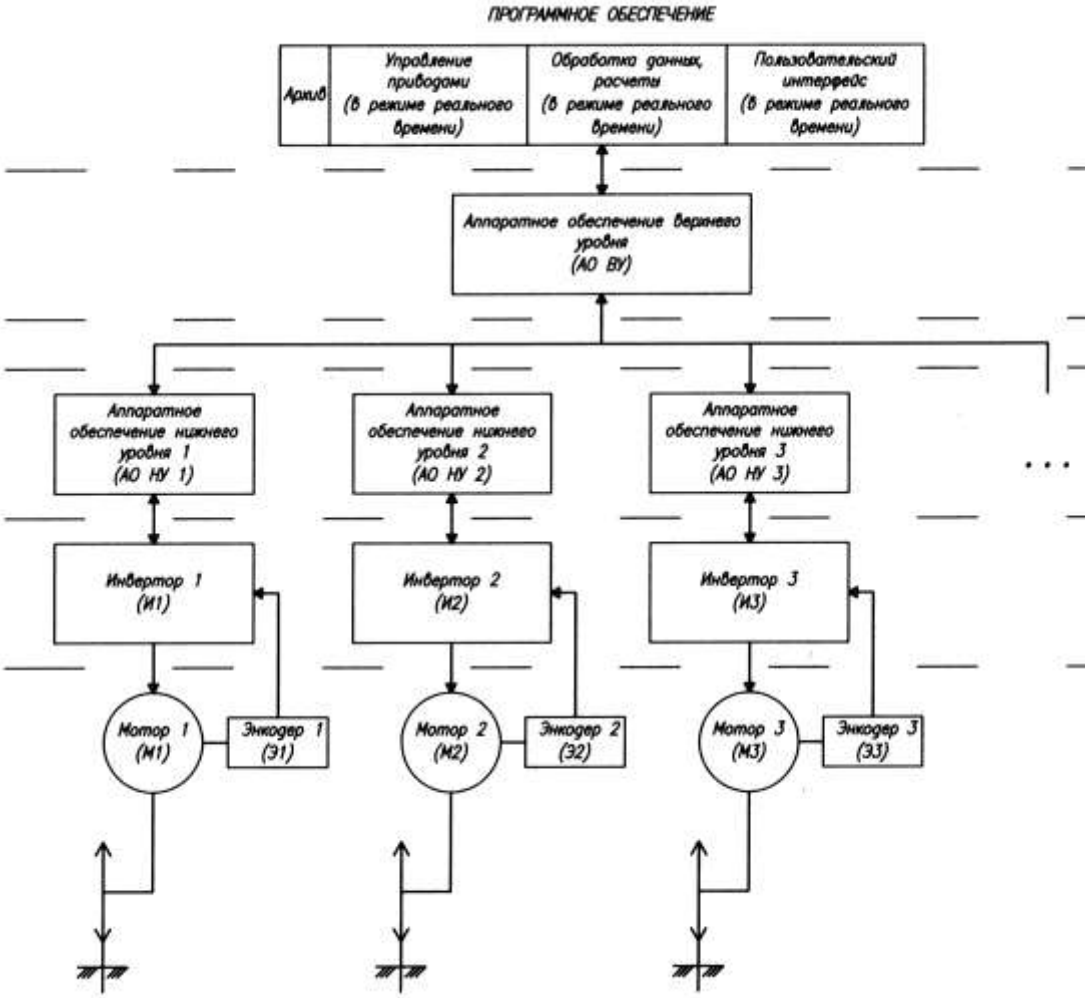


Рис. 1. Структурная схема системы управления группой приводов ШГН

Главным достоинством является повышение энергоэффективности нефтедобычи с помощью ШГН за счет использования потенциальной энергии колонны труб при движении штока вниз приводами, осуществляющими подъем нефти.

Для синтеза алгоритма управления целесообразно [4] применение модельно-ориентированного проектирования, основанного на использовании систем имитационного моделирования. С использованием подобного метода становится возможным не только разработать и отладить работу разработанного алгоритма управления на целевом устройстве, подключив его входы и выходы к математической модели

объекта управления, но и дает возможность исследовать реакцию синтезированного регулятора на всем диапазоне сигналов и параметров, зачастую недостижимых при натурном моделировании.

Испытание системы и алгоритма управления будет первоначально выполнено на установке, состоящей из двух опытных образцов привода ШГН разработанной конструкции. По результатам испытаний будут внесены изменения в конструкцию привода, математические модели и алгоритм управления. В дальнейшем число одновременно работающих установок будет расширено до шести. Предполагается, что число работающих установок при кустовой разработке скважин может варьироваться как пользователем, так и самой системой управления. Выбранный подход позволит существенно сократить время разработки и удешевить проект, поскольку процесс проектирования и изготовления нового привода и разработка системы управления будут вестись параллельно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Андреев В.В. Справочник по добыче нефти. / В.В. Андреев, К.Р. Уразаков и др. Под общ. ред. К. Р. Уразакова – М.: ООО Недра Бизнес-Центр, 2000.- 374 с.

2 Балабанов К.В. Инновационные автоматизированные системы механизированной добычи нефти компании UNICO / К.В. Балабанов // Нефть, газ новации 2011, №11 .- с. 41-49.

3 Бурмакин А.М. Низкоскоростной дугостаторный асинхронный двигатель для станков-качалок малодебитных нефтяных скважин. / А.М. Бурмакин, Е.М. Огарков, Н.. Шулаков. // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: сборник научных трудов IV международной научно-технической конференции. Екатеринбург: УРФУ, 2011. – с 344-348.

4 Ганеев А.Р. Модельно-ориентированное проектирование при создании станции управления процессом добычи нефти скважинными штанговыми насосами / А.Р. Ганеев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2012. № 4. – с.48 – 51.

5 Лысенко В.Д. Разработка малопродуктивных нефтяных месторождений. / В.Д. Лысенко, В.И. Грайфер. – М.: ООО Недра Бизнес-Центр, 2001. - 562 с.

6 Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: Учебное пособие для вузов. / И.Т. Мищенко— М: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 816 с.

V.E. Brunman, A.S. Vataev, A.N. Volkov, A.P. Petkova

METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOW – RATE OIL WELLS USING SUCKER ROD PUMPING UNITS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A comparative research of efficiency improving methods of low-rate wells sucker rod pumps (SRP) is made. Based on it an energy-efficient design of the domestically produces mobile drive for sucker rod pumps is developed, and principles of controlling a group of pumps with a single adaptive control system are proposed, allowing an energy efficient and simultaneous management of several drives of SRP. The obtained results allowed to minimize capital and operating costs and power consumption of the system compared to a single drive with individual automatic control system.

Key words: sucker rod pump, drive, balance beam drive, oil well, oil extraction unit, pump, transmission, kinematic plot, gear reducer, plate base, pumping unit, drive, balancing unit, stabilizer, polished rod, balancing, linear drive, gear, flexible connection, gearmotor, electric drive, rack-and-pinion mechanism.

REFERENCES

[1] Andreev V.V. Spravochnik po dobiche gaza. / V.V. Andreev, K.R. Urazakov i dr. Pod obsh. red. K. R. Urazakova – M.: OOO Nedra Business Business-Center, 2000. - 374 p. (rus)

[2] Balabanov K.V. Innovacionnie avtomatizirovannie sistemy mechanizirovannoy dobichy nefti kompanii UNICO. / K.V. Balabanov // Neft, gaz novacii 2011, №11.- c. 41-49. (rus)

[3] Burmakin A.M. Nizkoskorostnoy dugostatorniy asinchronniy dvigatel dlya stankov-kachalok malodebitnih neftyanih skvagin./ A.M. Burmakin. E.M. Ogarkov, N. Shulakov.// Elektromekhanicheskie I elektromagnitnie preobrazovateli energii I upravlayemie elektromekhanicheskie sistemy: sbornik nauchnih trudov IV mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencii. Ekaterinburg: URFU, 2011. – p. 344-348.

[4] Ganeev A.R. Modelno-orientirovannoe proektirovanie pri sozdanii stancii upravleniya processom dobichy nefti skvazhinnimi shtangovimi nasosami / A.R. Ganeev // Avtomatizaciya telemechanizaciya I svyaz v neftyanoy promishlennosty. 2012. № 4. – p.48 – 51.

[5] Lisenko V.D. Razrabotka maloproduktivnih neftyanikh maestorozhdeniy. / V.D. Lisenko, V.I. Grayfer. – M.: OOO Nedra Business Business-Center, 2001. - 562 p.

[6] Michenko I.T. Skvaghinnaya dobycha nefti: Uchebnoye posobie dlya vuzov. / I.T. Michenko— M: GUP Izdatelstvo «Heft i gaz» RGU nefti i gaza im I.M. Gubkina, 2003. 816 p.

УДК 621.865.8(075.8) ; DOI 10.1872/MMF-2016-58

П.Ю. Гедько

МИКРОРОБОТ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО ШАРНИРА С АКТЮАТОРОМ – АСИММЕТРИЧНОЙ ПЬЕЗОТРУБКОЙ

Гедько Павел Юрьевич, аспирант кафедры “Автоматы”
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
E-mail: choppepper@list.ru.

Аннотация

В данной статье представлен микроробот на базе сферического шарнира с пьезоэлектрическим приводом. Рассмотрена геометрия движения шара по торцу пьезотрубки. Показаны траектории движения точки на поверхности шара, установленного на торце несимметричной пьезотрубки. Определены основные параметры системы управления микроробота. Описан принцип действия сферического трехкоординатного бесконтактного датчика микроробота.

Ключевые слова: микроробот, сферический шарнир, пьезокерамический актюатор, биморфный диск, резонансная частота, датчик положения сферы.

В настоящее время в нематериалоемкой промышленности в сфере исследований микро структур требуются компактные и быстрые роботы. Благодаря компактным размерам такие микророботы можно легко интегрировать в рабочую зону микроскопа или другого измерительного или сборочного комплекса. В соответствии с поставленными требованиями было разработано несколько прототипов микроробота с пьезоэлектрическим приводом. [1] После проведения первичных испытаний был выбран микроробот с пьезотрубкой-актюатором. Дальнейшее построение микроробота потребовало разработки системы управления и определения технических характеристик робота.

В качестве основного элемента пьезопривода используется несимметричная пьезотрубка, у которой внешняя и внутренняя цилиндрические поверхности смещены друг относительно друга – рис. 1.

Рабочий орган в такой системе крепится непосредственно на поверхности шара, усилие с пьезопривода на шар передается за счет силы трения. Поскольку поверхность шара однородна (кроме места крепления рабочего органа), то зона действия рабочего органа практически совпадает со сферой. Таким образом, можно получать углы сервиса манипулятора

почти 360^0 по трем координатам. Сферический шарнир позволяет изменять усилие прижима шара к опорам при помощи электромагнита.

Рис. 1. Микроробот

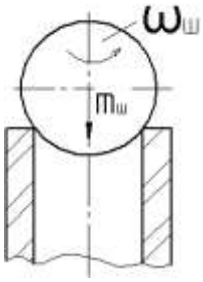


Рис. 2. Расположение шара

Направление движения задается выбором электрода пьезотрубки, на который подается гармоническое напряжение на резонансной частоте. Вращение шара обусловлено разнотолщинностью пьезотрубки, что при подаче напряжения на один электрод, дает несколько составляющих силы, действующей через поверхность, контактирующую с шаром, и передает их посредством силы трения, приводя его в движение, рис. 2. [2]

Для осуществления движения шара используются резонансные режимы при возбуждении изгибно-крутильных колебаний сложной формы, которые осуществляются за счет подачи гармонического напряжения на различные электроды пьезотрубки. В частности, для осуществления вращения вокруг вертикальной оси в одном направлении, напряжение подается на один электрод, расположенный в центральной части образующей поверхности; для вращения в противоположную сторону напряжение подается на противоположный электрод. Конечно-элементное моделирование вынужденных колебаний на резонансной частоте 34 кГц дает амплитуды колебаний порядка 1,2 мкм при действующем значении гармонического напряжения 300 В. Крутильная составляющая колебаний возникает по причине переменного по длине трубки эксцентриситета внутренней цилиндрической поверхности относительно внешней.

Геометрия движения шара по колеблющемуся на резонансной частоте торцу пьезотрубки

Для определения параметров микроробота можно построить график перемещения отдельной точки шара, соприкасающейся с поверхностью сферы, например аналогичный метод расчета используют в статье [3], в которой описывается движение шара в аналогичном по конструкции микророботе с другим типом пьезодвигателя, рис. 3. Движение шара в данном случае определяется в большей степени модами колебаний B2_x, B2_y и L1_z, а не геометрией привода.

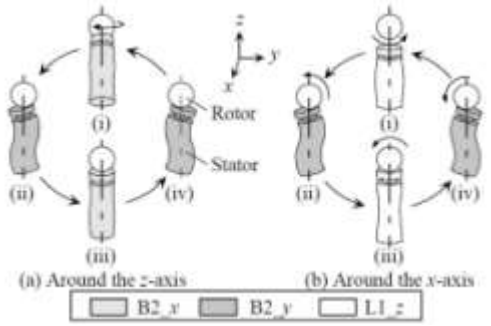


Рис. 3. Моды колебаний шара

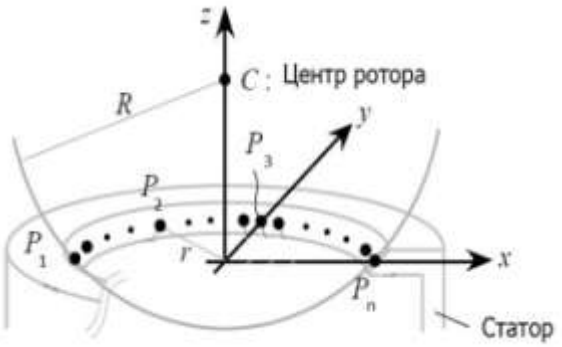


Рис. 4. Расположение шара

Методика расчета, предложенная Kenjiro Takemura и Takashi Maeno справедлива и в нашем случае.

Как видно из иллюстрации (рис. 4), поверхность разбита на точки, для которых рассчитываются значения приложенных сил. Далее расчет производится для отдельно взятой точки на окружности движения шара. Для всех остальных точек картина будет идентична.

В нашем случае, так как траектория движения точки 1 больше траектории движения точки 2, то момент, создаваемый трубкой, будет больше в одном направлении. Следовательно, в одну сторону трубка будет двигаться с большей скоростью и амплитудой. Рассмотрим движение шара в пяти промежуточных положениях, рис. 5.

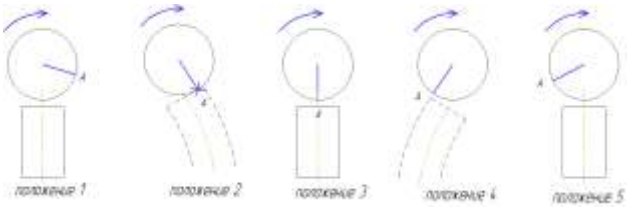


Рис. 5. Вращение шара вокруг горизонтальной оси

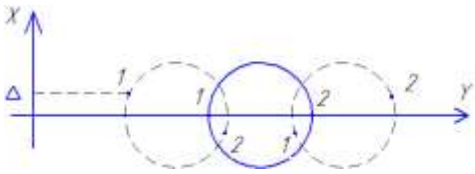


Рис. 6. Колебания торца трубки при вращении шара вокруг вертикальной оси

Движение шара вокруг горизонтальной оси обусловлено разностью удлинений трубки в крайних положениях и инерции вращающегося шара, позволяющим трубке подталкивать шар только в одном направлении.

Рассмотрим движение вокруг вертикальной оси. Траектория перемещения торца трубки, изображенная на рисунке 6, соответсвует вращению шара вокруг вертикальной оси. Три изображенные позиции торца трубки, это вид сверху. Благодаря ассиметричности трубки, описанной ранее, при качении происходит поворот трубки вокруг своей оси на некоторый угол. Рассмотрим данную траекторию движения торца трубки для одной фиксированной точки его поверхности.

Непрерывное вращение шара обусловлено отсутствием постоянного

зацепления шара с трубкой. При движении вверх шар подпрыгивает на трубке, когда она повернута на один угол, а за время, пока шар возвратится в зацепление, трубка имеет иное положение в пространстве и соприкосновение поверхностей шара и трубки происходит уже по другим точкам. Точнее, точка на торце трубки уходит вниз, а шар осуществляет движение по инерции плюс свободное падение по баллистической траектории, пока его не “подхватывает” следующая точка торца трубки. Следовательно, шар осуществляет перемещение относительно торца трубки и зацепление не постоянно. Отсюда получаем траекторию для отдельно взятой точки оси R – рис. 7.

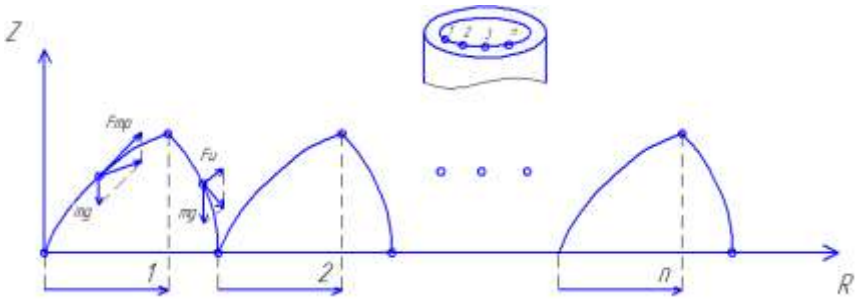


Рис. 7. Траектория движения точки на шаре

Траектория движения состоит из множества отрезков, представляющих из себя 2 этапа. Первый этап, движение под действием силы Fтр, передаваемой на шар трубкой и второй этап – падение под действием силы инерции Fи и силы тяжести. По окончании второго этапа шар попадает под влияние следующей точки торца трубки и т.д.

Применение микроробота

Микроробот найдет применение в различных отраслях промышленности, медицине и исследовательской деятельности. Возможность использования различных сменных устройств манипулирования, захвата и измерения позволяет гибко настроить робот для выполнения различных типов задач. Микроробот может переносить материалы исследований, совершать сборку промышленных микроизделий и биологических медицинских носителей, проводить измерения электрических характеристик, параметров жесткости и твердости или фрикционных параметров. Технологические схемы примеров применимости микроробота показаны на рис. 8.

Сложность управления таким объектом заключается в необходимости поддержания резонанса и устранения неустойчивости движения шара при малых амплитудах колебаний, а также нелинейности зависимости скорости вращения шара по трем координатам от амплитуды колебаний торца пьезотрубки.

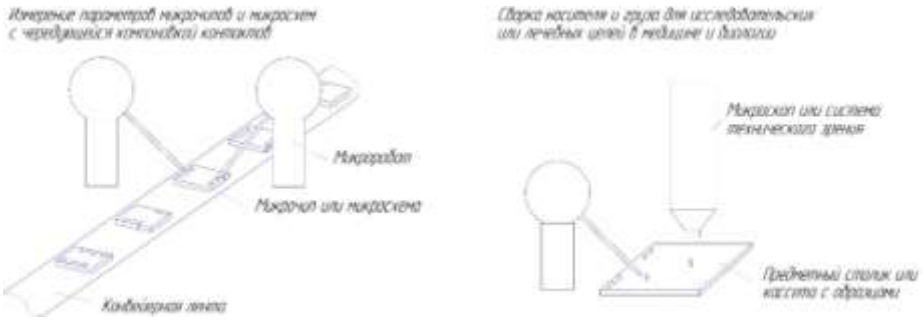


Рис. 8. Технологические схемы возможного применения микроробота

Система управления микроробота

Система управления микророботом устроена следующим образом. Управляющие сигналы и сигналы с датчиков обрабатываются с помощью ПК. Сигналы управления конвертируются в гармонические импульсы генераторами 1,2,3, усиливаются и подаются на электроды пьезотрубки. Для поддержания резонанса используется свободная группа электродов. В работе система использует прямой пьезоэффект. Для контроля положения рабочего органа микроробота используются две дублирующие друг друга системы. Система измерения угла поворота шара по трем координатам и система технического зрения. Блок – схема системы управления робота по трем координатам показана на рис. 9.

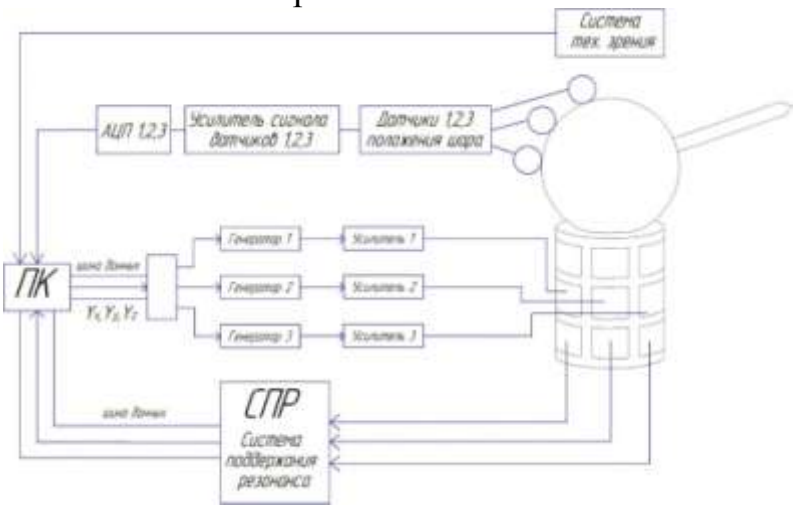


Рис. 9. Блок-схема системы управления робота по трем координатам

Для управления микророботом предлагается использовать импульсный режим, заключающийся в подаче серии гармонических напряжений с определенной скважностью, рис. 9. Такой способ управления удобен, поскольку параметры (частота и амплитуда) управляющего сигнала постоянно корректируются системой поддержания резонанса и обратной связи по положению. Использование импульсного типа управления позволяет избежать вышеперечисленных сложностей и своевременно вносить коррективы в управляющий сигнал, рис. 10.

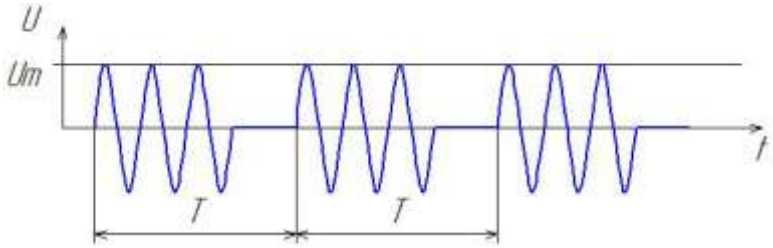


Рис. 10. Форма управляющего сигнала

Для определения параметров системы управления необходимо найти параметры переходных процессов объекта управления – шара. Для этого можно воспользоваться аналитическим вариантом расчета постоянных времени для пьезокерамического привода, предложенных в статье [6]. Данные, полученные в статье, хорошо согласуются с примерами экспериментальных исследований многих авторов.

В публикации предложен метод измерения характеристик ультразвуковых моторов, таких как максимальный крутящий момент, зависимость момент/скорость и коэффициент трения на контактной поверхности, в котором крутящий момент рассчитывается исходя из переходных процессов. Подъем кривой (рис. 11 а), который характеризует переходный процесс изменения скорости вращения ротора ωр вскоре после включения двигателя, определяет нагрузочную характеристику, в то время как падение кривой, характеризует остановку ротора. Время нарастания угловой скорости намного больше времени падения угловой скорости. Это объясняется тем, что коэффициенты трения в этих случаях отличаются.

В этом методе для завершения измерений требуется короткий промежуток времени - время переходного процесса.

Для большинства уз. пьезоэлектрических двигателей (в том числе и для нашего случая) характерна нагрузочная кривая зависимости момента от скорости вращения

$$\omega = \omega_{\max}(1 - \frac{M}{M_{\max}})$$

График, построенный по данной формуле, представлен на рисунке 11 *б*. Необходимо отметить, что на низких оборотах эта зависимость имеет неустойчивый характер.

Расчет зависимости скорости вращения шара от амплитуды колебаний пьезотрубки основывается на взаимодействии пары трения. Рассмотрим шар, взаимодействующий с пьезоактюатором – трубкой. Они представляют собой пару трения сталь – пьезокерамика. Используя формулы автора статьи для роторного пьезодвигателя, получаем выражение для вычисления момента пьезопривода со сферическим шарниром:

$$M = \mu 2Nr,$$

где μ - коэффициент трения движения, N - реакция опоры, r – радиус статора.

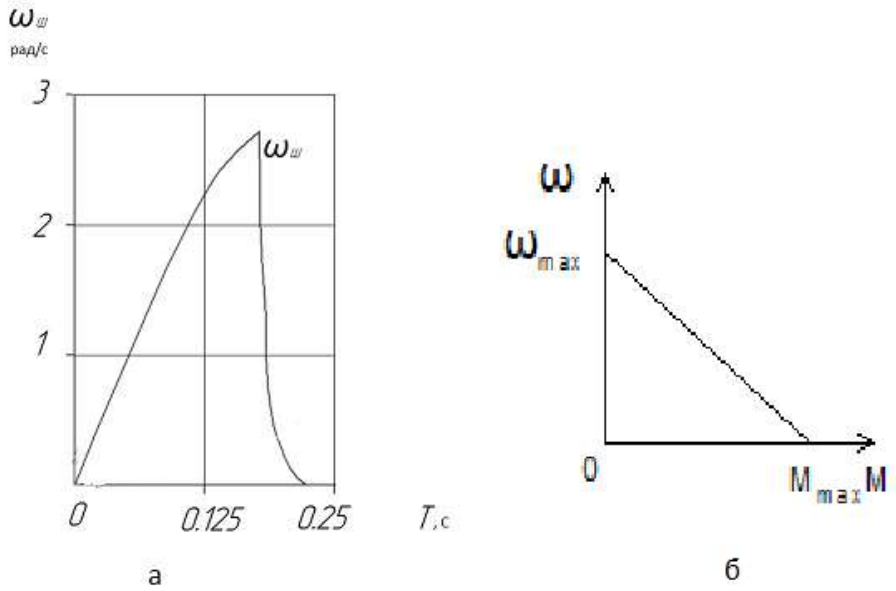


Рис. 11. а) Переходная характеристика ультразвукового двигателя, б) Типичная зависимость момента от скорости

В нашем случае

$$N = \frac{m_{Ш} g}{2 \sin \alpha} = \frac{m_{Ш} gR}{2\sqrt{R^2 - R_2^{\,2}}}.$$

Следовательно,

$$M = \mu \frac{mgRr}{\sqrt{R^2 - R_2^{\,2}}},$$

где μ – коэффициент трения, m – масса шара, R – радиус шара, а R_2 – внутренний радиус трубки.

Поскольку, при разгоне и торможении мы имеем различные условия взаимодействия тела и поверхности трения, требуется определить коэффициент трения для каждого случая.

В режиме торможения используется значение табличного коэффициента сухого трения движения для пары керамика-сталь. Движущий момент рассчитывается по формуле:

$$M_T = \mu \frac{mgRr}{\sqrt{R^2 - r^2}},$$

где μ – коэффициент трения, m – масса шара, R – радиус шара, а r – внутренний радиус пьезотрубки. Выражение для постоянной времени выглядит следующим образом:

$$\tau_T = \frac{J\omega_{шо}}{M_T},$$

где J – момент инерции шара, а $\omega_{шо}$ – скорость насыщения, измеренная при испытаниях микроробота.

В режиме разгона требуется скорректировать коэффициент трения, поскольку движение шара происходит по колеблющейся на резонансной частоте поверхности. Для этого используем методику, описанную в работе [4]. В нашем случае направление вектора колебаний трубки совпадает с направлением движения шара. Поскольку скорость шара много меньше амплитуды колебаний трубки (в эксперименте 34кГц), то в течение каждого периода колебаний поверхность трубки будет обгонять поверхность шара и увлекать его за собой посредством силы трения. В остальную часть периода поверхность либо не обгоняет тело, либо движется в сторону, противоположную его движению. Относительная скорость (скорость шара относительно рассматриваемой точки поверхности колеблющейся пьезотрубки) в этот период будет больше нуля, а сила трения отрицательна. Поэтому тело, скользящее по колеблющейся поверхности не только теряет энергию на преодоление силы трения, но и приобретает некоторую кинетическую энергию. Следовательно, энергия, затрачиваемая на преодоление трения по колеблющейся поверхности, будет меньше, чем при отсутствии колебаний. В указанной статье [4] приведен и обоснован расчет коэффициента уменьшения коэффициента трения. Сила трения при УЗ колебаниях уменьшится в n раз:

$$n = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega \dot{\xi}}{\dot{x}_0},$$

где $\dot{x}_0$ -линейная скорость шара, ω - угловая частота колебаний пьезотрубки, $\dot{\xi}$ - колебательная скорость.

Таким оборазом, коэффициент трения при разгоне:

$$\mu_P = \frac{\mu}{n}.$$

Следовательно, для данного случая движущий момент рассчитывается по формуле:

$$M_P = \mu_P \frac{m_ш g R R_2}{\sqrt{R^2 - R_2^{\,2}}},$$

где μр – коэффициент трения при разгоне, $m_ш$ – масса шара, R – радиус шара, а R_2 – внутренний радиус трубки.

Выражение для постоянной времени выглядит следующим образом:

$$\tau_P = \frac{J \omega_{шо}}{M_P},$$

где J – момент инерции шара, а $\omega_{шо}$ – скорость насыщения, полученная измерениями параметров прототипа робота.

$$J = \frac{2}{5} m_ш r^2 = \frac{2}{5} \cdot 0.087 \cdot 0.02^2 = 0.00001392 \cdot (кг \cdot м^2)$$

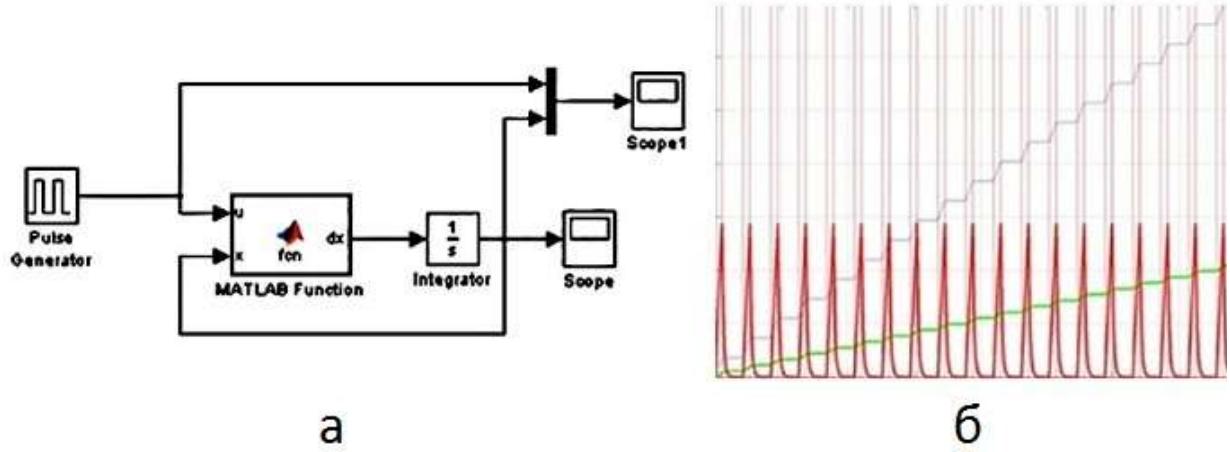
При помощи полученных формул были найдены значения постоянных времени для двух переходных процессов – разгона и торможения: $\tau_T = 1.52 \cdot 10^{-3} c$ и $\tau_P = 0.019 c$.

Данные характеристики позволяют произвести расчеты для системы управления микророботом и оценить ее параметры.

Для используемого импульсного режима управления период следования импульсов не должен быть меньше суммы $\tau_T + \tau_P$, а частота “модуляции” (подачи управляющих импульсов):

$$f_m^{\max} = \frac{1}{(\tau_T + \tau_P)} \le 48.2 c^{-1} = 48 Гц.$$

В среде Simulink была создана и исследована модель работы системы управления микророботом в импульсном режиме рис. 12 а.



а б

Рис. 12. а) Модель работы системы управления в импульсном режиме в среде Simulink
б) Зависимость выходного угла от подаваемых импульсов для периода 0.21 с при коэффициенте заполнения импульса 25

С помощью созданной модели были проанализированы управляющие сигналы с различными коэффициентом заполнения импульса и периодом импульса. В блоке MATLAB Function описан алгоритм работы системы управления микророботом. [5]

После ряда экспериментов для управления микророботом был выбран импульсный режим, заключающийся в подаче «пакетов» гармонических напряжений с определенной скважностью. Модель системы управления управляющего сигнала постоянно микроробота корректируются системой поддержания резонанса и обратной связи по положению шара. В этом случае при движении шара постоянно чередуются режимы разгона и торможения. Использование импульсного типа управления позволяет избежать указанных выше сложностей и своевременно вносить коррективы в управляющий сигнал.

По полученным данным были построены графики зависимости скорости и угла поворота вокруг оси z от времени, рис. 12 б. Где синяя

линия – результат идеального моделирования импульсов, а зеленая линия – реальные условия работы.

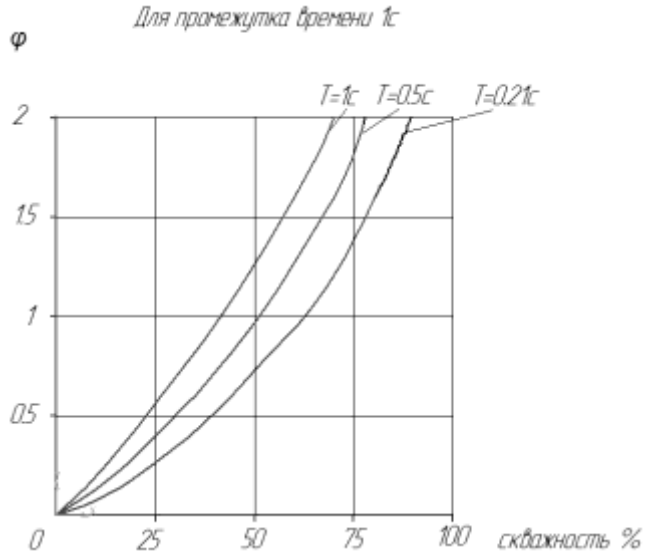


Рис. 13. Сравнительный график

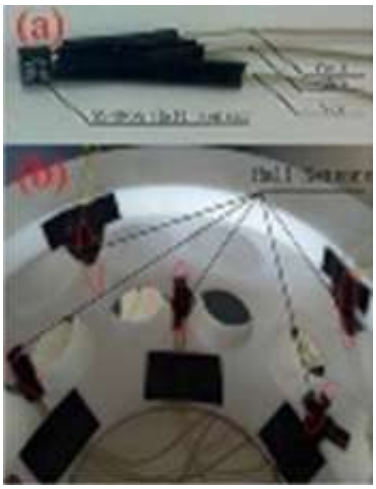


Рис. 14. Датчик положения сферы, состоящий из массива датчиков Холла

Анализируя полученные графики, можно сказать, что, при одинаковом периоде T при большей скважности мы получаем больший угол поворота за счет времени разгона большего, чем время торможения. Но, в то же время, не на всех режимах можно получить стабильную работу. Например, при скважности более 80% шар не успевает тормозить после разгона, и характер движения становится непрерывным, а выход на заданную координату происходит с большой погрешностью.

Анализ данных (рис. 13) показал что, при одинаковом периоде импульсов при большей скважности мы получаем больший угол поворота и, соответственно, меньшую точность позиционирования. При наименьшей скважности имеем минимальное значение угла поворота и высокую точность позиционирования, однако, в этом случае теряем в скорости вращения. Оба режима работы являются полезными, поскольку робот применяется для переноса объектов на достаточно большие расстояния по отношению к зоне непосредственной обработки этих объектов. Следовательно, при транспортировке мы можем использовать скоростной режим с большой погрешностью по перемещению, а при перемещениях непосредственно в рабочей зоне выходить на режим максимальной точности, теряя в скоростных характеристиках.

Определение положения сферы в пространстве бесконтактным методом

В пьезоэлектрических актюаторах, использующих сферический шарнир и работающих на силе трения существует проблема определения положения выходного звена-сферы в пространстве. Поскольку данный тип

актюатора работает с использованием силы трения, нанесение на сферу дополнительного отражающего покрытия для использования оптических датчиков может как отрицательно сказаться на характеристиках пары трения актюатор-сфера, так и на точности датчика – велика вероятность быстрого износа или загрязнения отражающих элементов. Использование контактных типов датчиков (например, роликовые датчики угла поворота) не обеспечивает требуемую точность из-за работы привода на высоких резонансных частотах, проскальзывания, работе по загрязненной поверхности сферы. Ролики датчиков негативно влияют на работу привода, добавляя реакцию от силы прижима и дополнительную силу трения. Наличие соприкасающегося с шаром постороннего предмета также может влиять на собственные частоты шарнира, изменяя частоту резонанса.

Избежать описанных проблем позволяют бесконтактные датчики положения сферы, основанные на эффекте Холла.

Одной из разновидностей такого типа датчика является устройство,

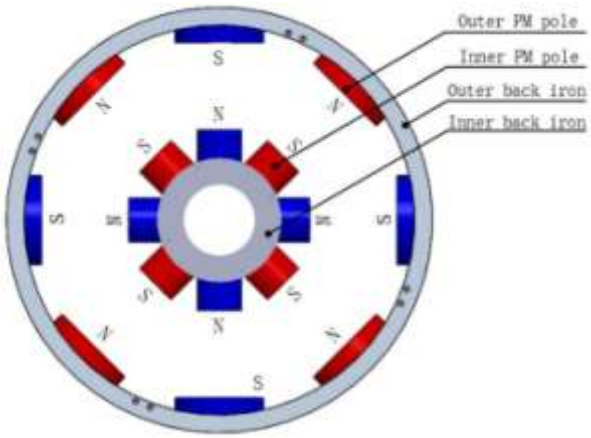


Рис. 15. Расположение постоянных магнитов внутри ротора сферического двигателя

Рис. 16. Оптический бесконтактный датчик перемещения сферы

представленное на рисунке 14. [7] В данном типе датчика сфера со встроенными в нее постоянными магнитами вращается внутри статичной сферы с массивом датчиков Холла, рис. 15.

Данный тип датчика хотя и является бесконтактным, сильно ограничивает рабочую зону микроробота.

Следующий тип датчика более компактен. И, хотя является оптическим, не требует дополнительной доработки выходного звена-сферы. Для определения перемещения сферы на каждую координату выделен отдельный оптический сенсор, состоящий из передатчика, приемника и микросхемы-драйвера (аналогичная система используется в компьютерной мыши). [8]

На рисунке 16 изображена сравнительная компоновка массива датчиков Холла и оптических датчиков. Датчик располагается в

непосредственной близости от сферы но не касается ее, рис. 15. Такой тип датчика менее восприимчив к чистоте поверхности, чем оптические датчики дальнего действия.

Проблема использования такого типа датчика в микророботе сводится к требованию к поверхности сферы.

Поверхность не должна быть отражающей, что осложняет использование полированного металлического шара, который обеспечивает наилучшие характеристики по точности робота. Данный тип датчика не является абсолютным энкодером. Данный факт не позволяет использовать его как единственный датчик для определения положения рабочего органа микроробота.

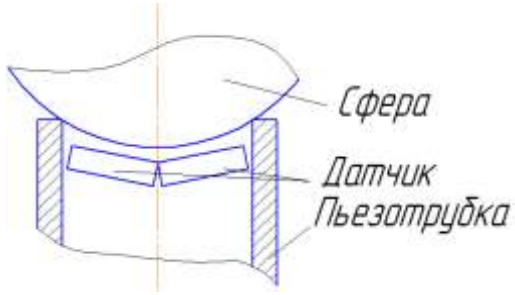


Рис 17. Расположение датчика в актюаторе микроробота

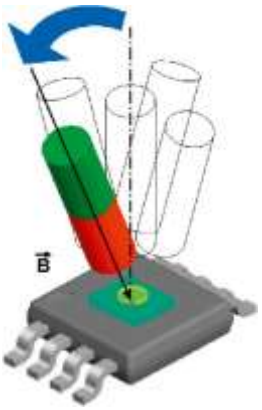


Рис. 18. Бесконтактный датчик Холла

В качестве дополнительного датчика положения и скорости предлагается разместить оптическую часть внутри актюатора-трубки при помощи световодов, рис. 17.

Третий тип датчика – датчик Холла с вынесенным за пределы сферы постоянным магнитом, рис. 18. [9]

В случае микроробота предлагается установить магнит на место противовеса рабочего органа.

Данный датчик ограничен по зоне срабатывания, но возможно расширение зоны действия за счет установки нескольких датчиков. Большим преимуществом данного типа датчика является абсолютность измерений координат. Такой тип датчиков обеспечивает достаточную точность измерений для обеспечения выхода рабочего звена в расчетную точку без

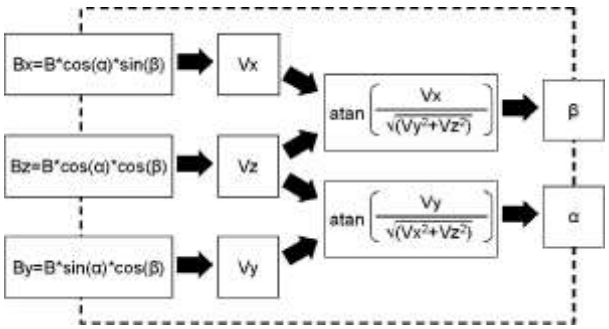


Рис. 19. Блок схема части СУ, отвечающая за пересчет импульсов датчика Холла в значения углового перемещения сферы

применения дополнительных средств. На рис. 19 представлена модель модуля системы управления, использующей такой тип датчика.

Для обеспечения наибольшей рабочей зоны в данный момент ведутся исследования возможности работы серийных двухкоординатных датчиков Холла типа Sentron 2SA-10 SO-8 с намагниченной сферой. [10].

Расчет параметров скорости и погрешности позиционирования для различных значений скважности позволил выявить численные значения для различных режимов работы микроробота (сервисный, рабочий). Обзор существующих разработок в сфере датчиков положения сферического шарнира подтвердил наличие удовлетворяющих техническим требованиям системы с пьезоприводом-трубкой, работающим на резонансной частоте. Проведенные расчеты, эксперименты и математическое моделирование систем микроробота подтвердили соответствие его ппараметров требованиям, предъявляемым системами, в которых планируется использование микроробота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедько П.Ю. Микроробот на базе сферического шарнира с пьезокерамическим приводом// ISSN 2223-0807 Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й международной научно-практической конференции 14-15 июня 2012 года, СПБ Изд-во Политехнического университета, 2012. С 242-251.
2. Гедько П.Ю., Смирнов А.Б., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю. Исследование пьезоэлектрических актюаторов микроробота// Изв. Вузов. Приборостроение Т. 55, № 6, 2012. С. 7 – 15.
3. Nakamura K., Kurosawa M., Kurebayashi H. An Estimation of Load Ultrasonic Motor by Measuring Transient Characteristics of an Responses // IEEE Trans. Ultruson. Ferroelec. Freq. Contr. vol. 38, №5, Sept. 1991.
4. Мицкевич А.М. Движение тела по тангенциально колеблющейся поверхности с учетом трения // Акустический журнал. Т.13, вып. 3, 1967. С 411 – 416.
5. Борисевич А.В., Гедько П.Ю., Смирнов А.Б. Микроробот на базе сферического шарнира с пьезоприводом// Научно-технические ведомости СПбГПУ, №4, 2010. С 116-124.
6. Kenjiro Takemura, Takashi Maeno: Numerical Analyses on Multi-DOF Ultrasonic Motor - Development of Analysis Method and Results// ICRA, page 2387-2392. IEEE, *(*2002*)*
7. Liang Yan, Bo Zhu, Zongxia Jiao, Chin-Yin Chen, I-Ming Chen An Orientation Measurement Method Based on Hall-effect Sensors for Permanent Magnet Spherical Actuators with 3D Magnet Array// http://www.nature.com/articles/srep06756, 13.04.2016
8. Lee, K.-M. and D. Zhou, "A Real-Time Optical Sensor for Simultaneous Measurement of 3-DOF Motions," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics.* September 2004, vol. 9 no. 3, pp. 499-507.
9. Sensors, Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and

Practical Applications// 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-69030-6, p.18
10. 2SA-10 Integrated 2-Axis Hall Sensor// http://www.gmw.com/magnetic_sensors/sentron/2sa/documents/2SA10.pdf 13.04.2016

P.J.Gedko

SPHERICAL-JOINT BASED MICROROBOT WITH ASYMMETRIC TUBE-SHAPE PIEZOCERAMIC ACTUATOR

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the microrobots based on a spherical joint driven by piezoelectric tube-shape actuator. Shown the geometry of sphere moving by the edge of piezotube with trajectories. Calculated the main parameters of control system. Listed the types of sensors for spherical joint actuators.

Key words: microrobot, spherical joint, piezoceramic actuator, resonance frequency, spherical sensor.

REFERENCES

[1] P.J. Gedko. Spherical-joint based microrobot with piezoceramic actuator // ISSN 2223-0807 Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materialy` 2-i` mezhdunarodnoi` nauchno-prakticheskoi` konferentcii 14-15 iiunia 2012 goda, SPB Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2012. Pp. 242-251.

[2] P.J. Gedko , A.B. Smirnov, S.I. Pugachov, E.J. Rytov Issledovania piezoelectricheskih actuatorov microrobota // Izv. Vuzov. Priborostroenie Vol. 55, № 6, 2012. Pp. 7 – 15.

[3] Nakamura K., Kurosawa M., Kurebayashi H. An Estimation of Load Ultrasonic Motor by Measuring Transient Characteristics of an Responses // IEEE Trans. Ultruson. Ferroelec. Freq. Contr. vol. 38, №5, Sept. 1991.

[4] A.M. Mitskevich. Dvizhenie tela po tangenzialno koleblusheisya poverhnosti s uchetom sil treniya// Acusticheskii zurnal. Vol.13, vup. 3, 1967. Pp. 411 – 416.

[5] A.B. Borysevich, P.J. Gedko, A.B. Smirnov Microrobot na baze spheric heskogo sharnyra s piezoprivodom// Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGPU, №4, 2010. Pp. 116-124.

[6] Kenjiro Takemura, Takashi Maeno: Numerical Analyses on Multi-DOF Ultrasonic Motor - Development of Analysis Method and Results// ICRA, pp. 2387-2392. IEEE, (2002)

[7] Liang Yan, Bo Zhu, Zongxia Jiao, Chin-Yin Chen, I-Ming Chen An Orientation Measurement Method Based on Hall-effect Sensors for Permanent Magnet Spherical Actuators with 3D Magnet Array// http://www.nature.com/articles/srep06756, 13.04.2016

[8] Lee, K.-M. and D. Zhou, "A Real-Time Optical Sensor for Simultaneous Measurement of 3-DOF Motions," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics.* September 2004, vol. 9 no. 3, pp. 499-507.
[9] Sensors, Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications// 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-69030-6, p.18
[10] 2SA-10 Integrated 2-Axis Hall Sensor// http://www.gmw.com/magnetic_sensors/sentron/2sa/documents/2SA10.pdf 13.04.2016

УДК 621.865.8+62-503.5; DOI 10.1872/MMF-2016-59

В.В. Дяшкин-Титов[1], Н.С. Воробьева[1], С.Е. Терехов[2]

АЛГОРИТМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАХВАТА МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА

[1]Виктор Владимирович Дяшкин-Титов, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: c_43.52.00@mail.ru

[1]Наталья Сергеевна Воробьёва, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: vorobva@inbox.ru.

[2]Станислав Евгеньевич Терехов, магистрант
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442) 24-84-94, E-mail: stan.terekhov@gmail.com

Аннотация

В работе представлено решение задачи позиционирования управляемого трехстепенного захватного устройства манипулятора последовательно-параллельной структуры. Алгоритм решения приведен для двух вариантов конструкций захватного устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-38-00485 мол_а, 16-48-340395р_а.

Ключевые слова: манипулятор - трипод, параллельная структура, позиционирование, захватное устройство.

Новейшие механизмы параллельной структуры представлены широким разнообразием их исполнения. Высокая производительность, надежность и точность реализации программных движений обуславливают применение таких механизмов в машиностроении, приборостроении, пищевой и химической промышленности и т.д. [1,2]. Кроме того, конструкция этих манипуляторов совмещает функции металлоконструкции и приводных механизмов, что существенно снижает

общую массу машины. Самыми популярными среди зарубежных производителей механизмов параллельной структуры являются фирмы: Fanuc, Omron из Японии, ABB (Швеция), Adept (США), Festo (Германия). Механизмы этих производителей характеризуются числом степеней свободы от 2 до 6, грузоподъемностью до 15 кг; точностью до 0,02 мм [3].

Одними из наиболее трудоемких технологических процессов в химической и пищевой промышленности являются сортировка и упаковка различных изделий. Наиболее известным для подобного использования роботом параллельной структуры является робот Delta (рис. 1). Этот робот имеет высокую скорость исполнения и точность позиционирования. Его работу можно синхронизировать с несколькими конвейерами для выполнения операций по захвату и переносу изделий.

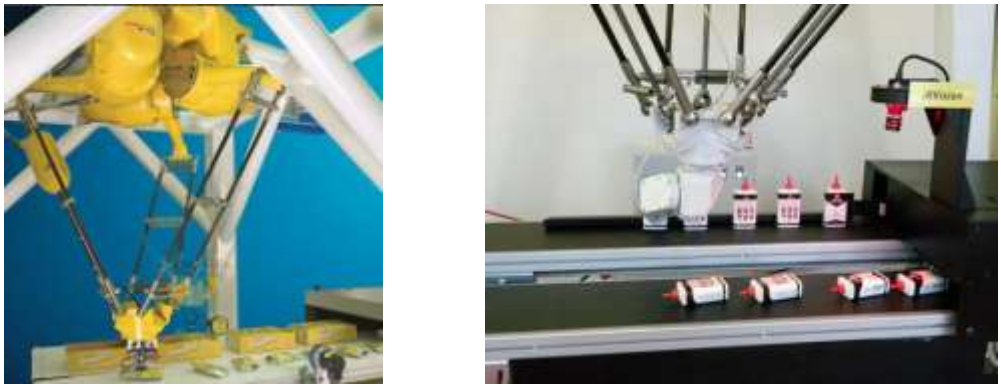


Рис. 1. Применение робота Delta в пищевой и химической промышленностях

В нашей стране исследования и разработки манипуляторов параллельной структуры ведутся в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (рис. 2).

Рис. 2. Макет манипулятора параллельной структуры (ИМАШ РАН)

Недостатками манипуляторов параллельной структуры являются ограниченность рабочей зоны, относительно небольшая

манипулятивность, а также сложность методов синтеза программных движений и систем управления перемещением рабочего органа [4].

На рис. 3 представлена кинематическая схема исследуемого манипулятора последовательно - параллельной структуры. Манипулятор состоит из пространственного подвижного трехстержневого механизма, изготовленного в виде треугольной пирамиды со звеньями переменной длины l_1, l_2, l_3. Одни концы этих звеньев соединяются посредством двухподвижных шарниров, расположенных на неподвижном основании *ABC*, а другие концы связаны между собой в точке *M* специальным сферическим шарнирным узлом [5]. На сферическом шарнирном узле смонтировано управляемое захватное устройство, состоящее из трех звеньев последовательно соединенных друг с другом кинематическими парами V класса. В качестве исполнительных звеньев предполагается использование звеньев с электрическим приводом.

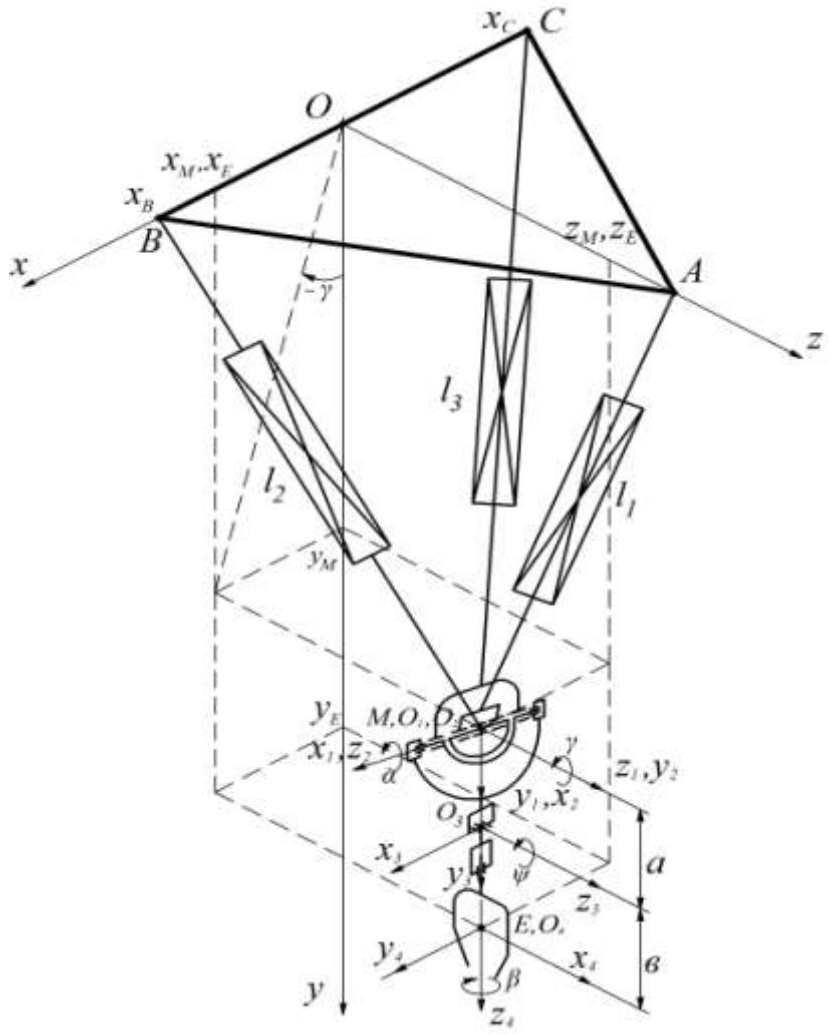


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора последовательно - параллельной структуры

Основным отличием, от выше представленных манипуляторов параллельной структуры, является соединение подвижных частей исполнительных приводов (актуаторов) с помощью сферического шарнира, обеспечивающего пересечение геометрических осей этих приводов в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов от внешних нагрузок.

Предлагаемая схема позволяет упростить механическую часть конструкции, обеспечить ориентацию технологического оборудования в требуемой зоне обслуживания, унифицировать систему управления.

Рассматривается также схема манипулятора, в котором расстояние (O_2O_3 = a) от точки подвеса до оси шарнира O_3z_3 равно нулю. В этом случае оси трех вращательных пар пересекаются в точке, и локальные движения конечной точки цепи происходят по поверхности. Однако за счет региональных движений точки подвеса захвата, обеспечивается ее объемное движение.

Обобщенными координатами манипулятора являются длины звеньев $l_k(t)$, $k = 1 \div 3$ и углы относительных поворотов звеньев захватного устройства $\alpha(t)$, $\psi(t)$, $\beta(t)$, которые могут изменяться в пределах - углы $\alpha(t)$ и $\psi(t)$ от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$, угол $\beta(t)$ 0 до 2π .Значения этих углов определяют параметры манипулятивности манипулятора и его ориентирующие возможности. Причем, в разных точках зоны обслуживания, в силу особенностей кинематической структуры манипулятора и конструктивных параметров кинематических пар, параметры манипулятивности разные.

Одно из основных требований, определяющих работоспособность манипуляторов, является обеспечение подхода рабочего органа манипулятора к требуемым точкам объекта обслуживания с заданной ориентацией рабочего органа [6]. Таким образом, необходимо разработать методику оценки функциональных возможностей манипулятора в зоне обслуживания.

Для определения пространственного положения захвата манипулятора вводятся пять систем координат (рис. 3) – абсолютная $Oxyz$, связанная с неподвижным основанием, а с каждымм звеном захвата манипулятора связаны подвижные системы координат $O_ix_iy_iz_i$ (i = 1, 2, …, 4). Ось O_iz_i каждого звена направлена по оси относительного вращения этого звена.

Задача позиционирования манипулятора состоит в определении обобщенных координат манипулятора l_k, ($k = 1 \div 3$), α, ψ, β при заданном программном положении рабочего органа, определяемого координатами (x_E, y_E, z_E) его центра в неподвижной системе $Oxyz$ и направляющими косинусами a_{pq} последней системы координат $O_4x_4y_4z_4$ также относительно неподвижной системы координат [7-9]. В такой постановке необходимо решить прямую задачу о положениях манипулятора, т. е. определить декартовые координаты $x_M(t)$, $y_M(t)$, $z_M(t)$ точки подвеса $M(O_1, O_2)$ в

абсолютной системе отсчета *Oxyz* [10] и обратную задачу о конфигурации захватного устройства – определение углов α, ψ.

Положение рабочего звена определяется произведением матриц перехода $\mathbf{M_{i-1,i}}$, описывающих положение *i* звена относительно (*i*-1) [11].

$$\mathbf{M_{04}} = \mathbf{M_{01}} \times \mathbf{M_{12}} \times \mathbf{M_{23}} \times \mathbf{M_{34}}. \tag{1}$$

Связь между координатами точек в *i* и в (*i*-1) системах координат осуществляется последовательным выполнением операций с помощью матриц перехода $\mathbf{M_{i-1,i}}$

$$\begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos(x_{i-1}, x_i) & \cos(x_{i-1}, y_i) & \cos(x_{i-1}, z_i) & x_{i-1,i} \\ \cos(y_{i-1}, x_i) & \cos(y_{i-1}, y_i) & \cos(y_{i-1}, z_i) & y_{i-1,i} \\ \cos(z_{i-1}, x_i) & \cos(z_{i-1}, y_i) & \cos(z_{i-1}, z_i) & z_{i-1,i} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $\mathbf{x_i} = \left[x_i, y_i, z_i\right]^{\mathrm{T}}$ - вектор-столбец координат точки в *i* подвижной системе координат; $\mathbf{x_{i-1,i}} = \left[x_{i-1,i}, y_{i-1,i}, z_{i-1,i}\right]^{\mathrm{T}}$ - вектор-столбец координат начала *i* системы в (*i*-1) системе координат; верхняя левая подматрица размером [3x3], образованная направляющими косинусами, определяет поворот *i* системы относительно (*i*-1).

Это матричное преобразование имеет вид

$$\mathbf{x_{i-1}} = \mathbf{M_{i-1,i}}\, \mathbf{x_i} \tag{3}$$

Поворот системы осей $O_1x_1y_1z_1$ вокруг оси O_1z_1 на угол γ характеризуется матрицей

$$\mathbf{M_{01}} = \left[\begin{array}{ccc|c} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & x_M \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & y_M \\ 0 & 0 & 1 & z_M \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right], \tag{4}$$

Угол γ определяется через обобщенные координаты руки манипулятора (рис. 3)

$$\gamma = -\operatorname{arc\,tg}\frac{x_M}{y_M}. \tag{5}$$

Матрица поворота системы осей $O_2x_2y_2z_2$ вокруг оси O_2z_2 на угол α, обеспечивающая совпадение осей O_1x_1 и O_2z_2 имеет вид

$$\mathbf{M_{12}} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]. \tag{6}$$

Поворот системы осей $O_3x_3y_3z_3$ вокруг оси O_3z_3 на угол ψ, обеспечивающий параллельность осей O_2y_2 и O_3z_3 характеризуется матрицей

$$\mathbf{M_{23}} = \left[\begin{array}{ccc|c} \sin\psi & \cos\psi & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]. \qquad (7)$$

Матрица поворота системы осей $O_4x_4y_4z_4$ вокруг оси O_4z_4 на угол β, обеспечивающая совпадение осей O_3y_3 и O_4z_4 имеет вид

$$\mathbf{M_{34}} = \left[\begin{array}{ccc|c} \sin\beta & \cos\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ \cos\beta & -\sin\beta & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]. \qquad (8)$$

При последовательном переходе по цепочке шарнирно-соединенных звеньев от системы координат $O_4x_4y_4z_4$ к нулевой $Oxyz$, применяя формулу (1) и выражения (4, 6-8) получаем

$$\mathbf{M_{04}} = \left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & x_M - b\sin\psi\cos\gamma - (a + b\cos\psi)\cos\alpha\sin\gamma \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & y_M - b\sin\psi\sin\gamma + (a + b\cos\psi)\cos\alpha\cos\gamma \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & z_M + (a + b\cos\psi)\sin\alpha \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right], \qquad (9)$$

где $a_{11} = \sin\beta(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\cos\alpha\sin\psi) + \sin\gamma\cos\beta\sin\alpha;$

$a_{12} = \cos\beta(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\cos\alpha\sin\psi) - \sin\gamma\sin\beta\sin\alpha;$

$a_{13} = -\cos\gamma\sin\psi - \sin\gamma\cos\psi\cos\alpha;$

$a_{21} = \sin\beta(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\cos\alpha\sin\psi) - \cos\gamma\cos\beta\sin\alpha;$

$a_{22} = \cos\beta(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\cos\alpha\sin\psi) + \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha;$

$a_{23} = \cos\gamma\cos\psi\cos\alpha - \sin\gamma\sin\psi;\ a_{31} = \cos\beta\cos\alpha + \sin\psi\sin\beta\sin\alpha;$

$a_{32} = \cos\beta\sin\psi\sin\alpha - \cos\alpha\sin\beta;\ a_{33} = \cos\psi\sin\alpha$ - направляющие косинусы, определяющие ориентацию в пространстве рабочего органа захватного устройства.

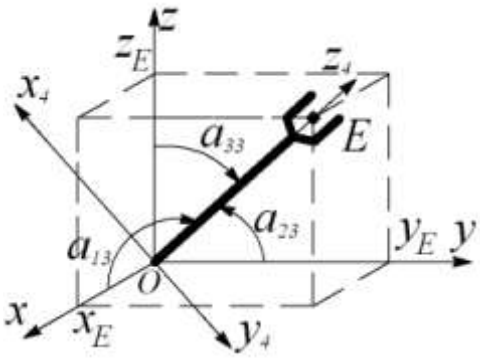


Рис. 4. Ориентация захватного устройства манипулятора в пространстве

Из выражений для членов, составляющих матрицы (9) следует, что, координаты точки E центра захвата и его ориентация не зависят от значения угла β. Закон изменения угла β собственного вращения является функцией, выполняемого технологического процесса.

Таким образом, для определения конфигурации манипулятора с управляемым захватным устройством необходимо из системы пяти уравнений

$$\begin{cases} x_E = x_M + ba_{13} - a\cos\alpha\sin\gamma \\ y_E = y_M + ba_{23} + a\cos\alpha\cos\gamma \\ z_E = z_M + ba_{33} + a\sin\alpha \\ a_{33} = \cos\psi\sin\alpha \\ a_{23} = \cos\gamma\cos\psi\cos\alpha - \sin\gamma\sin\psi \end{cases}, \qquad (10)$$

при известных задаваемых значениях координат (x_E, y_E, z_E) точки E захвата и направляющих косинусов, определить шесть неизвестных x_M, y_M, z_M, γ, α, ψ.

Для захватного устройства, у которого оси трех вращательных пар пересекаются в одной точке (a = 0, рис. 3), из системы уравнений (10) определяются координаты (x_M, y_M, z_M) точки M подвеса. Так как $a_{13}^2 + a_{23}^2 + a_{33}^2 = 1$, должно выполняться равенство

$$(x_E - x_M)^2 + (y_E - y_M)^2 + (z_E - z_M)^2 = b^2. \qquad (11)$$

Из решения уравнений связи [12] для механизма манипулятора находим его обобщенные координаты $l_k, (k = 1 \div 3)$ и угол γ (5). Совместное решение уравнений 4 и 5 системы (10) позволяет определить углы ψ и α

$$\psi_{1,2} = \arcsin(-a_{23}\sin\gamma \pm a_{13}\cos\gamma) \text{ и } \alpha = \arcsin\frac{a_{33}}{\cos\psi}. \qquad (12)$$

Выбор корня для ψ осуществляется сравнением координат x_E и x_M. Если $x_E > x_M$, то угол ψ<0, если $x_E < x_M$, то угол ψ>0, при $x_E = x_M$, ψ = 0. Значение для угла α определяется сравнением координат z_E и z_M. При $z_E > z_M$, α > 0, а для $z_E < z_M$, α < 0, при $z_E = z_M$, α = 0. Таким образом,

конфигурация $l_k, (k=1\div3)$, α, ψ манипулятора (рис. 3) полностью определена.

Для схемы захватного устройства с непересекающимися осями (рис. 3) можно предложить следующий алгоритм определения конфигурации манипулятора.

1. Задаемся углом γ с учетом условий: γ > 0, если $x_E < 0$, γ < 0, если $x_E > 0$ и γ = 0, если $x_E = 0$. В первом приближении можно принять $\gamma = \operatorname{arc\,tg}\dfrac{-x_E}{y_E}$. Из уравнений (12) определяем углы ψ и α, а из первых трех уравнений системы (10) находим координаты (x_M, y_M, z_M) точки *M*. Эти координаты должны удовлетворять уравнению

$$(x_E - x_M)^2 + (y_E - y_M)^2 + (z_E - z_M)^2 = \left(a + b\cos\psi\right)^2.$$

Используя, найденные значения (x_M, y_M, z_M) из уравнений связи [12] для механизма манипулятора находим его обобщенные координаты $l_k^*, (k=1\div3)$ и угол γ^* (5).

2. Найденное значение угла γ^* принимается за новое начальное значение, и расчет повторяется в последовательности, изложенной в пункте 1, до тех пор, пока $\left|\gamma_{i+1}^* - \gamma_i^*\right| = \varepsilon$. Здесь ε > 0 выбранная точность вычисления. Результаты последних вычислений и определяют искомую конфигурацию $l_k, (k=1\div3)$, α, ψ манипулятора (рис. 3).

Предложенная схема манипулятора - трипода с дополнительным механизмом захватного устройства с тремя степенями подвижности позволяет обеспечить необходимые параметры манипулятивности манипулятора при переводе его из начального положения в заданное конечное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин В.Л., Подзоров П.В., Слепцов В.В. Обрабатывающее оборудование на основе механизмов параллельной кинематики. – М.: Машиностроение, 2006.
2. Бушуев В.В., Хольшев И.Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении // СТИН. - 2001. - №1. – С. 3-8.
3. Рыбак Л.А., Гриненко Г.П. Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления коммерциализации // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2013. - №7(25). - С. 32-39.
4. Глазунов В.А, Колискор А.Ш, Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991, 95 с.
5. Герасун, В.М. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования / В.М. Герасун, В.И. Пындак, И.А.

Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2012. №44. – 24 с.
6. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. и др. Манипуляционные системы роботов. Под общ. ред. А.И. Корендясева. - М.: Машиностроение, 1989. - 472 с. ил.
7. Герасун В.М., Жога В.В., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора - трипода с поворотным основанием // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. - № 6. - С. 21-26.
8. I. Nesmiyanov. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, V. Skakunov, S. Terekhov, N. Vorob'eva, V. Dyashkin-Titov, Fares Ali Hussein Al-hadsha // Communications in Computer and Information Science.- Springer International Publishing Switzerland 2015: CIT&DS 2015, CCIS 535, pp. 392-404.
9. V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmianov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev,V. Dyashkin-Titov, N. Vorobieva. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland.- Volume 22, 2014, pp. 463-471.
10. Герасун, В.М. Кинематическое исследование манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: 2012. – С. 251–258.
11. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. ред. С.М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, Кн. 1. - 2006. – 383 с.
12. Жога В.В., Герасун В.М., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В. Динамический синтез оптимальных программных движений манипулятора-трипода // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2015. - №2. – С. 85-92.

V.V. Dyashkin-Titov[1], N.S. Vorob'eva[1], S.E. Terekhov[2]

THE ALGORITHM OF POSITIONING THE GRIPPER OF A MANIPULATOR-TRIPOD

[1]Volgograd state agrarian university, Russia.
[2]Volgograd state technical university, Russia.

Abstract

The paper presents the solution to the problem of positioning managed gripper with three degrees of mobility manipulator series-parallel structure.The solution algorithm is given for two design options of the gripper.

The study was financially supported by the RFBR on the basis of scientific projects № 16-38-00485 мол_а, 16-48-340395р_а.

Key words: manipulator-tripod, parallel structure, positioning, gripping.

REFERENCES

[1] Afonin V.L., Podzorov P.V., Slepcov V.V. Obrabatyvajushhee oborudovanie na osnove mehanizmov parallel'noj kinematiki (Processing equipment on the basis of mechanisms of parallel kinematics). – M.: Mashinostroenie, 2006.

[2] Bushuev V.V., Hol'shev I.G. Mehanizmy parallel'noj struktury v mashinostroenii (The mechanisms of parallel structure in mechanical engineering)// STIN. - 2001, no.1,pp. 3-8.

[3] Rybak L.A., Grinenko G.P. Innovacionnoe obrabatyvajushhee oborudovanie na baze parallel'nyh struktur: perspektivy i napravlenija kommercializacii (Innovative processing equipment on the basis of parallel structures: prospects and directions of commercialization) // Naukoemkietehnologii v mashinostroenii, 2013,no. 7(25), pp. 32-39.

[4] Glazunov V.A, Koliskor A.Sh, Krajnev A.F. Prostranstvennye mehanizmy parallel'noj struktury (Spatial mechanisms of parallel structure). M.: Nauka, 1991, p. 95.

[5] Gerasun, V.M. Manipuljatory dlja mobil'nyh robotov. Koncepcii i principy proektirovanija(Manipulators for mobile robots. The concept and design principles)/ V.M. Gerasun, V.I. Pyndak, I.A. Nesmijanov, V.V. Djashkin-Titov, V.E. Pavlovskij // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2012, no. 44, p. 24.

[6] Korendjasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I., et al., Manipuljacionnye sistemy robotov (Robots' manipulation systems). Pod obshh.red. A.I.Korendjaseva. - M.: Mashinostroenie, 1989, p. 427.

[7] Gerasun V.M., Zhoga V.V., Nesmijanov I.A., Vorob'eva N.S., Djashkin-Titov V.V. Issledovanie optimal'nyh konfiguracij manipuljatora - tripoda s povorotnym osnovaniem (A study of optimal configurations of a tripod-manipulator with swivel base)// Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie, 2013, no. 6, pp. 21-26.

[8] I. Nesmiyanov. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, V. Skakunov, S. Terekhov,N. Vorob'eva, V. Dyashkin-Titov, Fares Ali Hussein Al-hadsha // Communications in Computer and Information Science.- Springer International Publishing Switzerland 2015: CIT&DS 2015, CCIS 535, pp. 392-404.

[9] V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmianov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev,V. Dyashkin-Titov, N. Vorobieva. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland.- Vol. 22, 2014, pp. 463-471.

[10] Gerasun, V.M. Kinematicheskoe issledovanie manipuljatora-tripoda (Kinematic research of a manipulator-tripod) / V.M. Gerasun, V.V. Zhoga, I.A. Nesmijanov, N.S. Vorob'eva, V.V. Djashkin-Titov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materialy 2-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – SPb.: 2012. – pp. 251–258.

[11] Teoreticheskie osnovy robototehniki (Theoretical basis of robotics). V 2 kn. / A.I. Korendjasev, B.L. Salamandra, L.I. Tyves; otv.red. S.M. Kaplunov; In-t mashinovedenijaim. A.A. Blagonravova RAN. – M.: Nauka, Vol. 1, 2006, p. 383.

[12] Zhoga V.V., Gerasun V.M., Nesmijanov I.A., Vorob'eva N.S., Djashkin-Titov V.V. Dinamicheskij sintez optimal'nyh programmnyh dvizhenij manipuljatora-tripoda(Dynamic creation of the tripod – manipulator optimum program movement)// Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, 2015, no. 2, pp. 85-92.

УДК 621.01; DOI 10.1872/MMF-2016-60

В.Л.Жавнер[1], О.Н.Мацко[2]

ПРУЖИННЫЕ ПРИВОДЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

[1]Виктор Леонидович Жавнер, д.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул.Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 552-96-86
Эл.почта: vjavner@outlook.com

[2]Мацко Ольга Николаевна, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул.Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 552-96-86
Эл.почта: onmatsko@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены вопросы снижения энергопотребления в пружинных приводах с рекуперацией энергии с использованием нелинейных пружинных аккумуляторов, в которых обеспечена полная или частичная разгрузка направляющих от массы каретки с рабочим органом. Показаны возможности обеспечения самофиксации привода в крайних положениях без применения управляемых фиксаторов. Определены потери на трение в элементах нелинейного пружинного аккумулятора.

Ключевые слова: пружинный привод, линейный и нелинейный пружинные аккумуляторы, диссипативные потери, время перемещения, максимальные отклонения от среднего положения, жёсткость пружин.

В работе рассматриваются **пружинные приводы для возвратно-поступательных перемещений**, получившие в технической литературе три наименования: «резонансный привод» [2, 3, 10], «привод с пружинными аккумуляторами» [8, 9] или «рекуперативный привод» [7]. Отличительной особенностью этих приводов является применение пружинных аккумуляторов с использованием одной или двух пружин [5,7].

Поскольку почти все динамические и кинематические характеристики данного класса приводов определяются свойствами пружинных аккумуляторов, а применяемые для компенсации диссипативных потерь пневмоприводы или электроприводы потребляют очень незначительную энергию извне по сравнению с потенциальной энергией пружинных

аккумуляторов, правильнее такие приводы считать пружинными с рекуперацией энергии.

Подробное описание схем пружинных приводов с использованием пневматических приводов для компенсации диссипативных потерь приведено в работе [7].

Достоинствами пружинных приводов данного типа являются:

– существенное снижение затрат энергии на порядок и даже более [7, 8, 9];

– хорошие динамические режимы, обеспечивающие плавный разгон и торможение.

Цель данной работы – исследование пружинных аккумуляторов на базе одной пружины растяжения или сжатия для дальнейшего снижения затрат энергии пружинных приводов.

Пружинный аккумулятор с пружиной сжатия, изображенный на рисунке 1, является колебательной системой с подвижной массой и с заданной амплитудой колебаний, в которой время перемещения из одного крайнего положения в другое зависит от жёсткости пружины и конструктивных параметров.

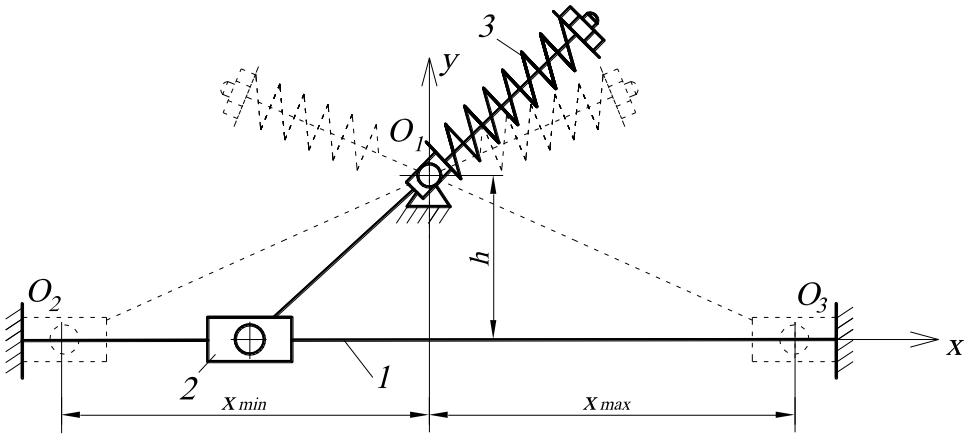


Рис. 1

Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой на базе пружины сжатия: *1* – направляющая; *2* – каретка (ползун); *3* – пружина

Традиционно пружинные аккумуляторы имеет в среднем положении нулевое усилие пружины и нулевой запас потенциальной энергии, что обеспечивает минимальные потери на трение в шарнирах и минимальные размеры аккумулятора. Диссипативные потери при этом определяются потерями: на внутреннее трение в пружине, в шарнирных соединениях пружины с основанием, между кареткой и направляющими.

Предлагается уменьшить диссипативные потери за счёт предварительного натяжения пружины, уравновешивающего, полностью или частично нагрузку на направляющие от массы каретки с рабочим органом.

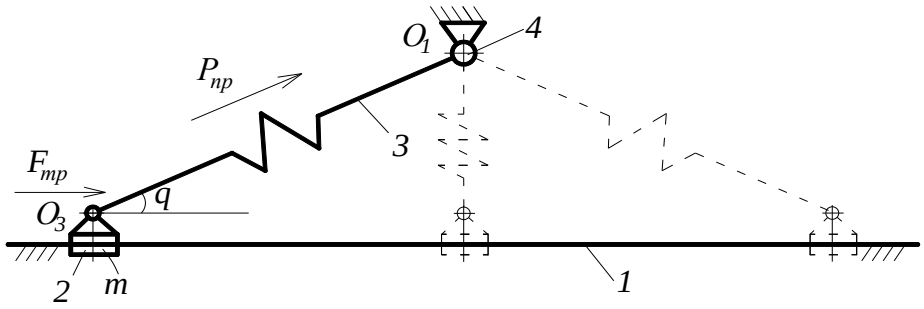


Рис. 2

Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой на базе пружины растяжения: *1* – направляющая; *2* – каретка (ползун); *3* – пружина

На рисунке 2 представлена схема пружинного аккумулятора с пружиной растяжения, имеющей предварительное растяжение, усилие от которого в среднем положении частично или полностью уравновешивает нагрузку на направляющие от массы каретки с рабочим органом или с грузом.

Примем следующие обозначения: L_0 – начальная длина пружины растяжения или сжатия; h – минимальное расстояние между осью крепления пружины и направляющими; $x_{\max}, x_{\min}$ – максимальное и минимальное отклонения каретки от среднего положения; x – текущее отклонение каретки от среднего положения.

В данной работе рассматриваются пружинные приводы, в которых в среднем положении пружина растянута на величину h, а на направляющую в среднем положении действует усилие от пружины, равное:

$$P_{\text{пр}} = h \cdot c$$

Суммарная нагрузка на направляющую в этом случае равна разности между усилием пружины и нагрузки от массы каретки с рабочим органом.

При проектировании пружинных приводов рассматриваемого класса исходными данными являются параметры рабочей операции:

1. Масса перемещаемого груза, в которую входят масса каретки и масса перемещаемого груза или рабочего органа.
2. Время перемещениям между точками позиционирования.

Основными характеристиками пружинного привода являются:

1. Жесткость пружины c.
2. Максимальное усилие пружины $P_{\text{пр}}^{\max}$.
3. Конструктивный параметр h.
4. Максимальная потенциальная энергия $\Pi_{\max}$.
5. Минимальная потенциальная энергия $\Pi_{\min}$.

Максимальная потенциальная энергия аккумулятора:

$$П_{\max} = \frac{1}{2} c \cdot (x_{\max}^2 + h^2) \quad (1)$$

Текущее значение потенциальной энергии определяется из следующего выражения:

$$П_T = \frac{1}{2} c \cdot (x^2 + h^2) \quad (2)$$

Пренебрегая диссипативными потерями, определим время перемещения между крайними положениями каретки, которые являются точками остановки, поскольку в них скорость обращается в нуль.

Такое одномерное финитное движение является колебательным, и время прохождения между крайними точками определяется из решения интегрального уравнения [11]:

$$t = \sqrt{\frac{m}{2}} \cdot \int_{x_{\max}}^{x_{\min}} \frac{dx}{\sqrt{П_{\max} - П_T}} \quad (3)$$

Решение интегрального уравнения (3) с учетом выражений (1) и (2) позволяет определить время перемещения каретки между крайними положениями, которое равно половине периода колебаний:

$$t = \pi \sqrt{\frac{m}{c}}$$

При заданных времени перемещения t и массе m требуемая жёсткость пружины равна:

$$c = \frac{\pi^2}{t^2} \cdot m$$

Назовем размер h, равный размеру величины предварительного натяжения, обеспечивающего нулевую нагрузку на направляющую в среднем положении, оптимальным и обозначим:

$$h_0 = \frac{mg}{c} \quad (4)$$

Тогда на всем протяжении направляющей нагрузка на нее от каретки равна нулю, а максимальное усилие пружины определяется выражением:

$$P_{\text{пр}} = \sqrt{x^2 + h_0^2} \cdot c,$$

При этом максимальное усилие пружины вдоль направляющей равно:

$$P_{\text{пр}}^x = c \cdot x$$

Минимальная потенциальная энергия пружины будет при $x = 0$, что позволит определить максимальную скорость каретки, которая равна максимальной скорости каретки с линейным пружинным аккумулятором с такой же жесткостью пружины, т. е.

$$\dot{x}_{\max} = \frac{\pi}{t} \cdot x_{\max}.$$

При заданных времени перемещения t и массе m требуемая жёсткость пружины равна $c = \frac{\pi^2}{t^2} \cdot m$, что совпадает с результатом, полученным в работах [1,6] для линейного аккумулятора с пружиной сжатия.

С учетом (4) в этом случае настройки получим:

$$h_0 = \frac{t^2 \cdot g}{\pi^2} \approx t^2,$$

т. е. высота h_0 численно равна квадрату полупериода колебаний.

Диссипативные потери в пружинном аккумуляторе данного типа определяются тремя составляющими [7]:

$$A = A_1 + A_2 + A_3,$$

где A – суммарная работа привода на преодоление всех диссипативных сил; A_1 – работа привода на преодоление внутреннего трения в пружинах; A_2 – работа привода на преодоление трения в шарнирных соединениях пружины; A_3 – работа привода на преодоление сил трения в направляющих ползуна.

Потери энергии на преодоление силы сопротивления, определяемой внутренним трением в пружине, равны [4]:

$$A_1 = 0{,}5 \cdot \psi \cdot c\,(x_{max}^2 + h^2),$$

где ψ – коэффициент рассеяния, который можно брать в пределах 0,01–0,015.

Потери энергии на трение в шарнирных соединениях пружины определяются из выражения [7]:

$$A_2 = 2c \cdot f \cdot d \cdot h(\ln(x_{max} + \sqrt{x_{max}^2 + h^2})),$$

где d – диаметр оси шарнирного соединения; f – коэффициент трения в шарнирных соединениях пружины.

Потери энергии в направляющих при $h = h_0$ равны нулю, т.е. $A_3 = 0$.

Сравнительный анализ результатов расчетов показывает, что диссипативные потери в пружинном приводе с полным уравновешиванием массы уменьшаются даже по сравнению с линейным пружинным аккумулятором в 5 раз, при этом повышается срок службы направляющих элементов, так как их износ определяется только трением холостого хода.

Система компенсации диссипативных потерь с использованием пневмоцилиндра, образующего кулисный механизм с поступательной парой, представлена на рисунке 3. Работа системы основана на теореме Эри, в соответствии с которой при подаче компенсационно-силового импульса в начале периода время перемещения на заданное расстояние уменьшается, в конце периода – увеличивается, а при подаче двух

идентичных импульсов в начале и в конце периода время перемещения определяется полупериодом колебательной системы (рисунок 4).

Наличие пневмораспределителя *7* позволяет включать пневмоцилиндр *3* в любой точке вдоль направляющей *1*. Фиксация каретки *2* в крайних положениях обеспечивается тем, что усилие пружины в крайнем положении каретки меньше или равно усилию пневмоцилиндра, что позволяет отказаться от управляемых фиксаторов.

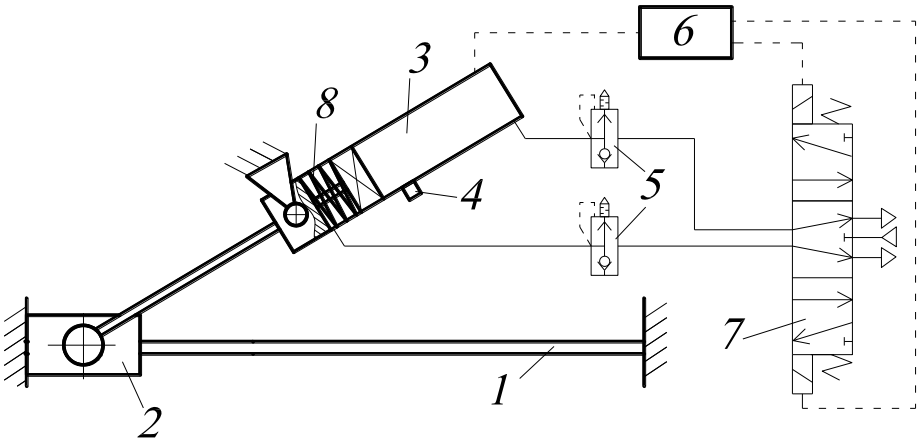


Рис. 3

Система компенсации диссипативных сил с пневмоцилиндром, образующим кулисный механизм с поступательной парой:
1 – направляющая; *2* – каретка (ползун); *3* – пневмоцилиндр; *4* – датчик положения; *5* – клапан быстрого выхлопа; *6* – блок управления; *7* – пневмораспределитель 5/3; *8* – пружина сжатия

С этой точки зрения, учитывая малую величину диссипативных потерь, целесообразно подавать импульс в конце хода или в начале и в конце хода. При этом отключение пневмоцилиндра происходит по сигналу от датчика *4*, а включение на фиксацию – по времени, определяемому через разницу между фактическим временем перемещения и временем срабатывания пневмораспределителя.

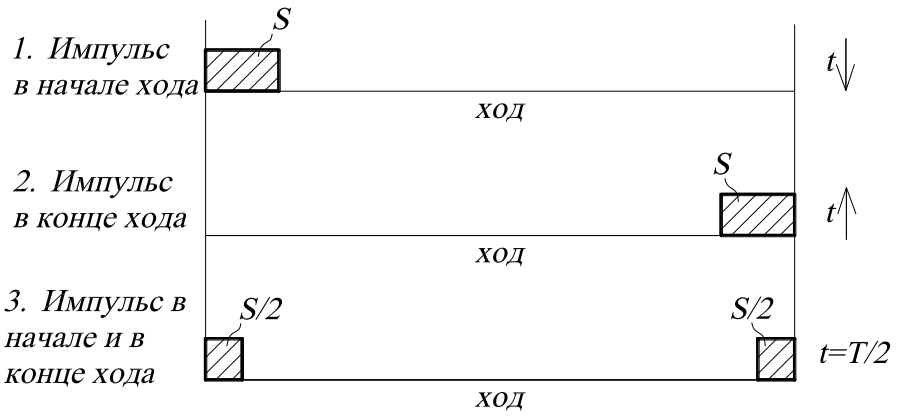


Рис. 4

Графическое изображение теоремы Эри

На основании полученных выше результатов можно сделать **следующие выводы**:

1. При предварительном растяжении пружины на величину h получаем консервативный линейный осциллятор с частотой колебания не зависящей от амплитуды.
2. При оптимальном размере h_0 происходит полная разгрузка направляющих от массовой нагрузки каретки с переносимым изделием.
3. Чем выше быстродействие привода, тем меньше размер h_0.
4. При размере h меньше h_0 происходит неполная разгрузка направляющих, но постоянная по всей длине.
5. При размере h больше h_0 нагрузка от пружины на направляющие больше нагрузки от массы каретки с грузом.
6. Преимуществом такого привода является уменьшение поперечных размеров направляющих.
7. Диссипативные потери привода при оптимальном размере h_0 уменьшаются более чем в 5 раз. Аналогичным образом уменьшается и необходимая мощность двигателя для компенсации диссипативных потерь.
8. Предложена система компенсации диссипативных потерь для привода с пружинами сжатия, одновременно обеспечивающая фиксацию каретки в крайних положениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.L. Zhavner and O.N. Matsko. Spring drives for reciprocal motion, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, No.1, pp.1-5. Allerton Press Inc., 2016.
2. Акинфиев Т.С. Резонансные манипуляционные системы с электроприводом // Машиноведение. – 1983. – № 6. – С. 18–23.
3. Акинфиев Т.С., Пожаринский А.А. Динамические свойства резонансной манипуляционной системы, с односторонним пневмоприводом // Машиноведение. – 1985. – № 2. – С. 24–30.
4. Вульфсон И.И. Колебания в машинах: учеб. пособие для втузов / И.И. Вульфсон; – 2-е изд., доп.; СПбГУТД. – СПб., 2006.-260 с.
5. Жавнер В.Л., Мацко О.Н. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений с пневматическими компенсаторами диссипативных сил // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2014. – С. 513-521.
6. Жавнер В.Л., Мацко О.Н. Пружинные приводы для возвратно-поступательных перемещений // Проблемы машиностроения и надежности машин. - М: Наука. – 2016. – № 1. - С. 3-7.
7. Жавнер В.Л., Жавнер М.В., Мацко О.Н.. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений. – Saarbrucken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2014. – 90 с.

8. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. и др. Манипуляционные системы роботов. – М.: Машиностроение. – 1989. – С. 279–286.
9. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники: В 2 кн. – М.: Наука. – 2006. – 376 с.
10. Крупенин В.Л., Акинфеев Т.С., Бабицкий В.И. Манипуляционные системы резонансного типа // Машиноведение. 1982. – № 1. – С. 2–8.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. – М.: Наука, 1969. Кн. 1. Механика. Электродинамика. – 271 с.

V.L.Zhavner[1], O.N.Matsko[2]

SPRING RECUPERATIVE DRIVES WITH ENERGY RECOVERY FOR RECIPROCATING MOTION

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract

The article is devoted to reduction of power consumption in process equipment recuperative drives by installing non-linear spring accumulators providing complete or partial guideways unloading. Possibility of drive self-locking in end positions with no need in controlled fixing mechanisms are shown. Friction loss in non-linear spring accumulator components are evaluated.

Key words: spring drive, linear spring accumulator, non-linear spring accumulator, dissipative loss, travel time, maximum offset from the mid position, spring stiffness

REFERENCES

[1] V.L. Zhavner and O.N. Matsko. Spring drives for reciprocal motion, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, No.1, pp.1-5. Allerton Press Inc., 2016.
[2] Akinfiev T.S. Resonance manipulative systems with electric drives // Mashinovedenie. 1983. No. 6. pp.18-23.
[3] Akinfiev T.S., Pozharinskiy A.A. Dynamic properties of resonance manipulative systems with single-sided pneumatic drive // Mashinovedenie. 1985. No.2. pp.24-30.
[4] Vulfson I.I. Oscillations in macines: Teaching aids for technical colleges/ 2-nd edition, added; SPbGUTD. SPb. 2006. 260 p.
[5] Zhavner V.L., Matsko O.N. Recuperative drives for cyclic movement with pneumatic dissipative forces compensators // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. St.-Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta. 2014. pp.513-521.

[6] Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring drives for reciprocal motion // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, 2016, No. 1, pp.3-7.
[7] Zhavner V.L., Zhavner M.V., Matsko O.N. Recuperative drives for cyclic movement. – Saarbrucken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2014. 90 p.
[8] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. et al. Manipulative robotic systems. Moscow. Mashinostroenie. 1989. pp.279-286.
[9] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Theoretical basis for robotic technology. In 2 books. Moscow . Nauka. 2006. 376 p.
[10] Krupenin V.L., Akinfiev T.S., Babitskiy V.I. Manipulative systems of resonance type // Mashinovedenie. 1982. No. 1. pp.2-8.
[11] Landau L.D., Lifshits E.M. Short course of theoretic physics. Moscow. Nauka. 1969. Vol.1. Mechanics. Electrodynamics. 271 p.

УДК 004.3:681.5; DOI 10.1872/MMF-2016-61

В.В. Жога, В.Н. Скакунов, С.Е. Терехов

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РОБОТА С ШАГАЮЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Жога Виктор Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442) 24-80-99, E-mail: zhoga@vstu.ru

Скакунов Владимир Николаевич, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442) 24-84-94, E-mail: svn_vstu@mail.ru

Терехов Станислав Евгеньевич, магистрант
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442) 24-84-94, E-mail: stan.terekhov@gmail.com

Аннотация

Рассматривается структура многопроцессорной информационно-управляющей системы управления приводами мобильного технологического робота с ортогональными движителями, разработана архитектура программного обеспечения бортового вычислительного комплекса. Реализованы унифицированные модули управления исполнительными линейными электроприводами шагающего робота и манипулятора и основные сенсорные системы очувствления робота.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-01-04577-а и № 16-38-00485 мол-а.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, манипулятор, распределенная система управления, сенсорные системы, супервизорное управление, техническое зрение.

Автономный мобильный робот, оснащённый соответствующим технологическим оборудованием, возможно применять при проведении разведывательных операции в недетерминированных средах, труднодоступных или же опасных для человека: в местах техногенных катастроф, при разборке завалов, в местах с повышенным радиационным фоном, при разминировании. Также их использование оправданно при

проведении боевых операций в качестве транспорта, систем заградительного огня, диверсионных операции; для проведения аварийно-восстановительных работ на объектах атомной энергетики, где возникает необходимость в обследовании состояния объектов и проведении монтажно-демонтажных работ [1]. Возможно использование таких мобильных роботов в технологических процессах сельскохозяйственного производства.

Конструкция робототехнической системы. На рис.1 изображена робототехническая система, состоящая из мобильного робота, оснащённого манипулятором – триподом с четырьмя поступательными приводами [2]. Робот состоит из верхнего корпуса 1, связанного механизмом поворота с нижним корпусом 2. С каждой из частей корпуса связаны две пары направляющих, изготовленные в виде шлицевых валов с шариковой гайкой LBST30 DD CL, с ходом 942 мм и 1042 мм, с приводами горизонтального перемещения. В качестве приводов горизонтального перемещения и привода поворота используются приводы изготовленные компанией «Maxon motors» (серводвигатели RTG060-004 и RTG060-100).

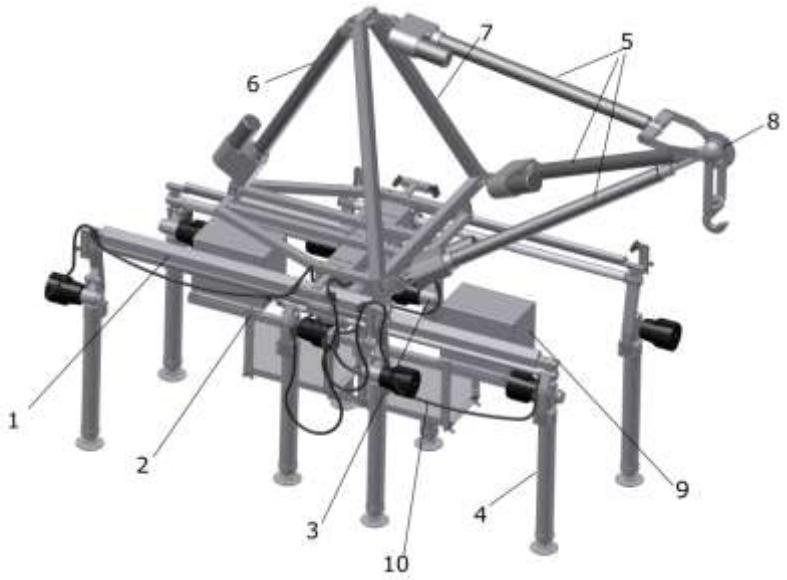


Рис. 1. Мобильный робот с установленным манипулятором

Каждый из приводов 3 включает в себя серводвигатель, планетарный редуктор, тормоз, датчик положения (энкодер HEDL9140, 500 имп/об). Крутящий момент – 4 Нм; угловая скорость – 425 об/мин. Максимальный момент на валу привода поворота - 34 Нм, угловая скорость на приводном валу - 17 об/мин. На концах штанг смонтированы приводы 4 вертикальной адаптации робота к опорной поверхности. В качестве привода используются актуаторы CAT33Hx400x4AG1F производства компании «SKF group». Мощность привода опорных стоек 87 Вт; скорость – 0,174 м/с; ход – 400 мм. Питание робота осуществляется от аккумуляторных батарей 10 (рис. 1) общей емкостью 55а/ч, напряжение силовой цепи 24 В.

Механизм манипулятора содержит три звена 5, концы которых закреплены с помощью специальных двухподвижных шарниров на поворотном основании 7. Противоположные концы звеньев соединены специальным шарнирным узлом 8, обеспечивающим пересечение геометрических осей этих звеньев в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов от внешних нагрузок. Для увеличения зоны обслуживания манипулятор – трипод устанавливается на основании 7, которое имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси за счёт изменения длины звена 6. Перемещаемый груз крепится на жестком подвесе, который с помощью цилиндрического шарнира прикреплен к узлу 8. В качестве исполнительных звеньев манипулятора, показанного на рис. 1, применены линейные звенья с приводом (актуаторы САНВ–21…1), состоящим из электродвигателя постоянного тока, самотормозящейся передачи - червячного редуктора и винтовой передачи. В состав робота входят бортовая информационно-управляющая система, аппаратура управления движением, аппаратура технического зрения, аппаратура передачи данных и команд управления, аппаратура навигации и ориентации, средства разведки и наблюдения, а также манипулятор.

Постановка задачи. Достоинства выбранной конструкции состоят в надежности механизмов, достаточности двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетической эффективности, обусловленной отсутствием затрат энергии на поддержание веса машины и более простых алгоритмах управления траекторией и законом движения опорной точки.

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, построена в форме уравнения Лагранжа 2-го рода [3]. Для упрощения дифференциальных уравнений, описывающих динамику манипулятора, реальный механизм заменяется динамически эквивалентным, содержащим три сосредоточенные массы [4]. Эти уравнения используются для синтеза управляющих сигналов системы управления.

Система управления должна обеспечивать перемещение робота в условиях недетерминированной динамической внешней среды, по жесткой и деформируемой поверхностям, по пересеченной местности, в производственных и жилых помещениях. Робот должен преодолевать пороги высотой до 400 мм, лестничные марши с углом наклона до 30° и высотой ступени до 200 мм. При этом необходимо обеспечивать устойчивое движение с сохранением заданного положения корпуса.

Структура системы управления шагающим роботом. Основные архитектурные особенности системы управления (позиция 9 на рис. 1) обусловлены механической конструкцией робототехнического комплекса, характером программных движений [5] и кругом решаемых задач, рассматриваемой робототехнической системы [6].

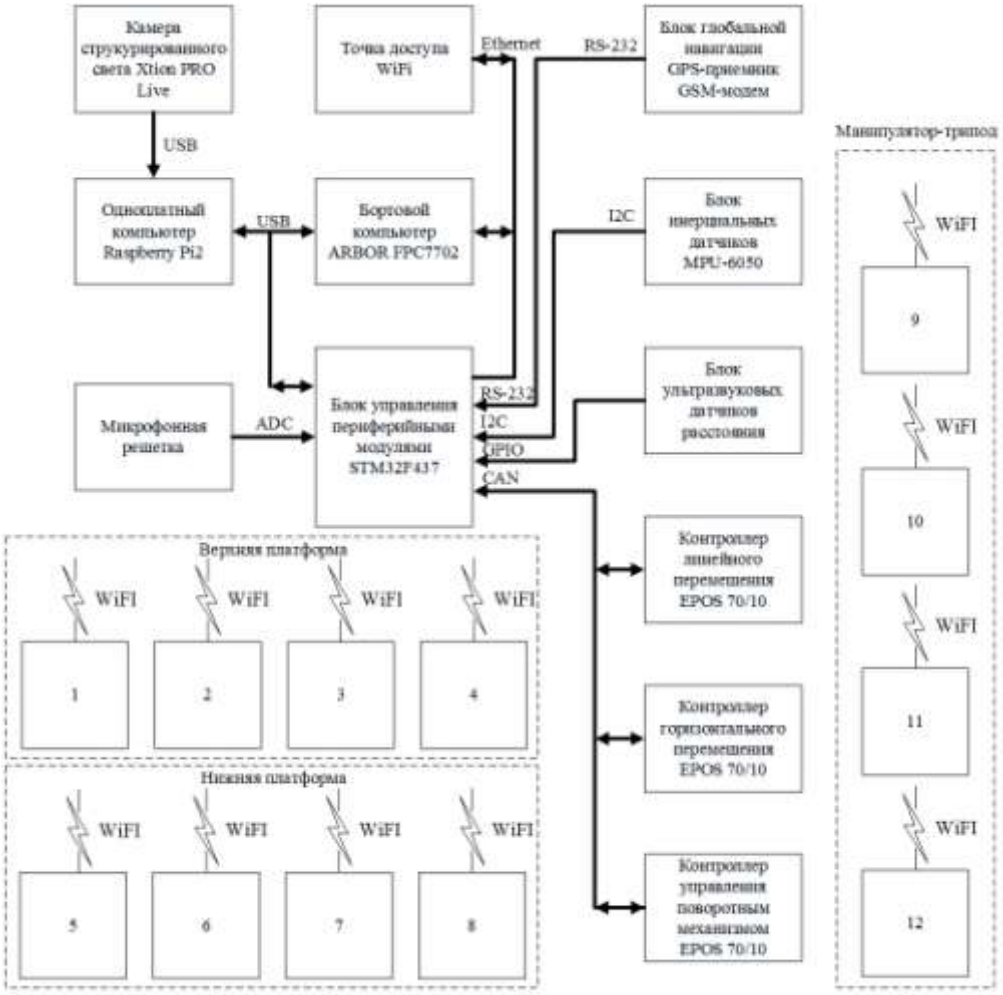


Рис. 2. Структура системы управления шагающим роботом

Структура системы управления, объединяющая отдельные элементы управления, сенсорные подсистемы и исполнительные механизмы, представляет собой многопроцессорную информационно-управляющую систему. Ввиду сложности задач, требующих значительных вычислительных ресурсов, для работы в реальном времени в автономном режиме и/или при дистанционном управлении роботом, функции управления и обработки информации от сенсорных подсистем распределены на двух уровнях. Обобщенная структура системы управления приведена на рис. 2.

Решение задач верхнего уровня – планирование поведения робота: построение маршрута передвижения робота, синтез программных движений подвижных звеньев робота и манипулятора, пространственная ориентация и ряд других обеспечивается разработанными программными средствами, установленными на бортовом промышленном компьютере ARBOR FRC7702. Функции сбора и предварительной обработки данных реализованы на двух одноплатных микрокомпьютерах. Компьютер Raspberry Pi2 используется для решения простейших задач в системе

технического зрения, а плата на контроллере STM32F437 выполняет фактически функции интеллектуального коммутатора шин, дешифратора команд центрального процессора и преобразования разнородной измерительной информации в стандартный цифровой формат.

Основные операции на нижнем уровне по управлению и контролю состояния исполнительными устройствами – движителями шагающего робота и приводами манипулятора выполняют унифицированные модули управления линейными актуаторами (блоки 1-12 на рис. 2), разработанные на основе 32-контроллеров STM32F100RB. Отдельные блоки управления связаны в многопроцессорной системе с помощью стандартных локальных шин и интерфейсов (рис. 2). Особенностью предложенной топологии локальных шин является широкое применение беспроводных каналов связи для организации обмена данными между периферийными и ведущим контроллерами. Помимо более высокой скорости передачи при наличии множества подвижных взаимосвязанных механических узлов беспроводные каналы повышают надежность обмена данными.

Управление исполнительными механизмами. Исполнительные механизмы технологического робота разделены на две группы. Первую составляют приводы CAT33Hx400x4AG1F вертикальных опор и линейные актуаторы CAHB-21, используемые в конструкции манипулятора, а вторую – серводвигатели RTG060-004 и RTG060-1, обеспечивающие горизонтальное перемещение и поворот платформ робота. Линейные актуаторы CAT33Hx400x4AG1F и CAHB-21 не имеют встроенных систем управления. Управление и контроль их состояния осуществляется по данным сигналов датчиков обратной связи, выполненных в виде многооборотных потенциометров (актуаторы CAHB-21) или двухканальных цифровых энкодеров (актуаторы CAT33Hx400x4AG1F).

Приводы горизонтального перемещения и поворота поставляются с программируемыми контроллерами положения EPOS2 70/10. Синхронизация и централизованное управление приводами осуществляется объединением котроллеров с помощью протокола EPOSopen. Контроллеры обеспечивают выполнение широкого набора функций управления двигателями постоянного тока, допускают подключение к ведущему процессору по стандартным интерфейсам USB и RS-232C или по сети CANopen. Конфигурирование контроллера осуществляется в среде EPOS Studio.

Сенсорная система. Сенсорная система состоит из двух основных компонент: одна жестко привязана к исполнительным устройствам, а вторая, выполняющая большую часть функций глобальной навигации и пространственной ориентации, связана с блоком управления периферийными модулями на контроллере STM32F437.

Сенсоры системы управления линейным актуатором подключены к унифицированному модулю, выполняющему все функции задания режима

и контроля состояния привода. Функциональная схема модуля показана на рис. 3. Модуль построен на основе 32-разрядного микроконтроллера STM32F100RB, включает полноценный мостовой драйвер VNH2SP30-E и минимальный набор схем обвязки. В модуле программно реализованы основные операции по обработке данных сенсорной системы и алгоритмы управления приводом: цифровые фильтры, вычислитель расстояния подвижной части актуатора до несущей поверхности, ПИД-регулятор, генератор ШИМ-сигналов, формирователь сигналов управления по заданной траектории перемещения штока актуатора. Элементы сенсорной системы соединены с платой модуля по стандартным схемам: ИК-датчик расстояния по интерфейсу SPI, УЗ-дальномер по одной из GPIO линий контроллера, датчик тока в разрыв выходной цепи мостового усилителя, а встроенный энкодер в зависимости от типа актуатора ко входу аналого-цифрового преобразователя или GPIO линии контроллера. Связь с центральным контроллером осуществляется с помощью WiFi-модема ESP 8266-12F. Модем подключается к порту UART микроконтроллера STM32F100RB.

Датчики расстояния предназначены для определения положения стопы вертикальной опоры с целью плавного торможения двигателя при касании с несущей поверхностью. В модуле применены два типа датчиков: ультразвуковой дальномер HC-SR04 и инфракрасный датчик расстояний GP2Y0A21YK0F. Функции концевого датчика вертикальной стойки выполняют датчик тока ACS712 и тактильный электромеханический датчик.

Рис. 3. Функциональная схема модуля управления линейным актуатором

Система технического зрения. Система технического зрения передает информацию, достаточную для построения маршрута движения в автономном режиме или при супервизорном управлении [7, 10].

Известны преимущества камер структурированного света, работающих по технологии PrimeSense [8]. В тоже время использование возможностей камер в сложных алгоритмах обработки изображений требует больших вычислительных ресурсов [9, 11, 12]. В связи с этим, в системе технического зрения робота используются два процессора обработки изображения. Одноплатный компьютер Raspberry Pi2 дает хорошие результаты при работе в детерминированной среде с заранее известным набором препятствий относительно простой формы [11, 13]. Для работы в недетерминированной окружающей среде во многих случаях оказываются достаточными возможности бортового промышленного компьютера ARBOR FPC 7702.

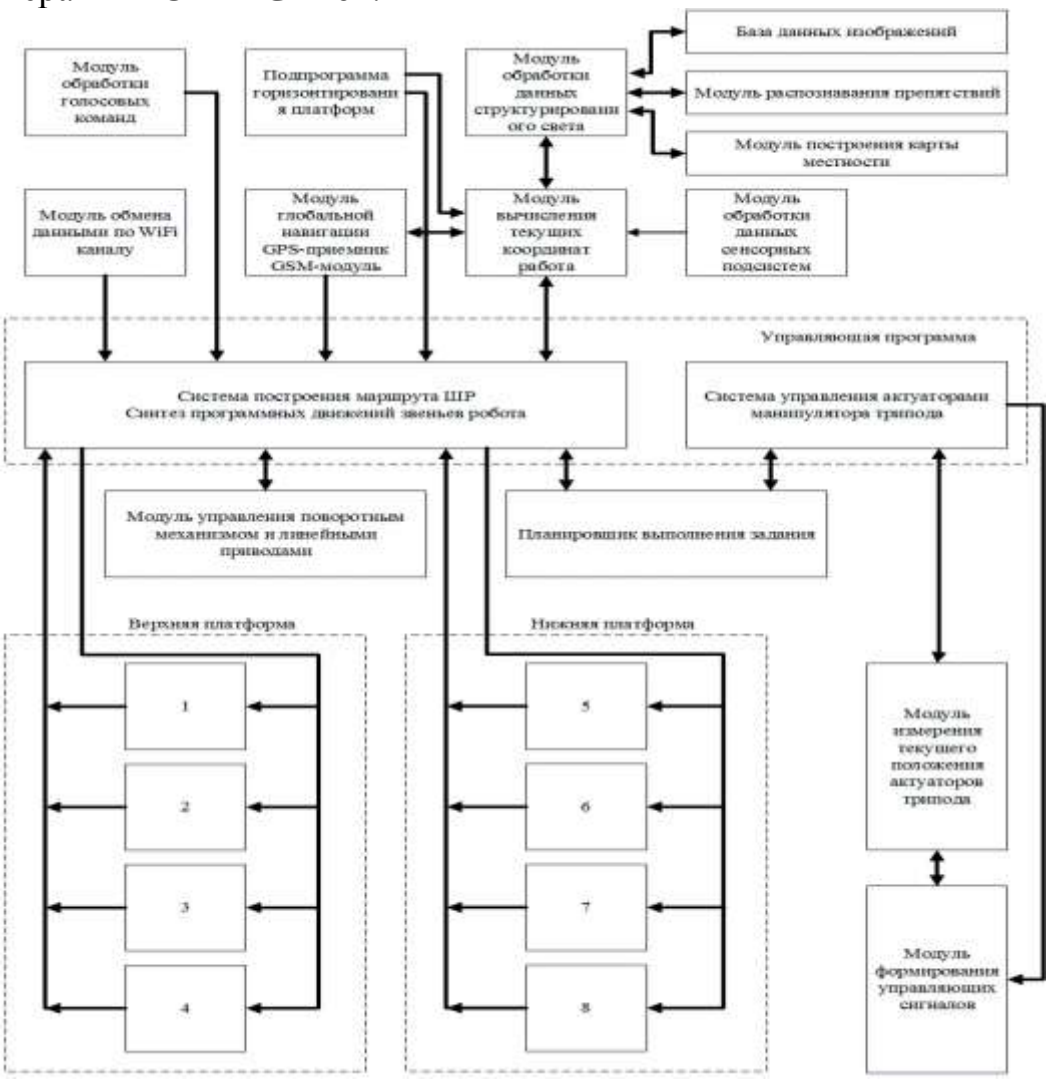


Рис.4. Архитектура программного обеспечения системы управления мобильным технологическим роботом

Система технического зрения построена на камере структурированного света ASUS Xtion PRO Live. На одноплатный компьютер Raspberry Pi2 устанавливается ОС Linux, дистрибутив Raspbian Jessie, драйверы и библиотеки Open NI2, а также надстройка над ОС – система ROS Indigo, предоставляющая решения для типичных робототехнических задач. Для работы с изображениями используется библиотека OpenCV. Стандартные библиотеки для работы с изображениями устанавливаются и на компьютере ARBOR FPC 7702. Разработанные алгоритмы построения карты местности и маршрута движения робота приведены в работах [11, 13].

Архитектура программного обеспечения. Система управления систематизирует полученную измерительную информацию в общей базе и делает измерения связанными. Архитектура программного обеспечения технологического робота приведена на рис.4.

Управляющая программа системы включает библиотеки функций для работы с модулями нижнего уровня и клиентские программы верхнего уровня. В разработанной сенсорной системе источниками измерительной информации являются система технического зрения, приборы глобальной навигации, наборы датчиков в системе пространственной ориентации, в том числе для определения текущего состояния вертикальных стоек и горизонтирования платформ мобильного робота, микрофонная решетка для приема голосовых команд. Соответствующие модули программных средств обработки измерительных данных от датчиков приведены на рис. 4. Для унифицированных модулей управления линейными актуаторами вертикальных стоек разработаны типовые программы сбора данных датчиков положения, приема команд центрального контроллера и формирования управляющих сигналов (блоки 1-8 на рис. 4).

Разработаны алгоритмы управления движением робота и перемещения рабочей точки манипулятора-трипода [3, 4, 5, 6], основанные на данных сенсорной системы и заданных режимах работы мобильного робота и манипулятора-трипода.

В настоящее время реализованы макеты всех элементов системы управления, программные средства управления исполнительными механизмами и организации взаимодействия элементов технологического робота в целом. Проведены эксперименты по проверки алгоритмов работы робота в различных режимах: супервизорного управления, автономном режиме в детерминированной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. Условия применения и общие технические требования. Симпозиум

по робототехнике в рамках 6-ой специализированной выставки «Робототехника», 4-6 ноября, 2008 г., с. 37-66.
2. Пат. 2476372 РФ, МПК B66C23/36, B60P3/00. Аварийно-спасательная машина / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Еременко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов; ВолгГТУ. - 2013.
3. V. Zhoga, V. Skakunov, I. Shamanov, A. Gavrilov. Programmable Movement Synthesis for the Mobile Robot with the Orthogonal Walking Drivers // Advances in Mechanical Engineering / ed. by A. Evgrafov. – Switzerland : Springer International Publishing, 2016. – **P.** 135-147. – (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering).
4. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.Н. Скакунов, С.Е. Терехов, В.А. Егунов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов, Ф.А.Х. Аль-Хадша // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2015 : First Conference (Volgograd, Russia, September 15-17, 2015) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, O. Shabalina. – [Switzerland] : Springer International Publishing, 2015. – pp. 392-404. – (Ser. Communications in Computer and Information Science. Vol. 535).
5. V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmianov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev,V. Dyashkin-Titov, N. Vorobieva. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland.- Volume 22, 2014, pp. 463-471.
6. Жога В.В., Герасун В.М., Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В. Динамический синтез оптимальных программных движений манипулятора - трипода // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 2. С. 85–92.
7. Мобильные технологические роботы и тренажеры: интеграционное программное обеспечение группового взаимодействия / В.П. Андреев, К.Б.Кирсанов, А.В. Костин и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. №4.-М. 2013.- С. 74 – 79.
8. Sanmartín G**.** et al. PrimeSense sensors as a low-cost method for motion capture on clinical tests //Spanish Computer Graphics Conference. – The Eurographics Association, 2012. – pp. 133-136.
9. Konolige K. et al. Outdoor mapping and navigation using stereo vision //Experimental Robotics. – Springer Berlin Heidelberg, 2008. – pp. 179-190.
10. Девятериков Е.А. Система управления движением мобильного робота с визуальным одометром / Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. – №5 (181). – С.103-108.

11. Быков С.А. Алгоритм анализа облака трёхмерных точек для обработки видеоизображений / С.А. Быков, В.В. Жога, В.Н. Скакунов, В.А. Шурыгин // Экстремальная робототехника : сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 25-26 сент. 2012 г. / ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики, С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - СПб, 2012. - С. 194-200.
12. Yao J. et al. Path planning for virtual human motion using improved A* star algorithm //Information Technology: New Generations (ITNG), 2010 Seventh International Conference on. – IEEE, 2010. – pp. 1154-1158.
13. V. Skakunov, V. Belikov, V. Zhoga, I. Nesmiynov. Processing of Data from the Camera of Structured Light for Algorithms of Image Analysis in Control Systems of Mobile Robots // Advances in Mechanical Engineering / ed. by A. Evgrafov. – Switzerland : Springer International Publishing, 2016. – P. 149-158. – (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering).

V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, S.E. Terekhov

SYSTEM ARCHITECTURE OF MOBILE TECHNOLIGY ROBOT WITH THE ORTOGONAL WALKING DRIVERS

Volgograd state technical university, Russia.

Abstract

The structure of a multi-information-control drive control system of mobile robot technology with orthogonal walking drivers, developed the software architecture on-board computer system. Implemented unified modules control actuators linear actuators walking robot and manipulator and the main sensory systems robot sensitization.

The study was financially supported by the RFBR on the basis of scientific projects № *15-01-04577-а и № 16-38-00485 мол-а*.

Key words: robot with orthogonal walking drivers, manipulator, distributed control system, sensor systems, supervisory control, machine vision.

REFERENCES

[1] Batanov A.F., Gricinin S.N. Murkin S.V. Robotic systems for use in emergencies. Terms of application and general technical requirements. In: Works of symposium on robotics within the 6th specialized exhibition «Robotics», 4-6 november, pp. 37-66. (2008) (rus.)
[2] Patent 2476372 RF, MPK B66C23/36, B60P3/00. Emergency response vehicle / V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, A.V. Eremenko, P.V. Fedchenkov, V.M. Gerasun, I.A. Nesmijanov, V.V. Djashkin-Titov; VSTU. (2013) (rus.)
[3] V. Zhoga, V. Skakunov, I. Shamanov, A. Gavrilov. Programmable Movement Synthesis for the Mobile Robot with the Orthogonal Walking Drivers // Advances in Mechanical Engineering / ed. by A. Evgrafov. – Switzerland : Springer International Publishing, pp. 135-147. – (Book

series: Lecture Notes in Mechanical Engineering). (2016)
[4] Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / I.A. Nesmianov, V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, S.E.Terekhov, V.A. Egunov, N.S. Vorob'eva, V.V. Dyashkin-Titov, F.A.H. Al'a-Hadzha // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2015 : First Conference (Volgograd, Russia, September 15-17, 2015) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, O. Shabalina. – [Switzerland] : Springer, pp. 392-404. – (Ser. Communications in Computer and Information Science. Vol. 535). (2015)
[5] V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmianov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev,V. Dyashkin-Titov, N. Vorobieva. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland.- Vol. 22, pp. 463-471. (2014) (rus.)
[6] Zhoga V.V., Gerasun V. M., Nesmianov I.A., Vorob'eva N.S., Djashkin-TitovV.V. Dynamic synthesis of optimal software movement manipulator – tripod // Problems of mechanical engineering and reliability of cars. Vol. 2. pp. 85–92. (2015) (rus.)
[7] Mobile technology robots and simulators: integration software group interaction / V.P. Andreev, K.B. Kirsanov, A.V. Kostin et al. // The information and measuring and operating systems. Vol. 4. Moscow, pp. 74 – 79. (2013) (rus.)
[8] Sanmartín G. et al. PrimeSense sensors as a low-cost method for motion capture on clinical tests //Spanish Computer Graphics Conference. – The Eurographics Association, pp. 133-136. (2012)
[9] Konolige K. et al. Outdoor mapping and navigation using stereo vision //Experimental Robotics. – Springer Berlin Heidelberg, pp. 179-190. (2008)
[10] Devjaterikov E.A. Traffic control system of the mobile robot with visual odometry / E.A. Devjaterikov, B.B. Mihajlov // Scientific and technical sheets. SPbSTU. Informatics. Telekomunikation. Management. Vol. 5 (181), pp. 103-108. (2013) (rus.)
[11] Bykov S.A. Algorithm analysis of three-dimensional point cloud for processing video / S.A. Bykov, V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, V.A. Shurygin In: Extreme robotics: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference, Saint-Petersburg, 25-26 september. SPbSTU. Saint-Petersburg, pp. 194-200. (2012) (rus.)
[12] Yao J. et al. Path planning for virtual human motion using improved A* star algorithm //Information Technology: New Generations (ITNG), 2010 Seventh International Conference on. – IEEE, pp. 1154-1158. (2010)
[13] V. Skakunov, V. Belikov, V. Zhoga, I. Nesmiynov. Processing of Data from the Camera of Structured Light for Algorithms of Image Analysis in Control Systems of Mobile Robots // Advances in Mechanical Engineering / ed. by A. Evgrafov. – Switzerland : Springer International Publishing, pp. 149-158. – (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering). (2016)

УДК 621.7.077, 681.513.3; DOI 10.1872/MMF-2016-62

Зиеп Хоанг Фи[1], М. Н. Полищук[2], А. Б. Смирнов[3]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОДУЛЯ МИКРОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

[1]Зиеп Хоанг Фи, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: longhoang1791986@yahoo.com

[2]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

[3]Аркадий Борисович Смирнов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: 123smirnov@list.ru

Аннотация

Приведены результаты аналитического исследования и компьютерного моделирования динамики модуля микропозиционирования с пьезоэлектрическим приводом. Составлены уравнения движения, для линеаризованной модели получены передаточные функции перемещений модуля от управляющих воздействий (напряжений на биморфные пьезоактюаторы, БПА). Влияние нелинейностей, обусловленных гистерезисом БПА, исследовано путем компьютерного моделирования в среде *Simulink*. Разработаны структурные схемы системы управления модуля с ПИД-регуляторами при шаговом ступенчатом воздействии по осям *X* и *Y*. Результаты показали, что при использовании управления с обратной связью по перемещению и оптимальной настройке параметров регулятора можно обеспечить необходимые требования по точности и быстродействию для решения задач точного позиционирования.

Ключевые слова: модуль микропозиционирования, пьезоэлектрический привод, динамическая модель, точность, быстродействие, ПИД-регулятор, компьютерное моделирование.

Введение. Одним из наиболее эффективных направлений в разработке высокоточных систем позиционирования является разработка двухступенчатых по уровню точности и диапазону перемещений устройств [1, 2]. Такое направление перспективно, в частности, для создания операционных столиков микроскопов, входящих в составе комплексов для исследования микрообъектов. Многокоординатный операционный столик с подобным принципом построения может состоять из модуля грубых и больших перемещений, на который устанавливается модуль микропозиционирования (рис. 1).

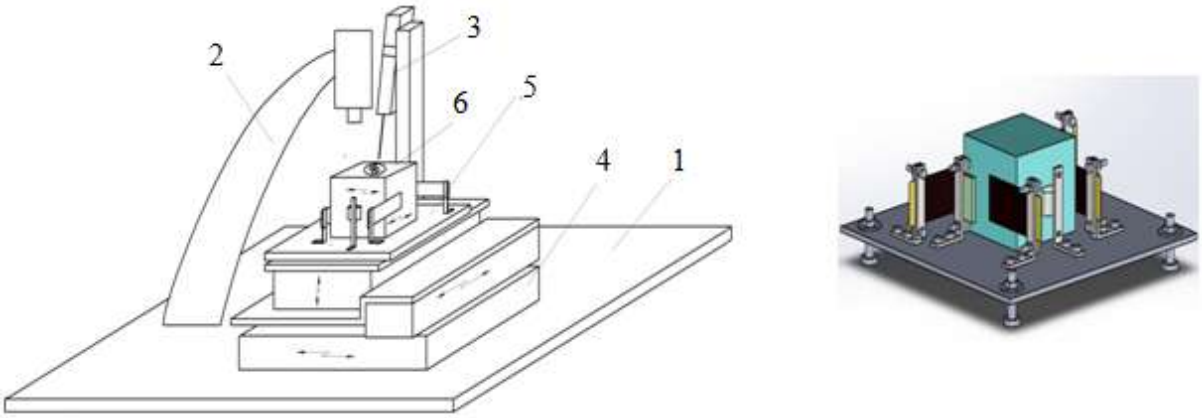


Рис. 1. Схема комплекса для исследования микрообъектов и 3-*D* модель модуля микропозиционирования:
1- стол; 2 – микроскоп; 3 – микроманипулятор; 4 – трехкоординатный модуль грубых перемещений; 5 – двухкоординатный модуль микропозиционирования; 6 –столик с микрообъектом

В [3] подробно описан принцип работы и конструкция подобного устройства, разработанного на кафедре «Автоматы» СПбПУ. Модуль микропозиционирования в виде двухкоординатного столика с параллельной кинематикой имеет диапазон перемещения до 1 мм по каждой из осей с точностью позиционирования до 0,1 мкм. Он устанавливается на трехкоординатный модуль грубых перемещений, выполненный на базе шаговых двигателей с диапазоном перемещения по осям порядка 50 мм.

Отличительной особенностью модуля микропозиционирования является использование пьезоэлектрического привода. В связи с высокими требованиями по точности и быстродействию, а также такими особенностями пьезоматериалов, как нестабильность характеристик и нелинейность физических свойств, разработчики модуля столкнулись с целым рядом проблем при создании и наладке его системы управления.

Модуль микропозиционирования включает два привода (по одному для каждой из координат *X* и *Y*), схожих по структуре и параметрам [3]. Далее рассмотрение ведется на примере одного из них — привода по оси *X*. Упрощенная динамическая модель привода поясняется на рис. 2.

а *б*

Рис. 2. Динамическая модель упругой системы (*а*) и электрическая схема формирования управляющего воздействия (*б*)

Столик двигается под действием сил, возникающих при подаче электрических напряжений на БПА. Математическая модель системы имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + r\dot{x} + cx = F(u), \\ RC\dot{u} + u = U, \end{cases} \quad (1)$$

где x – перемещение столика; m, r , c – приведенная масса столика; коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы по оси X; $F(u)$ – сила, действующая со стороны БПА; u – напряжение на БПА; U, R – управляющее напряжение и активное сопротивление источника; C – емкость конденсатора, образованного электродами пьезокерамических элементов биморфа.

Линейная модель. В первом приближении можно считать, что усилие F прямо пропорционально напряжению на БПА, $F = cAu$, где A – коэффициент, зависящий от геометрии и материала пьезокерамических элементов актюатора [3, 4]. Тогда система (1) становится линейной, а выражение для передаточной функции от управляющего напряжения к перемещению модуля принимает вид

$$G_{x/u}(p) = \frac{1}{\tau p + 1} \cdot \frac{A}{T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1}, \quad (2)$$

где первый сомножитель – апериодическое звено с постоянной времени $\tau = RC = 1{,}86 \cdot 10^{-3}$ с, второй сомножитель – колебательное звено с постоянной времени $T = \sqrt{m}/c = 1{,}73 \cdot 10^{-3}$ с и относительным демпфированием $\zeta = 0{,}018$.

Зная коэффициент A, легко определить динамические характеристики линейной системы [4]. На рис. 3 в качестве примера приведен отклик системы на управляющее напряжение $U = 25$ В, соответствующее перемещению $x = 100$ мкм ($A = 4 \cdot 10^{-6}$ м/В).

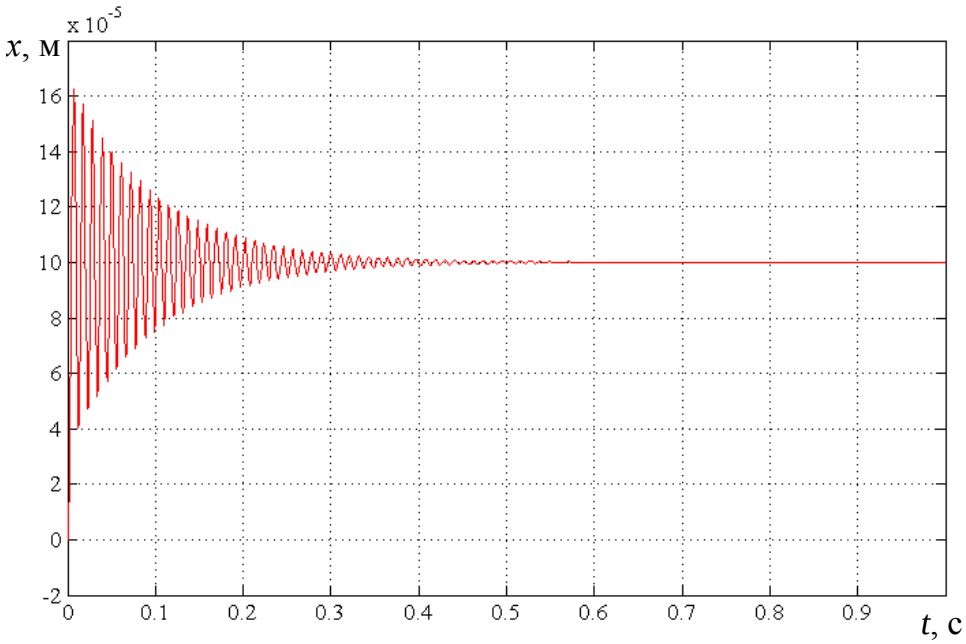


Рис. 3. Реакция разомкнутой линейной системы

Ясно, что возникающий переходный процесс носит колебательный характер, имеет место большое перерегулирование и значительное время установления. Но главный недостаток состоит в том, что подобное программное управление приводом возможно только в том случае, когда коэффициент A точно известен и не меняется во времени. К сожалению, как уже было сказано выше, пьезокерамика не отличается стабильностью характеристик. Неточность определения характеристик или их изменение в процессе работы ведут к соответствующим ошибкам позиционирования.

Нелинейная модель. Одним из факторов, влияющих на работу системы, является нелинейная зависимость перемещения модуля от управляющего напряжения, например, из-за гистерезиса. На рис. 4 приведена зависимость перемещения БПА от подаваемого на него напряжения, полученная экспериментально. Основной линией показан график при максимальном диапазоне изменения U (от -50 В до +50 В), пунктирной линией показан график частного случая зависимости — при изменении U в меньшем диапазоне (от +40 В к –30 В и далее до +30 В).

Основная петля гистерезиса хорошо аппроксимируется полиномом:

$$x = g(U) = \begin{cases} 8\cdot10^{-8}U^3 + 2\cdot10^{-5}U^2 + 0{,}0030\cdot U - 0{,}015, & \dot{U} > 0, \\ 1\cdot10^{-7}U^3 - 2\cdot10^{-5}U^2 + 0{,}0028\cdot U + 0{,}0761, & \dot{U} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

В (3) верхняя строка соответствует росту управляющего напряжения (нижней ветви гистерезиса), а нижняя строка – уменьшению (верхней ветви). Значение x измеряется в миллиметрах, U – в вольтах. Учитывая (3), получим при том же самом воздействии U = 25 В, что и на рис. 3, перемещение x = 70 мкм, а значит недопустимо большую ошибку, порядка 30 %.

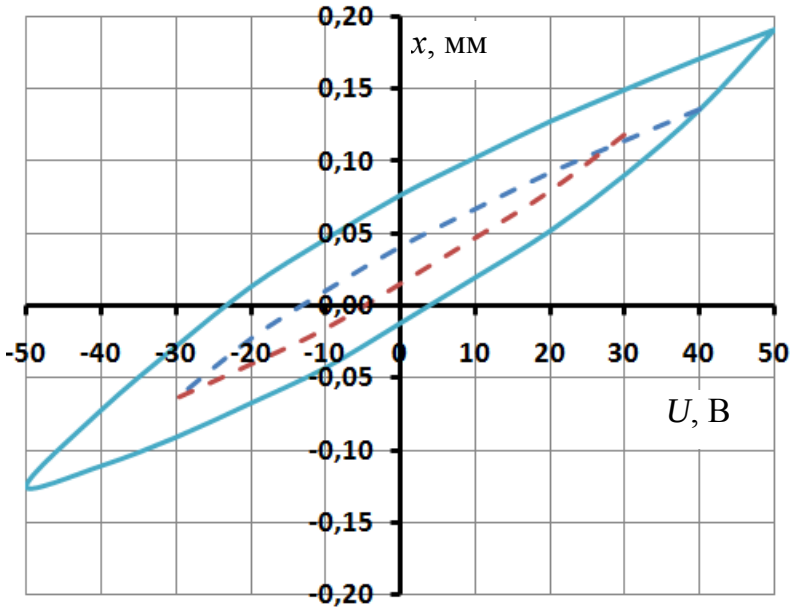


Рис. 4. Зависимость перемещения БПА от управляющего напряжения

ПИД-регулирование. Хорошо известен способ, позволяющий преодолеть указанную проблему, — создание замкнутой системы управления с обратной связью по отклонению. Математическая модель системы в этом случае принимает следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + r\dot{x} + cx = cg(u), \\ \tau\dot{u} + u = U, \\ U = k_p e + k_d \dot{e} + k_i \int e(t)dt, \\ e = x^* - x, \\ |U| \le 50, \end{cases} \qquad (4)$$

где $g(u)$ – нелинейная функция, определяющая зависимость перемещения БПА от подаваемого напряжения (см. формулу (3)); k_p, k_d, k_i – коэффициенты усиления пропорционального дифференциального и интегрального каналов ПИД-регулятора; e – ошибка, рассогласование между требуемым x^* и действительным x перемещениями столика; ограничения напряжения U на уровне ±50 В обусловлены свойствами использованных БПА.

Система с ПИД-регулированием [5, 6, 7, 8] может значительно улучшить свойства системы, но требует оптимальной настройки каналов управления. Дополнительная проблема обусловлена тем, что в процессе регулирования управляющий сигнал (напряжение) на БПА изменяется непрерывно, столик может «двигаться» не по одной и той же ветви гистерезисной петли, а с переходом на внутренние петли [9]. В качестве датчиков положения столика в указанном диапазоне микроперемещений целесообразно выбирать емкостные датчики [7, 10].

Чтобы избежать неоднозначности, настройка ПИД-регулятора должна производиться так, чтобы обеспечить апериодический характер процесса изменения управляющего напряжения. Схема модели нелинейной системы приведена на рис. 5, где *Signal Constraint* – блок настройки, *PID Controller* – блок ПИД-регулятора, *Saturation* – блок ограничения напряжения на БПА, *f*(*u*) – блок нелинейности, соответствующий (3). Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7.

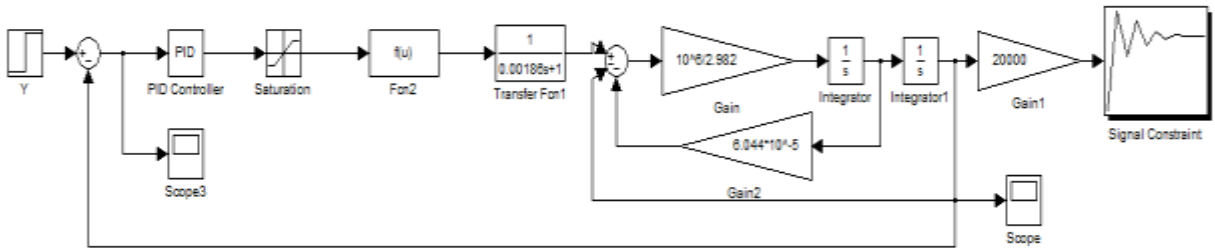


Рис. 5. Структурная схема динамической системы с ПИД-регулятором

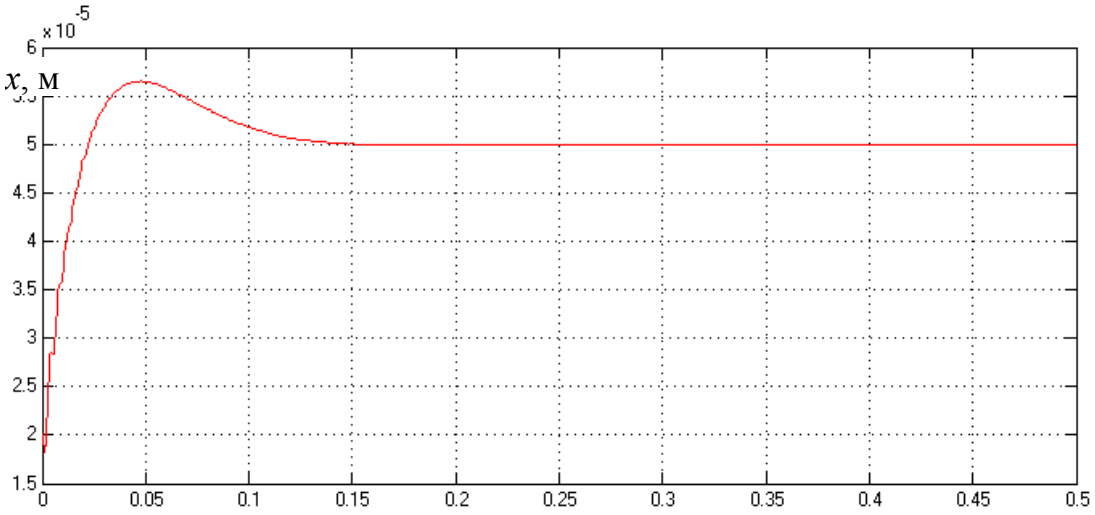


Рис. 6. Позиционирование столика при перемещении из точки x = 20 мкм в точку x = 50 мкм

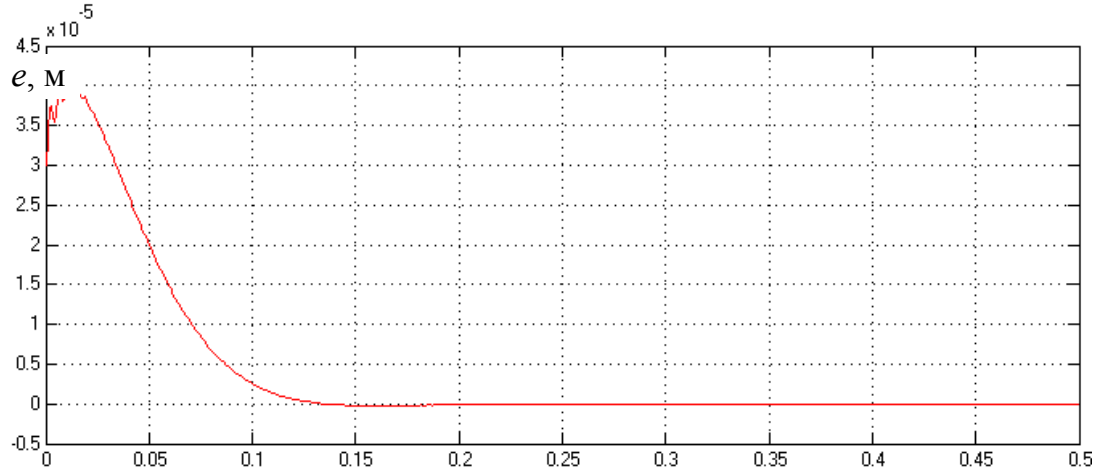


Рис. 7. Ошибка позиционирования при перемещении столика из точки x = 20 мкм в точку x = 50 мкм

Графики свидетельствуют о том, что требования по точности и быстродействию модуля выполняются: ошибка позиционирования составляет 0,5 мкм, время переходного процесса – 0,15 с. Система работоспособна, как при движении вперед (увеличении координаты x), так и при движении в обратном направлении (т. е. по обеим ветвям петли гистерезиса). График на рис. 6 соответствует переходу из точки x = 20 мкм в точку x = 50 мкм, а на рис. 8 – движению назад: из точки x = 50 мкм в точку x = 20 мкм. К сожалению, в обоих случаях имеет место перерегулирование.

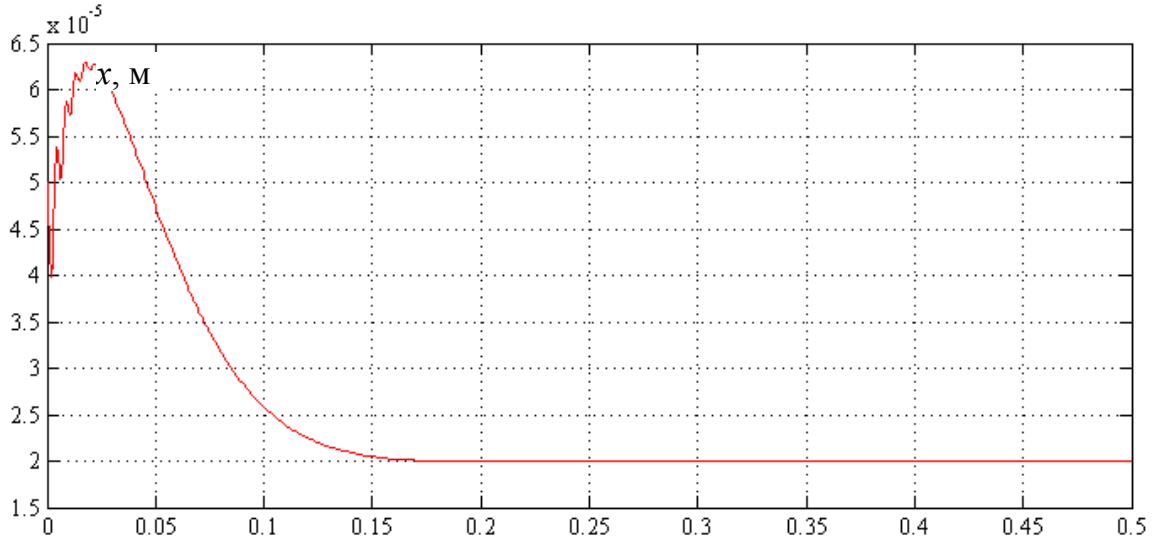


Рис. 8. Позиционирование столика из точки x = 50 мкм в точку x = 20 мкм

Варианты организации управления. В процессе разработки системы управления было опробовано несколько способов улучшения характеристик модуля микропозиционирования. Перспективными представляются следующие.

1. Улучшить динамику можно, форсировав переходный процесс путем добавки к управляющему напряжению от ПИД-регулятора некой уставки. Эта уставка $U_0 = U_0(x^*)$ вычисляется в зависимости от положения требуемой точки позиционирования аппроксимированием гистерезисной петли: верхней или нижней — в соответствии с направлением движения столика:

$$U_0 = f(x) = \begin{cases} 1221x^3 - 680x^2 + 323x + 5, & \dot{x} > 0, \\ 665x^3 + 498x^2 + 266x - 23, & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

2. Упростить работу системы управления можно, отключив управление по рассогласованию в момент, когда погрешность позиционирования станет меньше допустимой величины, например, при $|e| < 0{,}1$ мкм.

Структурная схема модели в *Simulink*, реализующая подобный подход, представлена на рис. 9. На рис. 10 представлены результаты моделирования.

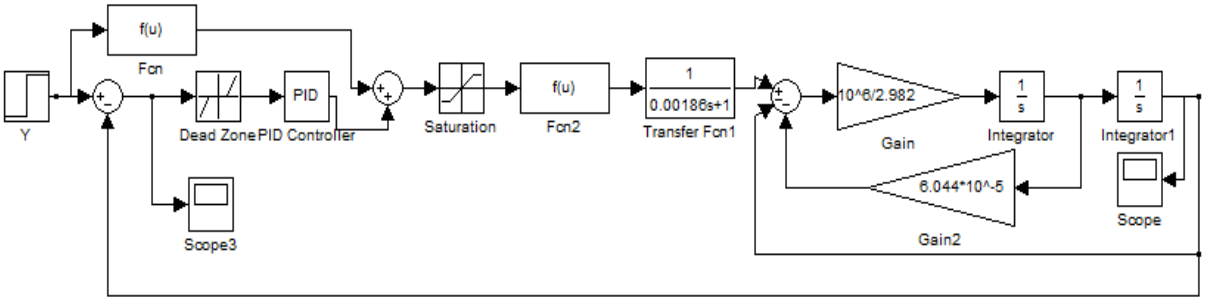
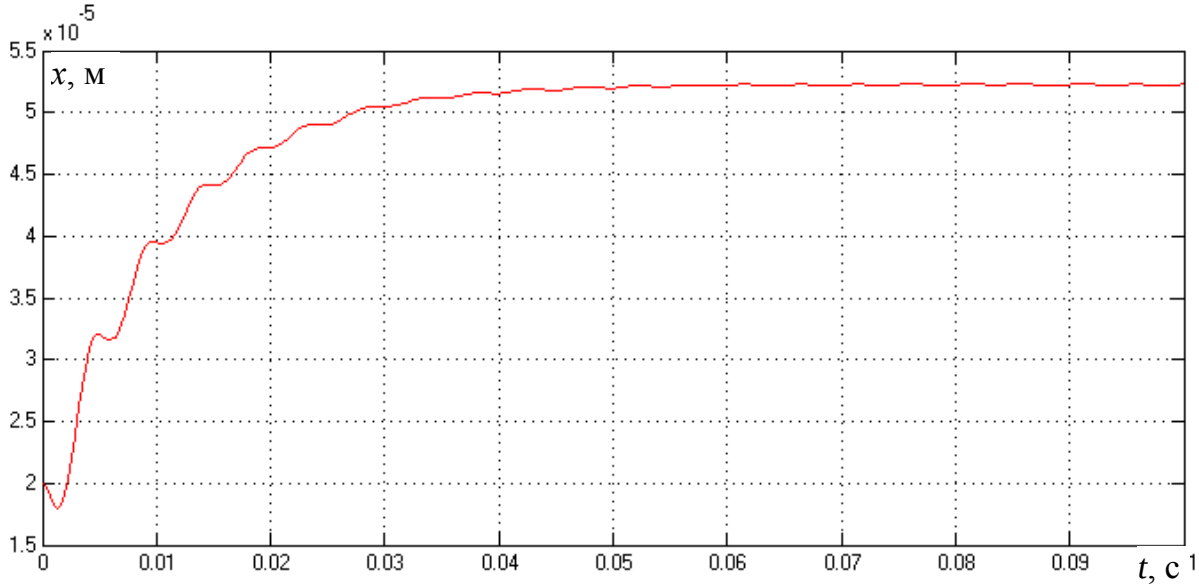
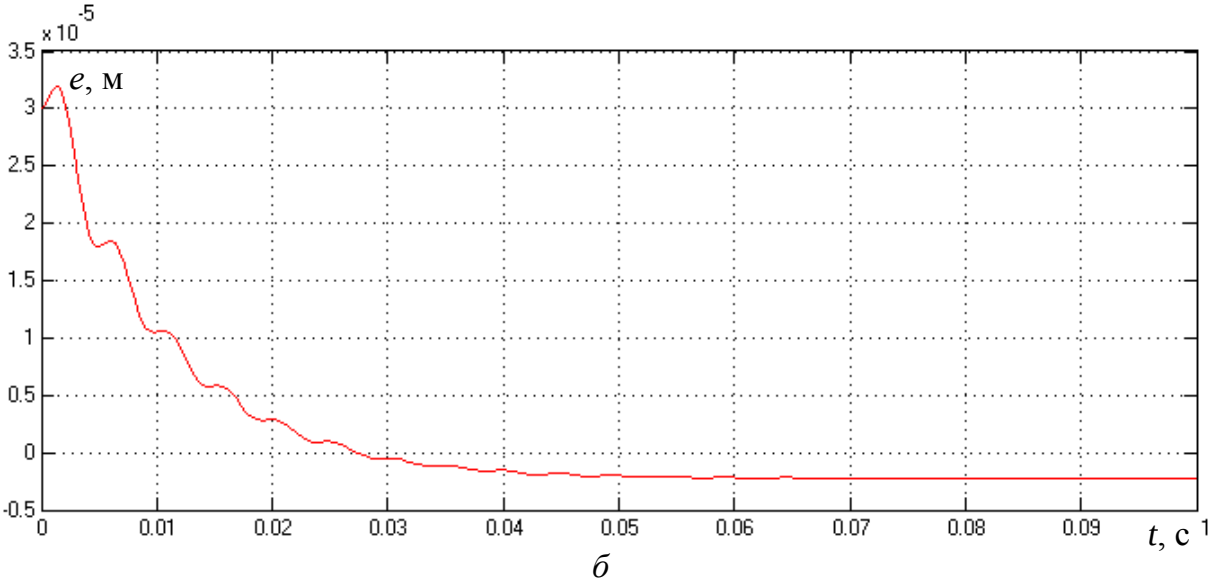


Рис. 9. Структурная схема с уставкой на входе и отключением ПИД-регулятора при входе в зону позиционирования



а



б

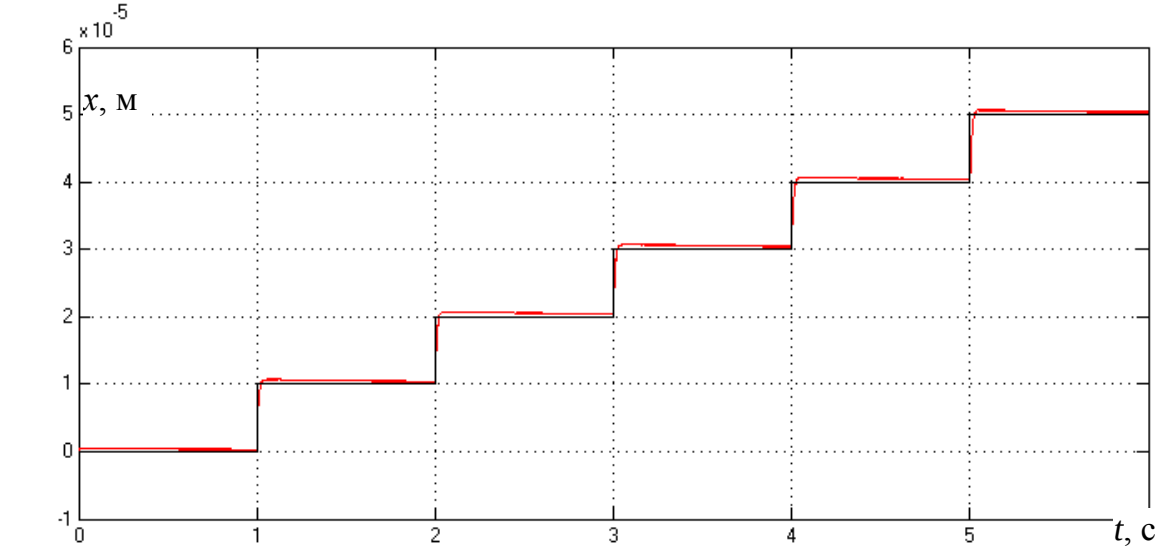
Рис. 10. Перемещение столика (*а*) и ошибка его позиционирования (*б*) при перемещении из точки x = 20 мкм в точку x = 50 мкм

Стоит отметить, что время переходного процесса существенно (в 3 раза) сократилось, а процесс приобрел характер близкий к

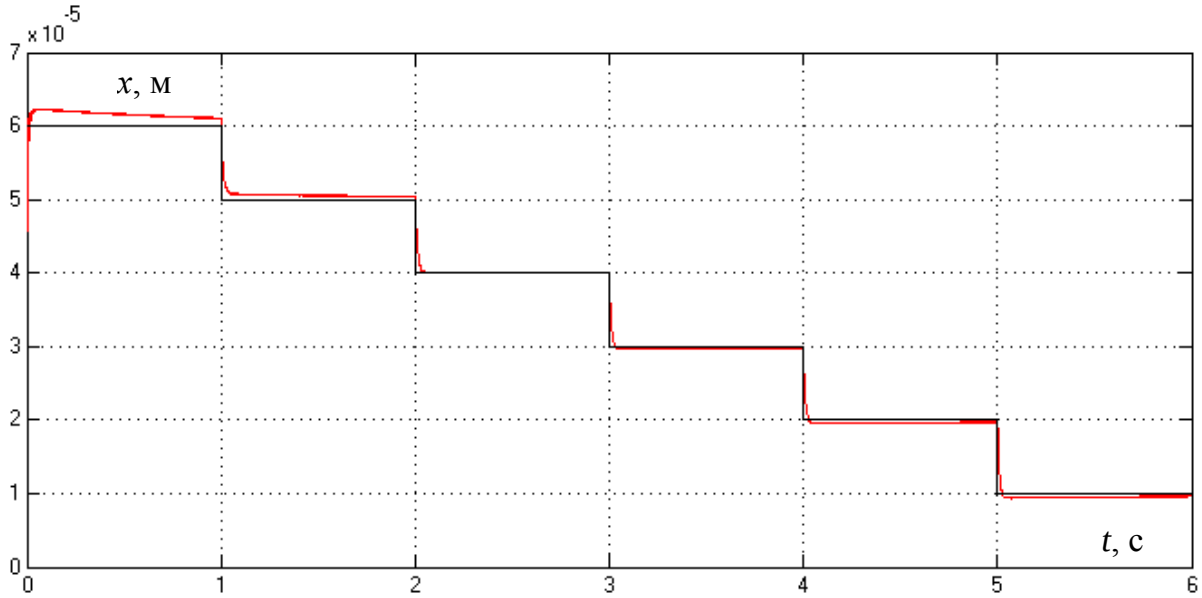
апериодическому (сравни рис. 10, *а* и рис. 6). Конечно, увеличилась установившаяся ошибка, но связано это с ограничением по требуемой точности: причина $|e| < 0{,}1$ мкм.

При работе с микрообъектами часто используют автоматический режим работы с многократным шаговым перемещением столика по координатам X и Y для получения данных или осуществления физических воздействий на площадке порядка 1×1 мм^2. Поэтому целесообразно рассмотреть поведение системы при ступенчатом возрастающем и ниспадающем входных сигналах.

Компьютерное моделирование (рис. 11) показало, что при частоте следования сигналов 1 Гц и шаге изменения координаты $\Delta x = 10$ мкм график перемещения имеет апериодический характер и удовлетворяет требованиям точности и быстродействия отработки задания.



а



б

Рис. 11. Режим шагового перемещения вперед (*а*) и назад (*б*)

Заключение. Система управления модуля микропозиционирования без обратных связей по положению имеет переходные процессы, характерные для колебательных систем с большой степенью перерегулирования (до 50%). Быстродействие такой системы удовлетворяет требованиям (не превышает 0,5 с).

Наличие нелинейности типа «гистерезис», свойственной пьезокерамике, из которой сделаны БПА, повышает сложность управления приводом модуля микроперемещений из-за неоднозначной связи между управляющим напряжением и развиваемым усилием БПА. В результате ошибки позиционирования разомкнутой системы могут достигать десятков процентов.

Управление с обратной связью по положению и ПИД-регулятором позволяет избавиться от перерегулирования и свести к нулю установившуюся статическую ошибку. При подобранных при помощи программного блока *Signal Constraint* коэффициентах усиления можно обеспечить поведение системы близким по характеру к апериодическому. Быстродействие системы при этом остается на том же уровне.

Результаты компьютерного моделирования позволяют разработать систему управления модулем микропозиционирования для перемещения в шаговом режиме по обеим осям без перерегулирования и с достаточным быстродействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Fuchiwaki, T. Kawai, A. Ohta, D. Misaki and H. Aoyama. Development of a Positioning & Compensation Device for a Versatile Micro Robot / 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008. pp/ 83 – 88.
2. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
3. Смирнов А.Б., Зиеп Хоанг Ф., Полищук М.Н. Компьютерное моделирование работы двухкоординатного столика с пьезоэлектрическими актюаторами // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 1(238), 2016. С. 172 – 182.
4. Смирнов А.Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин: Учеб. пособие. – СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 172 с. [электр. ресурс] URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view (дата обращения 11.01.2016).
5. Fang-Jung Shiou et al: Development of a real-time closed-loop micro-/nano-positioning system embedded with a capacitive sensor , 2010 Meas. Sci. Technol. 21 054007. [электр. ресурс] URL: http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/5/054007/ (дата обращения 11.01.2016).

6. Ravi Kant Jain, Somajyoti Majumder, Bhaskar Ghosh: Design and analysis of piezoelectric actuator for micro gripper // International Journal of Mechanics and Materials in Design. September 2015, Volume 11, Issue 3, pp. 253 – 276.
7. Yangmin Li, Qingsong Xu: Development and Assessment of a Novel Decoupled XY Parallel Micropositioning Platform // IEEE/Asme Transactions On Mechatronics, Vol. 15, No. 1, February 2010. pp. 125 – 135.
8. Jingang Yi, Steven Chang, and Yantao Shen. Disturbance-Observer-Based Hysteresis Compensation for Piezoelectric Actuators/ IEEE/Asme transactions on mechatronics, vol. 14, no. 4, august 2009, pp 456 -464.
9. Зиеп Хоанг Фи, Смирнов А. Б. Компьютерное моделирование динамики двухкоординатного столика с пьезоприводом // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции 30 ноября – 5 декабря 2015 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 83-88.
10. Смирнов А.Б., Крушинский И.А., Борисевич А.В. Пьезоэлектрический схват // Патент РФ на изобретение № 2529126. Приоритет 25.04.2013.

P. Diep Hoang, M. N. Polishchuk, A. B. Smirnov

MODELING OF DYNAMIC OF MICROPOSITIONING MODULE

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article provides results of analytical research and computer simulation of dynamics of micropositioning module with piezoelectric actuators. The equations of motion and transfer functions of movement the module of the control actions (the voltage on bimorph piezoelectric actuators - BPA) for the linearized model are obtained. The impact of non-linearity with hysteresis by means of computer simulation in Simulink is investigated. Block diagrams of the control system with PID controllers with stepping stepped excitation on the X and Y axes are developed. The necessary requirements in terms of accuracy and performance solutions for precise positioning tasks with feedback on moving and optimal tuning PID parameters are provided.

Key words: micropositioning module, piezoelectric actuator, dynamic model, accuracy, PID-controller, computer simulation, hysteresis.

REFERENCES

[1] O. Fuchiwaki, T. Kawai, A. Ohta, D. Misaki and H. Aoyama. Development of a Positioning & Compensation Device for a Versatile Micro Robot / 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008. pp. 83 – 88.

[2] Nikolskiy A.A. Tochnyye dvukhkanalnyye sledyashchiye elektroprivody s pyezokompensatorami [Precision two-channel tracking drive with piezoelectric compensators]. M.: Energoatomizdat, 1988. 160 s. (rus).

[3] Smirnov A.B., Ziep Hoang F., Polishchuk M.N. Komp'yuternoe modelirovanie raboty dvuhkoordinatnogo stolika s p'ezoehlektricheskimi aktyuatorami // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 1(238), 2016. Pp. 172 – 182.

[4] Smirnov A.B. Elementnaya baza avtomaticheskikh mashin i oborudovaniya. Mekhatronnyye moduli mikroperemeshcheniy tekhnologicheskikh mashin [Element base of automatic machinery and equipment. Mechatronic modules micromovings technological machines] – SPb.: izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. – 172 s. (rus). Available: http://elib.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view (Accessed 11.03.2016).

[5] Fang-Jung Shiou et al: Development of a real-time closed-loop micro-/nano-positioning system embedded with a capacitive sensor , 2010 Meas. Sci. Technol. 21 054007. [elektr. resurs] Available: http://iopscience.iop.org/0957-0233/21/5/054007/ (Accessed 11.03.2016).

[6] Ravi Kant Jain, Somajyoti Majumder, Bhaskar Ghosh: Design and analysis of piezoelectric actuator for micro gripper // International Journal of Mechanics and Materials in Design. September 2015, Volume 11, Issue 3, pp. 253 – 276.

[7] Yangmin Li, Qingsong Xu: Development and Assessment of a Novel Decoupled XY Parallel Micropositioning Platform // IEEE/Asme Transactions On Mechatronics, Vol. 15, No. 1, February 2010. pp. 125 – 135.

[8] Jingang Yi, Steven Chang, and Yantao Shen. Disturbance-Observer-Based Hysteresis Compensation for Piezoelectric Actuators/ IEEE/Asme transactions on mechatronics, vol. 14, no. 4, august 2009, pp. 456 -464.

[9] Diep Hoang Phi, Smirnov A.B. Kompyuternoe modelirovanie dinamiki dvuhkoordinatnogo stolika s pezoprivodom [Computer simulation of the dynamic of the xy-stage with piezoelectric drive] // Nauchnii forum s mejdunarodnim uchastiem «Nedelya nauki SPbPU»_ materiali nauchno_prakticheskoi konferencii 30 noyabrya – 5 dekabrya 2015. Institut metallurgii_ mashinostroeniya i transporta SPbPU. – SPb._ Izd-vo Politehn. un-t. (rus).

[10] Smirnov A.B., Krushinskiy I.A., Borisevich A.V. Pyezoelektricheskiy skhvat [Patent for Piezoelectric gripper of robot]// Patent RF na izobreteniye RU2529126. Priority 25.04.2013. (rus).

УДК 621.7.077, 681.513.3; DOI 10.1872/MMF-2016-63

Зиеп Хоанг Фи[1], А. Б. Смирнов[2], М. Н. Полищук[3]

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКООРДИНАТНОГО СТОЛИКА С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ АКТЮАТОРАМИ

[1]Зиеп Хоанг Фи, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: longhoang1791986@yahoo.com

[2]Аркадий Борисович Смирнов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: 123smirnov@list.ru

[3]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

Аннотация

В работе приведены результаты разработки и исследования двухкоординатного столика микроскопа с пьезоэлектрическим приводом. Представлен анализ многокоординатных платформ приборов для микропозиционирования объектов. Описан принцип действия двухкоординатного операционного столика микроскопа с параллельной кинематикой с биморфными пьезоэлектрическими актюаторами (БПА). Найдены зависимости перемещений столика по осям X и Y от электрических напряжений, подаваемых на БПА в квазистатическом режиме. Приведены результаты экспериментальных исследований действующего макета столика и сделаны выводы по его использованию.

Ключевые слова: двухкоординатный операционный столик микроскопа, биморфный пьезоэлектрический актюатор, параллельная кинематика, точное позиционирование, микроперемещение, математическая модель, экспериментальные исследования, напряжение, гистерезис.

Цель работы – разработать и исследовать двухкоординатный столик с параллельной кинематикой с пьезоприводом на базе биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА), имеющий простую конструкцию,

возможность корректировки углового смещения и низкую стоимость, работающий в диапазоне микроперемещения по двум осям до 1 мм с точностью позиционирования до 0,1 мкм.

Актуальность. В исследованиях современной биологии и медицины, в частности, при измерении клеточных потенциалов (рис. 1), лазерной микродиссекции клеток и др. используются устройства микроперемещений, способные проводить определенные действия рабочих органов на клеточном уровне [1, 2].

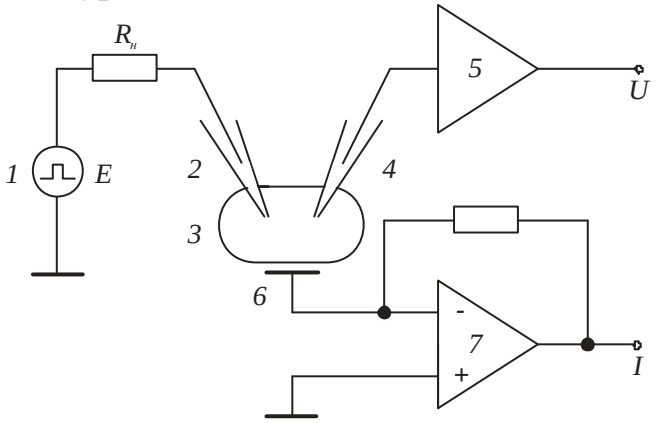
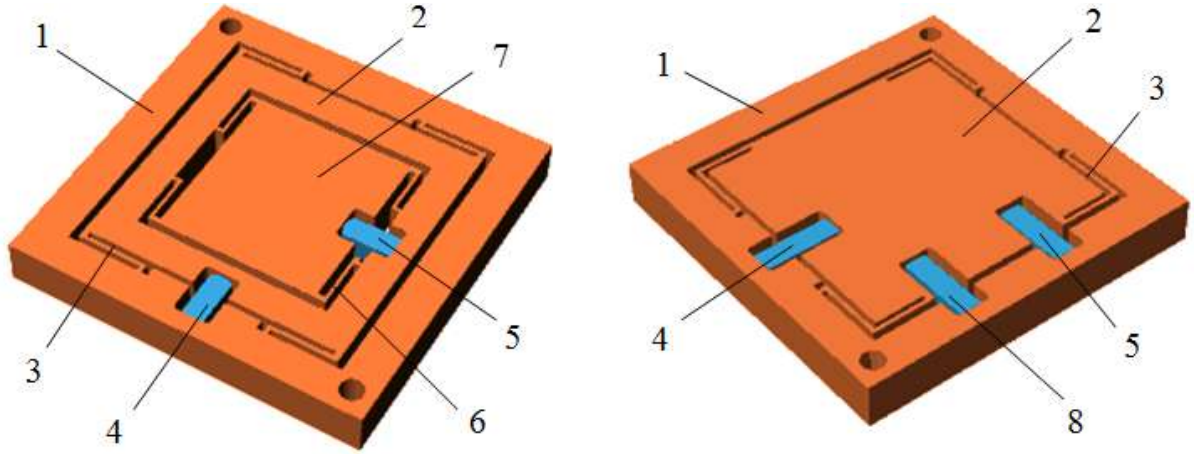


Рис. 1. Схема измерения мембранной проводимости клетки:
1 – генератор; 2 – токовый микроэлектрод; 3 – клетка; 4 – измерительный электрод; 5 – усилитель; 6 – электрод сравнения; 7 – измеритель тока

При работе с микрообъектами необходимы многокоординатные позиционирующие предметные столики, рабочая область которых находится в поле зрения микроскопа. Такие фирмы, как Physik Instrumente (PI), Cedrat Technologies, New Scale Technologies и др., производят высокоточную микропозиционирующую технику с пьезоэлектрическими приводами, однако их продукция сложна в изготовлении и имеет высокую стоимость. Создание относительно простых, дешевых и компактных устройств и их исследование является актуальной задачей.

Анализ известных технических решений. Заслуживают внимания разработки многокоординатных предметных столиков компании PI с пакетными многослойными пьезоактюаторами (рис. 2) [3]. Двухкоординатный предметный столик с последовательной кинематикой (рис. 2, *а*) содержит основание 1 в виде рамки с квадратным окном, внутри которого находится подвижная платформа 2 в виде такой же рамки, имеющая возможность перемещаться относительно основания 1 по одной оси X в упругих направляющих 3 с помощью пьезоактюатора 4. Вторая подвижная платформа 7 внутри первой платформы 2 имеет возможность перемещаться относительно нее по оси Y в упругих направляющих 6 при помощи пьезоактюатора 5. Недостатком такой упругой системы с последовательной кинематикой являются большие габариты: внутри одной подвижной платформы находится вторая. От указанного недостатка

свободен операционный столик с параллельной кинематикой (рис. 2, *б*). Столик содержит основание 1 в виде квадратного окна, в котором подвижная платформа 2 может перемещаться относительно него по двум осям X и Y и поворачиваться вокруг оси Z в упругих направляющих 3 с помощью пьезоактюаторов 4, 5, 8.



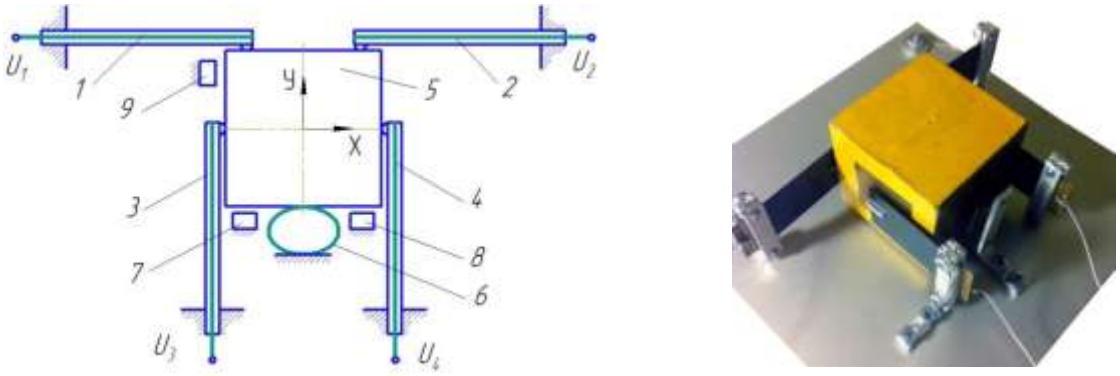
а *б*

Рис. 2. Схемы предметных столиков фирмы PI:
а – XY платформа с последовательной кинематикой; *б* – XY платформа с параллельной кинематикой и коррекцией угла поворота
1 – основание; 2, 7 – подвижная платформа; 3, 6 – упругая направляющая; 4, 5, 8 – пьезоактюатор

При биологических исследованиях на уровне клеточного материала часто требуется обеспечить перемещения предметного столика в диапазоне до 1 мм по двум осям с погрешностью порядка 0,1 мкм с компенсацией поворота до $0{,}01^0$. В этом случае возможно использование биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА) для предметного столика по схеме с параллельной кинематикой, подобной рис. 2, *б*.

Принцип действия предлагаемого устройства. Двухкоординатный модуль микроперемещений столика микроскопа с возможностью угловой корректировки (рис. 3, *а, б*) состоит из БПА 1–4, контактирующих своими выступами со столиком 5, пружины 6 и датчиков положения 7–9. Пружина 6 служит для поджима столика к БПА 1 и 2 [4]. При подаче напряжений U_1 и U_2 на БПА 1 и 2 столик перемещается по оси Y, а при подаче напряжений U_3 и U_4 на БПА 3 и 4 столик — по оси X.

Математическая модель столика в квазистатическом режиме. Для определения зависимости перемещения столика от напряжений, подаваемых на БПА в квазистатическом режиме, рассмотрим поведение, например, БПА 1 при подаче напряжения U_1 отдельно без столика в квазистатическом режиме. При подаче напряжения U_1 свободный конец БПА 1 перемещается на величину ξ_0 (формула 6.28 из [5]):



а *б*

Рис. 3. Двухкоординатный столик с БПА:
а – схема; *б* – действующий макет
1, 2, 3, 4 – БПА; 5 – столик; 6 – пружина; 7, 8 , 9 – датчик положения

$$\xi_0 = A \cdot U_1; \quad A = \frac{3}{4} \cdot \frac{d_{31}\left[\left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^2 - \frac{h_M^2}{4}\right] l^2}{\left[E_M s_{11}^E \frac{h_M^3}{8} + \left(h_P + \frac{h_M}{2}\right)^3 - \frac{h_M^3}{8}\right] h_P}, \tag{1}$$

где E_M – модуль упругости средней пассивной части (рессоры) БПА; s_{11}^E – податливость пьезокерамики; d_{31} – пьезомодуль; h_M и h_P – толщина рессоры и пьезоэлектрического элемента БПА соответственно.

Рассмотрим схему нагружения столика при одновременной подаче одинакового напряжения на БПА 1 и 2 (рис. 4, *а*). В этом случае на столик действуют силы F_1 и F_2 со стороны БПА 1 и 2, а также сила F_C со стороны пружины. Будем считать положение равновесия столика при $U_{1\text{-}4}$ = 0 начальным положением. Допустим, что силы трения $F_{T3}, F_{T4} << F_1, F_2, F_C$ и ими можно пренебречь. Силы трения между столиком и основанием также не учитываем.

Учитывая указанные допущения и принцип суперпозиции в линейных системах, при одновременной подаче напряжений U_3 и U_4 перемещение столика по оси X определяется выражением

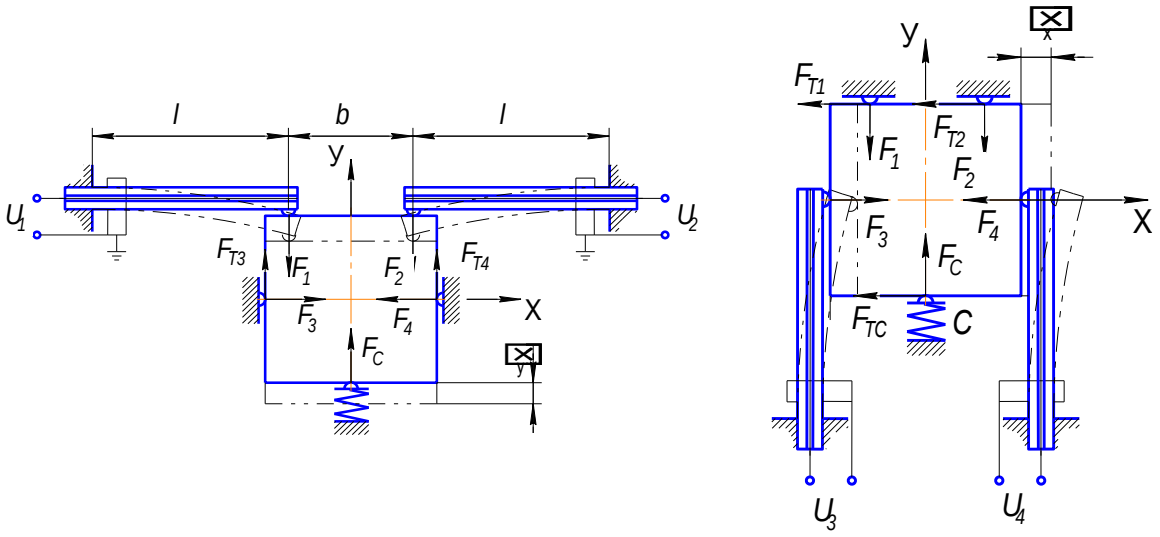
$$\xi_X = \frac{A}{2}(U_3 + U_4). \tag{2}$$

Аналогично находим перемещение по оси *Y:*

$$\xi_Y = \frac{\xi_0}{1 + \frac{\lambda l^3 C}{6}}, \tag{3}$$

где C – коэффициент жесткости пружины; λ – податливость поперечного сечения БПА, определяемая по (6.36) из [5]:

$$\lambda = \frac{12}{b_1\left\{E_M h_M^3 + 2\frac{h_P^3}{\bar{s}_{11}^E}\left[1+3\left(1+\frac{h_M}{h_P}\right)^2\right]\right\}}$$, b_1 – ширина БПА.



а *б*

Рис. 4. Расчетная схема:
а – при работе БПА 1 и 2; *б* – при работе БПА 3 и 4

Минимум жесткости пружины ограничен тем, что сжатая пружина должна преодолевать силы трения.

Экспериментальные исследования. Задачей экспериментальных исследований действующего макета МТП являлось определение зависимостей микроперемещений по двум координатам от напряжений, подаваемых на БПА, в квазистатическом режиме с целью определения работоспособности разрабатываемого устройства и нахождения диапазона микроперемещений. В действующем макете МТП предметный столик в виде кубика 40×40×40 мм имел возможность двигаться относительно основания на трех промежуточных стальных шариках Ø1,5 мм.

Для проведения исследований была разработана и составлена экспериментальная установка (рис. 5), состоящая из микроскопа 1 (МБС-10), двухкоординатного столика 2 с БПА, неподвижного основания 3, зафиксированного на установочной плите 4. Все БПА были поочередно подключены к регулируемому источнику напряжения 5 (АИП Б5.120/0.75). Изображение исследуемой зоны столика выводилось на монитор (VM9/12) 6, которое получалось с помощью видеокамеры (МТН-222) 7. Для определения перемещений была предварительно проведена калибровка изображений с точностью 5 мкм при помощи концевых мер длины. Для повышения качества изображения использовалась подсветка — лампа 8 с регулятором освещения 9.

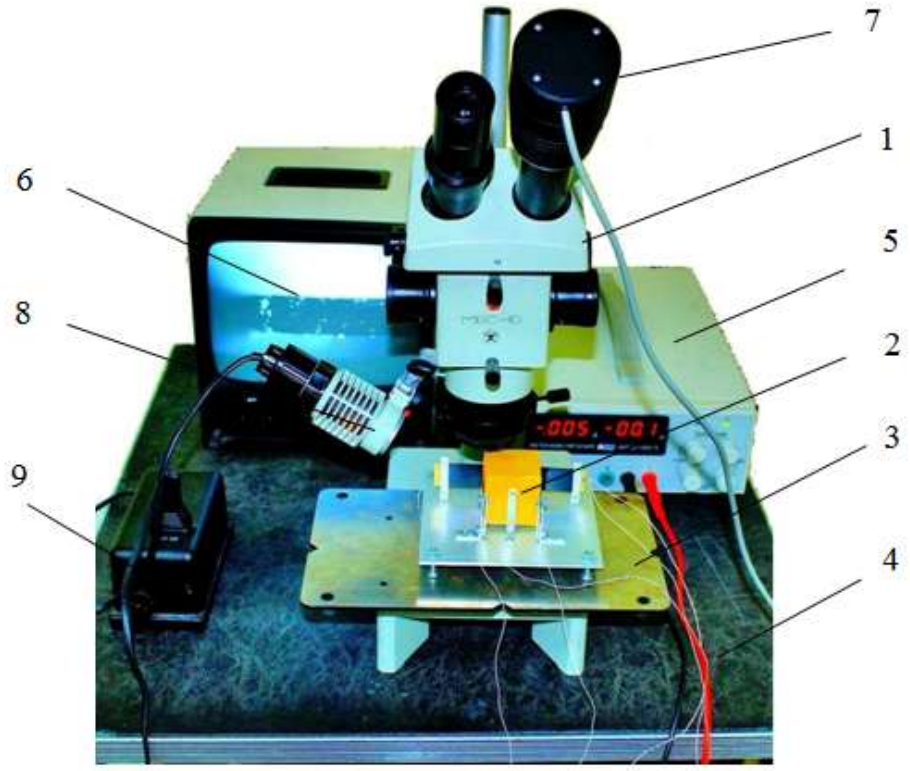


Рис. 5. Экспериментальная установка:
1 – микроскоп; 2 – столик; 3 – основание; 4 – установочная плита; 5 – источник напряжения; 6 – монитор; 7 – видеокамера; 8 – лампа; 9 – регулятор освещения

При исследовании микроперемещений произведен ряд опытов при изменении напряжения *U* от -50 В до +50 В с шагом 10 В при стабильной температуре 21^0С. Вначале результаты опытов имели большой разброс значений перемещений, поэтому для стабилизации работы и получения достоверных результатов потребовалось предварительно сделать несколько пробных прогонов (режим «тренировки»). Подобное поведение БПА, используемых в качестве приводов адаптивных деформируемых зеркал лазерных систем и в микрокантилеверах сканирующих микроскопов, отмечено в статьях [6] и [7].

Проводились эксперименты по определению зависимостей перемещения концов БПА без столика и столика по осям X и Y от напряжения, подаваемого на соответствующие БПА, в циклическом режиме. Результаты исследований действующего макета двухкоординатного столика приведены на рис. 6, *а* – для оси X и на рис. 6, *б* – для оси Y. Графики под номером 1 соответствуют перемещению свободных концов БПА без столика, графики под номерами 2-4 соответствуют сериям экспериментов перемещения столика, график под номером 5 соответствует теоретической зависимости по формуле (1).

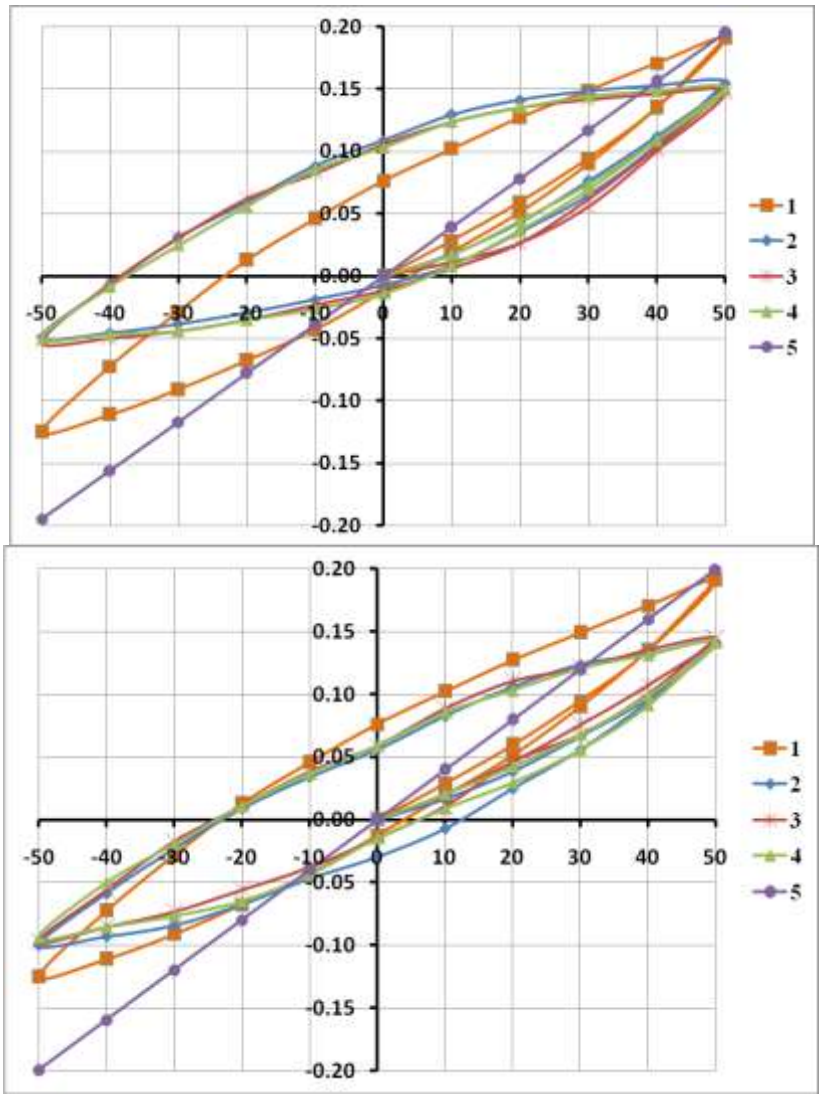


Рис. 6. Зависимости перемещений (мм) от напряжения (В):
а – по оси X; *б* – по оси Y

Из графиков видно, что при изменении напряжения от -50 В до +50 В диапазон перемещений свободного БПА меньше расчетного, вычисляемого по формуле (1) на 21%, диапазон перемещений столика составляет: по оси X 64 % от диапазона перемещений свободного БПА и 50 % от диапазона перемещений по формуле (1); по оси Y – 76 % от диапазона перемещений свободного БПА и 60 % от диапазона перемещений по формуле (1). Таким образом, диапазон перемещений столика по обеим осям примерно в 1,6 раза меньше, чем у свободного БПА, причем графики гистерезисных петель сдвигаются по осям X и Y вверх относительно начала координат.

Из графиков также видно, что гистерезис для зависимости перемещений столика по оси X от напряжения имеет коэффициент гистерезиса 58 %, а по оси Y – 32 %, т. е. по оси X гистерезис почти в два раза больше, чем по оси Y. Это связано с различием кинематических цепей при перемещениях столика по осям X и Y. По оси Y оба БПА действуют в

одном направлении, преодолевая совместно силы трения и действие пружины, упругий гистерезис материала (бериллиевая бронза) которой на порядок меньше пьезокерамики. По оси X фактически действует только один БПА, толкающий столик. При этом он преодолевает силы трения и малое сопротивление второго БПА, который, двигаясь параллельно в том же направлении, что и первый, только придерживает столик при постоянном контакте с ним.

Сравнение графиков гистерезисных замкнутых кривых 1 и 2, 3, 4 (рис. 6, *а*) показывает, что коэффициент гистерезиса при действии на столик по оси X в 2,1 раза больше коэффициента гистерезиса одиночного БПА без столика (28%). Аналогично (рис. 6, *б*) для оси Y следует, что коэффициент гистерезиса при действии двух БПА на столик в 1,1 раза больше, чем коэффициент гистерезиса одиночного БПА без столика (28%).

Опыт работы с действующим макетом двухкоординатного столика показал, что ручное управление посредством регулирования напряжения для выхода столика в определенную точку довольно затруднительно, т. к. есть относительно большая неоднозначность зависимости перемещения от напряжения в квазистационарном режиме. Для преодоления этого недостатка необходимо ввести в систему управления обратную связь по положению. Такая автоматизация процесса перемещения столика позволит повысить стабильность, точность позиционирования и быстродействие системы в целом.

Заключение. Создание двухкоординатных операционных столиков с параллельной кинематикой и биморфными пьезоэлектрическими актюаторами в качестве приводов для биологических и иных исследований является реальной и выполнимой задачей, что подтверждается экспериментами, проведенными на действующем макете.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ показали следующее.

– Для получения стабильного характера зависимости перемещения столика от подаваемого напряжения перед основной работой необходимо произвести 5 - 6 движений в максимальном диапазоне перемещений; для этого система управления должна обеспечивать автоматический режим предварительной «тренировки».

– В циклическом режиме коэффициент гистерезиса при действии на столик по оси X равен 58 %, а по оси Y — 32 %.

– Диапазон перемещений свободного БПА меньше расчетного на 21%.

– Диапазон перемещений столика примерно в 1,6 раза меньше, чем диапазон перемещений для свободного БПА из-за сил трения.

– Для обеспечения высокой стабильности и точности позиционирования столика необходимо введение в систему управления обратной связи при помощи датчиков перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. C. Ramos, G. B. Pintarelli, D. Altenhofen, D. O. H. Suzuki. Micro Electro-permeabilization System for Cell Medium Conductivity Change Measurement of Erythrocytes Cells/ 1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine and Food & Environmental TechnologiesVolume 53, 2016 of the series IFMBE Proceedings pp 87-90 [электр. ресурс] http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-287-817-5_20 (дата обращения 11.04.2016).
2. Лазерная микродиссекция и катапультирование PALM [электр. ресурс] URL: www.img.ras.ru/files/PUBLIC/CCU/ Microdissector.pdf (дата обращения 11.01.2016).
3. Сайт компании Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. [электр. ресурс] URL: http://www.physikinstrumente.com/ products.html (дата обращения 11.03.2016).
4. Зиеп Хоанг Фи, Смирнов А.Б. Компьютерное моделирование динамики двухкоординатного столика с пьезоприводом // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции научн., 30 ноября – 5 декабря 2015 г. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С. 83-88.
5. Смирнов А.Б. Элементная база автоматических машин и оборудования. Мехатронные модули микроперемещений технологических машин: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 172 с. [электр. ресурс] URL: http://elib.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view (дата обращения 11.01.2016).
6. Попов В.Д. Исследование гистерезиса биморфных деформируемых зеркал. [электр. ресурс] URL: http://pvd2.narod.ru/publ/hysteresis/hysteresis.htm (дата обращения 11.03.2016).
7. Bruno Andò, Pietro Giannone, and Salvatore Graziani, A Low-Cost Experimental Setup to Characterize Piezoelectric Cantilever Bimorphs// IEEE, Ttransactions on instrumentation and measurement, vol. 57, no. 1, january 2008.

P. Diep Hoang, A. B. Smirnov, M. N. Polishchuk

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF XY-STAGE WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article provides results of development and research of the XY microscope stage with piezoelectric actuators. The analysis of devices multi-axis

platform for micropositioning of objects is presented. It describes a principle operation of XY microscope stage with parallel kinematics with bimorph piezoelectric actuators (BPA). Research found dependences of the displacement stage for the X and Y axes of on the voltages, which were applied to the BPA in quasi-static mode. The results of experimental research of the XY-stage are given and conclusions about their using are presented.

Key words: the XY microscope operating stage, bimorph piezoelectric actuators, parallel kinematic, exact positioning, mathematical model, experimental research, design, micro displacement, voltage, hysteresis.

REFERENCES

[1] L. C. Ramos, G. B. Pintarelli, D. Altenhofen, D. O. H. Suzuki. Micro Electro-permeabilization System for Cell Medium Conductivity Change Measurement of Erythrocytes Cells/ 1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine and Food & Environmental TechnologiesVolume 53, 2016 of the series IFMBE Proceedings pp 87-90 http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-287-817-5_20

[2] Lazernaya mikrodissektsiya i katapultirovaniye PALM [Laser microdissection and bailouts PALM] Available: www.img.ras.ru/files/PUBLIC/CCU/Microdissector.pdf (rus.)

[3] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. http://www.physikinstrumente.com/ products.html .

[4] Diep Hoang Phi, Smirnov A. B. Dvukhkoordinatnyy stolik s pyezoprivodom [Operating XY stage with piezodrive] // Nauchnyy forum s mezhdunarodnym uchastiyem «Nedelya nauki SPbPU»: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii 1-6 dekabrya 2014. Institut metallurgii, mashinostroyeniya i transporta SPbPU. Ch. 2. [The scientific forum with international participation "Science Week SPbSPU"] – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. S.13-17 (rus).

[5] Smirnov A. B. Elementnaya baza avtomaticheskikh mashin i oborudovaniya. Mekhatronnyye moduli mikroperemeshcheniy tekhnologicheskikh mashin [Element base of automatic machinery and equipment. Mechatronic modules micromovings technological machines] – SPb.: izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. – 172 s.(rus). http://elib.spbstu.ru/dl/2/3878.pdf/view .

[6] Popov V. D. Issledovanie gisterezisa bimorfnykh deformiruemykh zerkal.[Research hysteresis bimorph deformable mirrors] (rus). http://pvd2.narod.ru/publ/hysteresis/hysteresis.htm .

[7] *Bruno Andò, Pietro Giannone, and Salvatore Graziani*, A Low-Cost Experimental Setup to Characterize Piezoelectric Cantilever Bimorphs // IEEE, Ttransactions on instrumentation and measurement, vol. 57, no. 1, january 2008.

УДК 629.787.523; DOI 10.1872/MMF-2016-64

М.И. Маленков[1], Д.Н. Кузьменко[2], Е.А. Лазарев[3]

МЕТОДЫ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТОХОДОВ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА И СВОЙСТВ ГРУНТА*

[1]Маленков Михаил Иванович, д.т.н., профессор
главный научный сотрудник
АО Научно-Технический Центр «РОКАД»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: m.i.malenkov@gmail.com

[2]Кузьменко Дмитрий Николаевич
Инженер-конструктор
АО Научно-Технический Центр «РОКАД»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: dima_kuzmenko_69@mail.ru

[3]Лазарев Евгений Алексеевич
технический директор
АО Научно-Технический Центр «РОКАД»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail:

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы исследования ходовых качеств и оптимизации технических параметров адаптивных систем передвижения в процессе моделирования движения планетоходов по сложному рельефу, образованному, главным образом, слабо связными грунтами с низкой несущей способностью. Показано, что в этом случае можно отталкиваться от методических подходов, которые сформировались в прошлом веке в связи с созданием в ОАО ВНИИТрансмаш самоходных шасси Лунохода-1 и Лунохода-2 и последующих ходовых макетов марсоходов. Освоение современного программного обеспечения позволяет получить более высокое качество моделей за счет резкого повышения оперативности, объема и достоверности получаемой информации. В частности, оказываются возможными визуализация движения планетоходов с комбинированным колесно – шагающим движителем, механизмы шагания

* Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки: проект № 14.576.21.0050, уникальный идентификатор RFMEFI57614X0040

которого используются и для регулирования относительного положения колес и корпуса по вертикали.

Ключевые слова: система передвижения, алгоритмы управления, колесно-шагающий движитель, модель, адаптивная подвеска, механизм шагания, робототехническая система.

1 Введение

Целью статьи, является краткий анализ методов моделирования движения реальных луноходов и марсоходов для оценки актуальности наработанного задела, а также изложение современных подходов к моделированию для повышения уровня разработки технических решений на ранних стадиях проектирования новых, адаптивных систем передвижения планетоходов. Материалы статьи подготовлены при разработке проектно - компоновочных решений робототехнической системы «Помощник космонавта» (РТС ПК) по проекту № 14.576.21.0050.

Динамические модели в классической теории автомобиля исходят из физической картины чистого качения ведущих колес по твердой поверхности без скольжения (рисунок 1.а). При тягово – динамических расчетах это приводит к одно массовой расчетной схеме, уравнение движения которой учитывает и вращающиеся массы колес и компонентов трансмиссии.

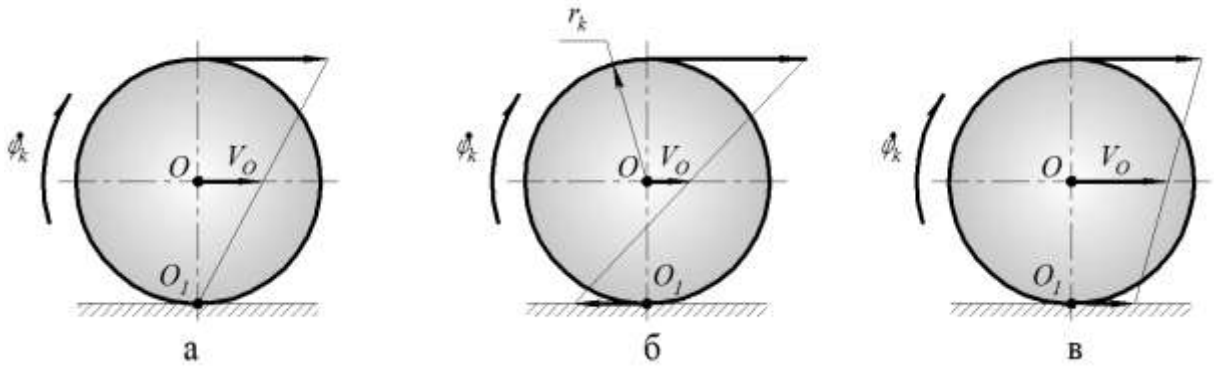


Рисунок 1 – Схемы качения колеса: О-ось колеса, O_1-полюс качения, а – чистое качение; б – качение с буксованием; в – качение с юзом

Примерно в середине прошлого века, в связи с широким развитием транспортных средств высокой проходимости сельскохозяйственного, военного и специального назначения, эксплуатация которых в значительной мере происходит вне дорог, на неподготовленной местности, началось изучение картины взаимодействия пневматических колес со слабо связными грунтами. Движение по таким грунтам неизбежно связано с продольным проскальзыванием ведущих колес, величина которого зависит от угла преодолеваемого подъема и силы тяги на крюке, также от направления и величины ускорения машины при разгоне.

При этом, в зависимости от рельефа и режима управления, возможно движение как с буксованием, так и с юзом (рисунок 1.б, 1.в). В этот период в работах советских [1, 2, 3, 4] и зарубежных, в первую очередь, американских [5] ученых, на основе экспериментальных исследований физико – механических свойств (ФМС) деформируемых грунтов с помощью различного рода механических пенетрометров и штампов были предложены математические выражения для оценки связанных друг с другом коэффициентов полной и свободной тяги, разность которых представляет собой коэффициент сопротивления движению.

В конце 60-х годов, в связи с начавшимися работами по созданию автоматического (СССР) и пилотируемого (США) луноходов, фронт исследований распространился на изучение вопросов взаимодействия металлических колес с лунным грунтом В обеих странах, совершенно независимо друг от друга, для этих целей создаются грунтовые каналы с подвижным динамометрическим оборудованием, позволяющим получить функции перечисленных коэффициентов во всем диапазоне буксования колес на слабо связных грунтах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

В работах [13, 14] изложены особенности натурно – математического моделирования движения планетоходов при движении по произвольному профилю для решения задач динамической устойчивости от опрокидывания и определении динамических нагрузок ходовую часть и контейнер при колебаниях. Наиболее последовательно вопросы математического моделирования прямолинейного движения и поворота для решения задач тяговой динамики колесных и колесно- шагающих планетоходов рассмотрены в работах [15, 16]. Некоторые положения этих работ могут служить отправными точками для дальнейшего развития методов моделирования при проектно – компоновочных исследованиях новых многофункциональных и адаптивных систем передвижения [17,18].

2 **Особенности и некоторые результаты математического моделирования движения планетоходов**

Так же, как и для других сложных систем, составные части которых связаны различными механическими, электрическими и информационными связями, математическая модель планетохода включает три компонента: расчетные схемы, уравнения движения, алгоритм и программу их решения на компьютере. При системном подходе к моделированию необходим учет существенных параметров системы передвижения (СП) планетохода и свойств поверхности.

В частности, расчетные схемы и динамическая модель советских луноходов (рисунки 2 - 7), разработанные с учетом результатов их успешной эксплуатации на Луне и предназначенные для моделирования движения на ровной наклонной опорной поверхности, учитывает колесную формулу, бортовой способ поворота, упруго – диссипативные связи

контейнера с жесткими колесами и встроенными в их ступицы индивидуальными электромеханическими тяговыми приводами [15].

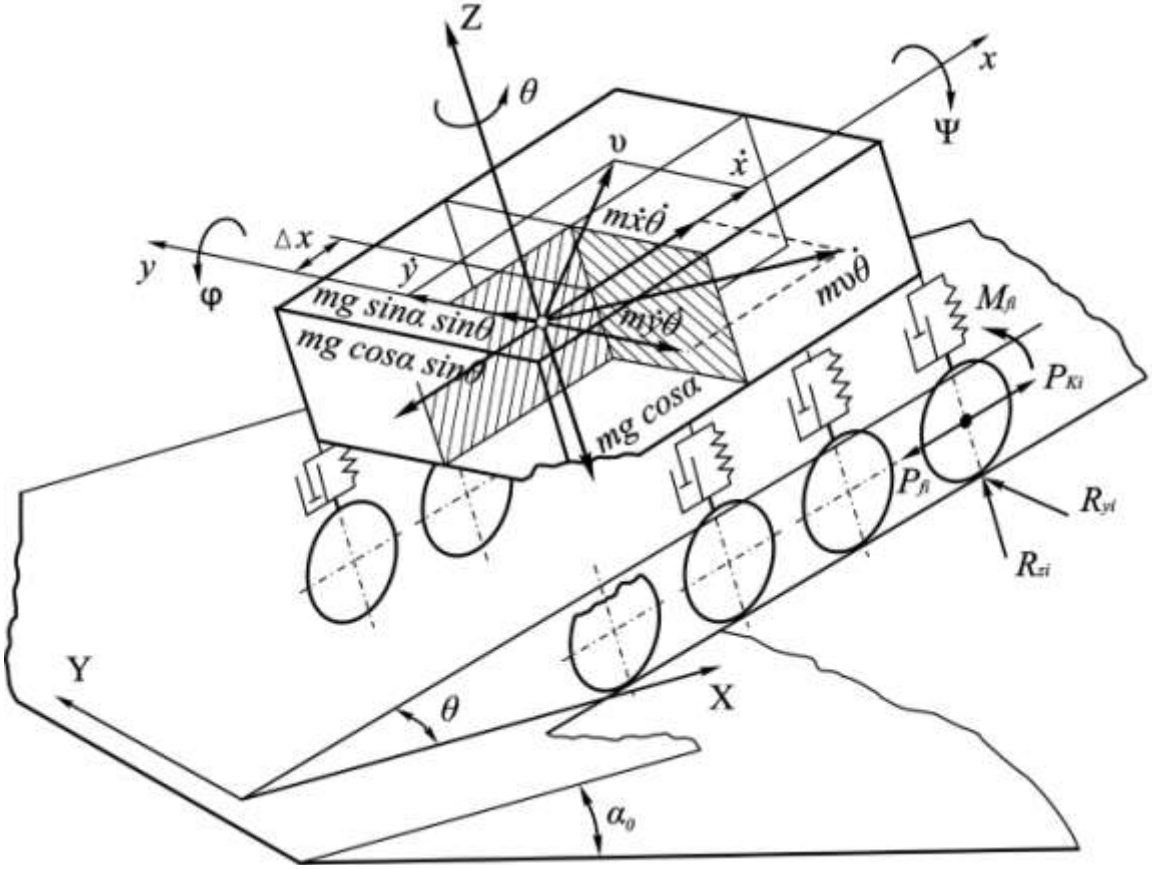


Рисунок 2 – Расчетная динамическая схема советских луноходов

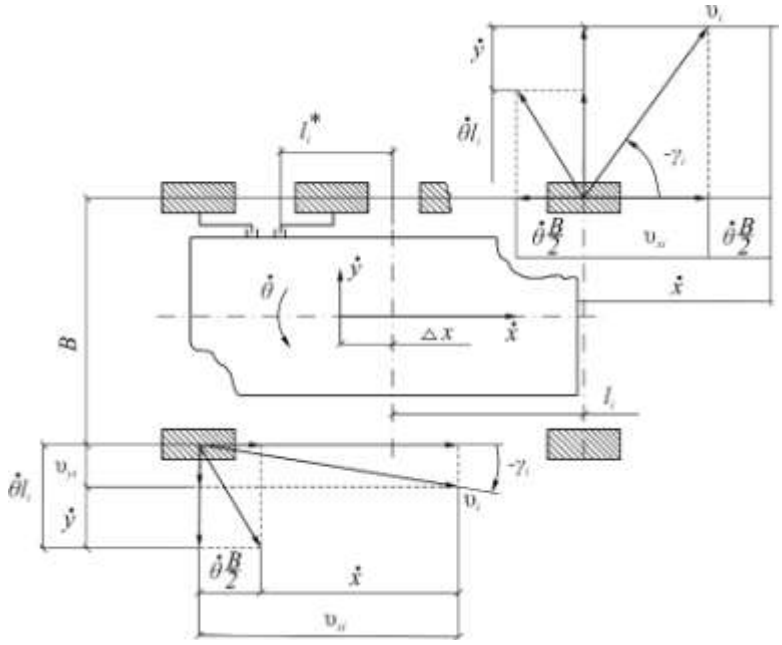


Рисунок 3 – Схема расчета скорости i-го колеса в проекции на опорную поверхность: O_1 - проекция геометрического центра шасси, O_2 - проекция центра масс лунохода

Подвижная система координат x, y, z связана с центром масс планетохода, ось x совпадает с продольной осью симметрии, ось y в общем случае может быть смещена относительно поперечной оси симметрии на величину Δx (рисунок 2, 3). Неподвижная система координат XY, необходимая для изучения траектории движения, связана с опорной поверхностью таким образом, что ось X совпадает с направлением угла наибольшего подъема, а ось Y направлена при этом влево. Угловые перемещения лунохода на опорной поверхности описываются курсовым углом Θ, который отсчитывается от оси X.

Конструкция параллелограммных механизмов подвесок с упругим элементом в виде торсиона (рисунок 4), позволяет 3 степени свободы подрессоренной части – линейные перемещения по нормали к опорной поверхности (z) и угловые перемещения (ψ, φ) относительно соответственно продольной (x) и поперечной (y) осей подвижной системы координат, связанной с центром масс. Параллелограммный механизм подвесок замыкает реактивный момент колеса (M_{fi}) на корпус лунохода, упругие моменты торсионов подвесок (M_{yi}) зависят только от нормальных реакций.

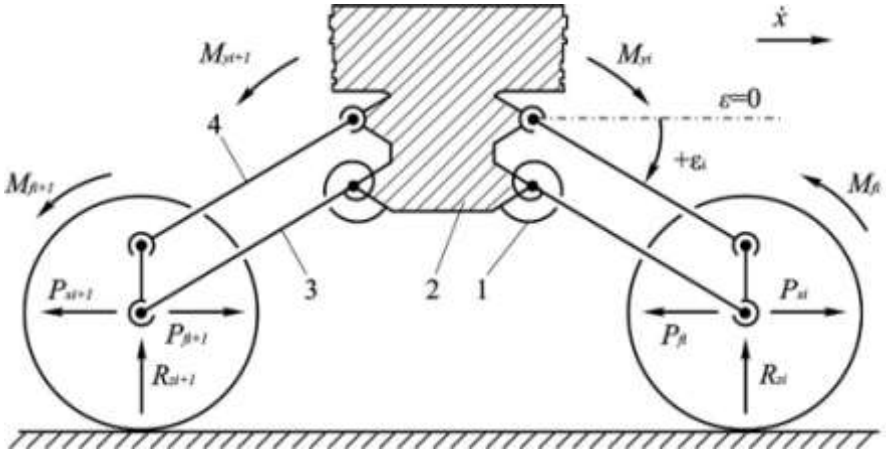


Рисунок 4 – Расчетная схема сил и моментов, приведенных к рычагам подвески: 1-торсион – стержневая пружина кручения, 2-подрессоренная часть, 3-нижний рычаг (балансир), 4-верхний рычаг (реактивная тяга)

Ключевым вопросом моделирования является учет характеристик взаимодействия колес с лунным грунтом. Расчетные схемы взаимодействия жесткого колеса с лунным реголитом (рисунок 5) базируются на результатах исследований [7, 8]:

- местное уплотнение под нормальной нагрузкой,
- увеличение сопротивления сдвигу при уплотнении,
- отсутствие упругих деформаций.

Такой характер взаимодействия приводит к деформациям грунта и возникновению элементарных нормальных и касательных реакций по поверхности взаимодействия после приложения к оси колеса нормальной

нагрузки N, тяги на крюке $F_к$ и крутящего момента M_k, приложенного к ободу колеса. Для формализации такого взаимодействия, при приведении реакций к оси в координатах, связанных с направлением движения, в качестве нового, для того времени, структурного элемента расчетной схемы был предложен условный фрикцион $\Psi(S)$. Он позволяет раскрыть сложный характер связи колеса с деформируемым грунтом, зависящий конструкции обода, сцепления и коэффициента внутреннего трения частиц грунта. При этом к оси оказываются приложенными тяговая сила $P_к$, нормальная реакция грунта R_z, а к подвеске - реактивный момент $M_f = M_k$.

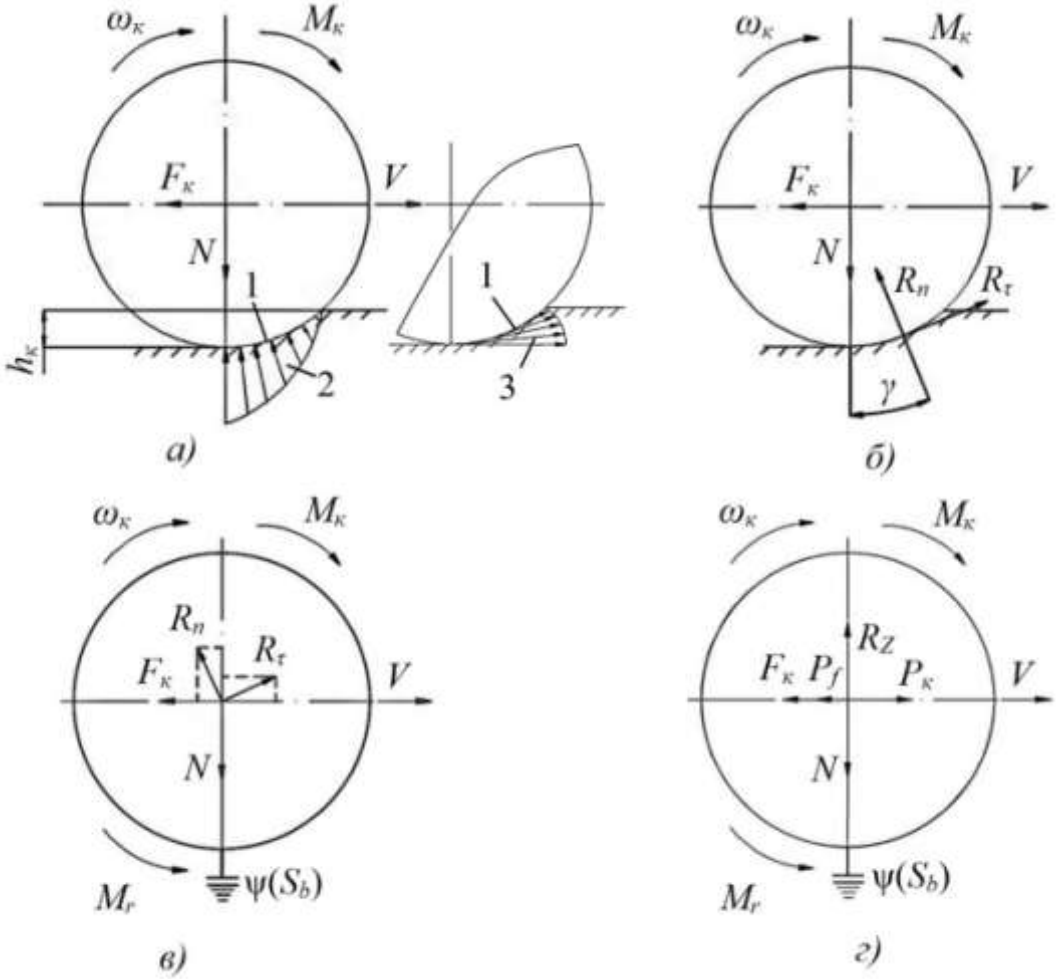


Рисунок 5 – Расчетные схемы взаимодействия колеса с лунным грунтом при прямолинейном движении: а) сектор взаимодействия (1), эпюры элементарных нормальных (2) и касательных (3) реакций грунта; б) реакции грунта; в) приведение реакций к оси колеса; г) схема сил и моментов, действующих на колесо и подвеску

Использование в структуре модели фрикциона приводит к восьми одинаковым расчетным схемам мотор – колес (рисунок 5), оси которых через независимые подвески связаны с подрессоренной частью, а обода – с

опорной поверхностью. Здесь i - порядковый номер мотор – колеса: i =1, 2….n, где n – число мотор – колес. Ротор двигателя с приведенными к нему массами редуктора J_D и колесо J_K имеют связь, характеризующуюся крутильной жесткостью c_g, коэффициентом диссипации b_g, угловым люфтом $\varkappa$ и передаточным отношением u_g.

Остановочное торможение осуществляется путем переключения двигателя в генераторный режим и включения механического тормоза, управляемого электромагнитом. Механический тормоз играет роль и стояночного тормоза. В любом случае тормозной момент тормоза T_1 приложен к валу двигателя.

Характер неголономной связи условного фрикциона зависит от конструкции обода и от ФМС лунного грунта - сцепления и внутреннего трения составляющих его частиц. Наиболее достоверным способом определения зависимости коэффициента тяговой силы, от коэффициента буксования S_b, являются, на наш взгляд, испытания одиночного колеса в грунтовом канале на аналогах лунного грунта.

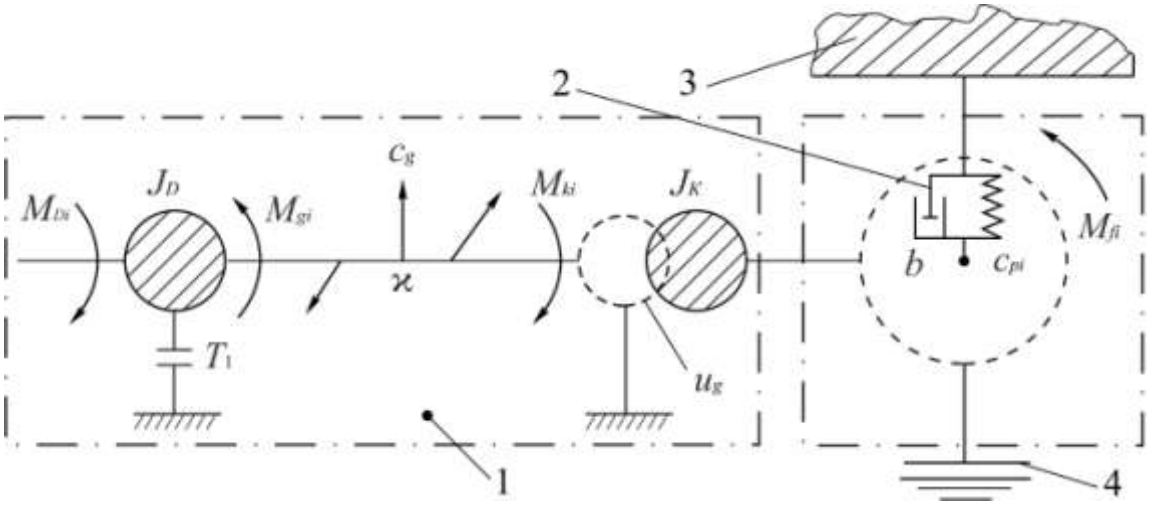


Рисунок 6 – Расчетная динамическая схема i-го мотор – колеса: 1-электромеханический привод, 2-подвеска, 3-подрессоренная часть, 4-условный фрикцион, связывающий обод колеса с грунтом

При всем разнообразии конструкций динамометрических тележек и устройств нагрузки колеса нормальным усилием в грунтовых каналах, результаты испытаний позволяют достаточно точно определить зависимости коэффициентов полной (Ψ) и свободной (k_T) тяги колеса от величины коэффициента буксования (S_b). Эти зависимости можно назвать обобщенными характеристиками пары «колесо – грунт», которые отображают ТСС колеса:

$$S_b = 1 - \frac{\dot{x}}{\omega_k \cdot r_k}, \qquad (1)$$

$$\Psi = M_k/(r_k \cdot R_z), \quad (2)$$

$$k_T = F_k / R_z = \text{tg}\alpha, \quad (3)$$

где M_k, R_z, F_k, ω_k, $\dot{x}$ определяются экспериментально, r_K - Расчетный радиус колеса. Измерить прямыми методами коэффициент сопротивления движению f, не удается, но его можно определить как разность

$$f = \Psi - k_T. \quad (4)$$

При исследовании траектории к перечисленным характеристикам следует добавить зависимость коэффициента сопротивления боковому сдвигу μ от угла ɣ:

$$\mu = R_Y / R_z. \quad (5)$$

Обобщенные характеристики полностью определяют внешние силы, действующие на движитель планетохода со стороны грунта:

$$P_{кi} = R_{Zi} \cdot \Psi_i(S_{bi}), P_{fi} = R_{Zi} \cdot f_i(S_{bi}), R_{Yi} = R_{Zi} \cdot \mu_i(\gamma_i). \quad (6)$$

Во ВНИИТрансмаш испытания колес Лунохода-1 и его опытных макетов проводились в грунтовых каналах даже в летающей лаборатории, с имитацией на короткое время (25с–30 с) гравитационного поля Луны, при ускорении свободного падения $g_л$=1,62 м/с² (рисунок 7.а) [19].

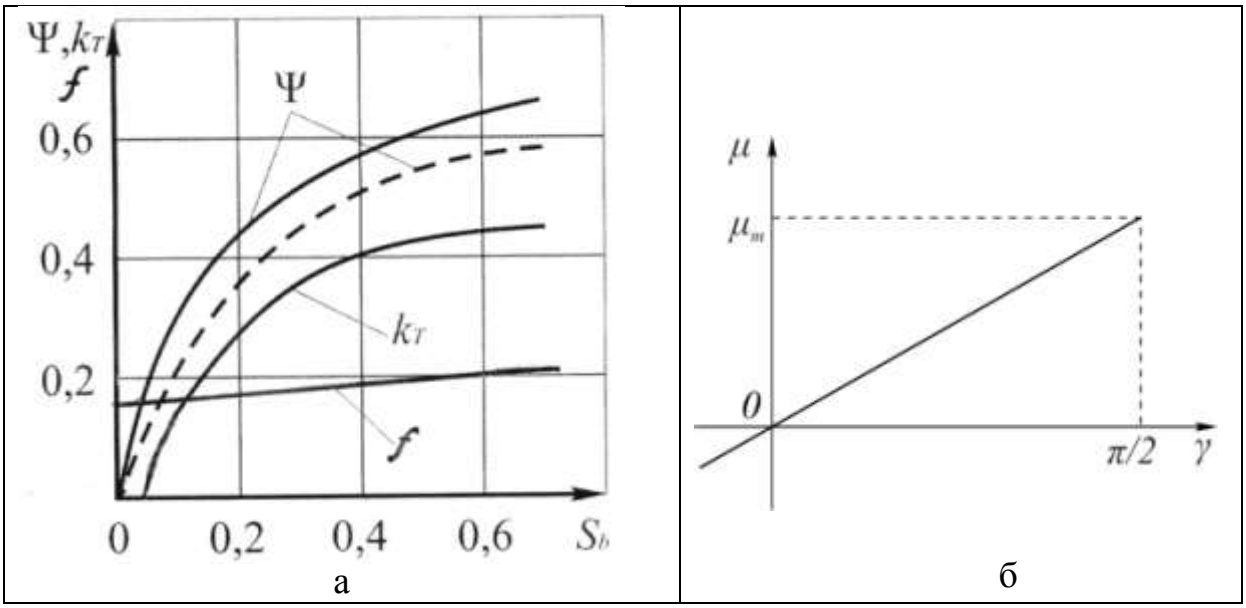


Рисунок 7 – Вид обобщенных характеристик $\Psi(S_b)$, $f(S_b)$ (а) и μ(ɣ) (б) при испытаниях колеса Лунохода-1 на кварцевом песке (штриховая линия – при имитации гравитационного поля Луны: $g_л$=1,62 м/с²)

Большой объем исследований жестких и металлоупругих колес был выполнен в грунтовом канале МВТУ им. Н.Э. Баумана по методике, позволяющей оценить ТСС колеса, включая коэффициенты сопротивления

грунта боковому перемещению, при имитации бортового способа поворот планетохода (рисунок 7, б) [12].

При моделировании нужно учитывать, что наиболее точные результаты экспериментов в грунтовых каналах получаются при коэффициентах буксования не превышающих значений примерно S_b = 0,8. При дальнейшем увеличении буксования, также, как и при малом буксовании, близком к нулю, сказываются краевые эффекты, неустойчивость процесса. Поэтому для описания зависимостей в этих зонах часто прибегают к степенным функциям. Применительно к задачам движения на поверхности Луны такая аппроксимация была предложена в работе [9]. Расчетные формулы затем уточнялись для конкретных типов грунта различными исследователями.

Уравнения движения динамической много массовой пространственной системы, полученные с учетом всей совокупности связей ее компонентов, на основе уравнений Лагранжа II рода, а также результаты моделирования подробно рассмотрены в [15]. Программа расчетов на электронно-цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ) «БЭСМ-4», (1975 год, разработчик программы к.т.н. Г.С. Белоутов), позволяла моделирование бортового поворота и прямолинейного движения планетохода на плоской опорной поверхности. Движение по такой поверхности на крутые подъемы является основой расчетной схемы для выбора параметров тягового электромеханического привода.

Расчетные параметры модели лунохода, которая была ориентирована на оценку предельной грузоподъемности самоходного шасси, даны в таблице 1, они отличаются от реальных параметров советских луноходов в части полной массы, которая для Лунохода-1 составляла 756 кг, а для Лунохода-2 – 840 кг. Реальные луноходы имели соответственно и меньшие значения подрессоренной массы, а также меньшие моменты инерции относительно осей подвижной системы координат. Все другие параметры модели соответствуют конструкции и характеристикам самоходного шасси Лунохода-1 и Лунохода-2.

Изменение скорости движения Лунохода-1 производится путем различного соединения двух дублирующих обмоток якоря. На первой скорости они соединены последовательно, на второй – параллельно. Механические характеристики тяговых двигателей постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением в координатах «крутящий момент – скорость вращения» представляют собой две прямые линии, соединяющие значения пускового момента при коротком замыкании якорных обмоток и значение скорости холостого хода. Максимальная величина крутящего момента на 2-ой скорости движения существенно ограничивалась блоком автоматики шасси, что также учтено в математической модели.

При расчетах, на основании результатов испытаний в грунтовых каналах, предполагалось, что ТСС колес практически не зависят от

количества проходов колес и, в первом приближении, их можно принять одинаковыми для всех восьми колес.

Таблица 1 Расчетные параметры модели советских луноходов

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Величина
Полная масса	m, *кг*	1100
Масса подрессоренной части	m_P, *кг*	990
Момент инерции подрессоренной части относительно осей x и y	J_x, *кг·м²* J_y, *кг·м²*	251 285
Момент инерции лунохода относительно оси z	J_z, *кг·м²*	322
Момент инерции ротора двигателя	J_D, *кг·м²*	0,00015
Проекция расстояния на ось x от центра масс до осей качания рычагов подвески	l_1^*, *м* l_2^*, *м* l_3^*, *м* l_4^*, *м*	0,656 0,590 -0,484 -0,550
Колея	B, *м*	1,6
Передаточное отношение редуктора	u_g	216
Крутящий момент на валу двигателя при токе короткого замыкания на 1-ой и 2-ой скоростях	M_{D01}, *Н·м* M_{D02}, *Н·м*	2,85 1,37
Коэффициенты электромеханических характеристик двигателя	k_M, *Н·м·с* k_D, *Н·м·с* k_E, *А/Н·м*	0,00624 0,0022 0,175
Результирующая крутильная жесткость цепи «вал двигателя – колесо»	c_g, *Н·м/рад*	0,1
Номинальное значение КПД редуктора	η	0,85
Плечо рычагов подвески	r_P, *м*	0,256
Радиус качения колеса (по грунтозацепам)	r_k	0,255
Угловая жесткость подвески крайних колес средних колес	c_{Y1}, *Н·м/рад* c_{Y2}, *Н·м/рад*	515 223
Смещение центра масс по продольной оси	Δx, *м*	0

В качестве примера результатов моделирования, на рисунке 8 приведены графики изменения крутящих моментов при движении в старт – стопном режиме на переднем (i=1), и кормовом (i=4) колесах, а также разгонные характеристики и параметры равномерного движения на первой и второй скорости.

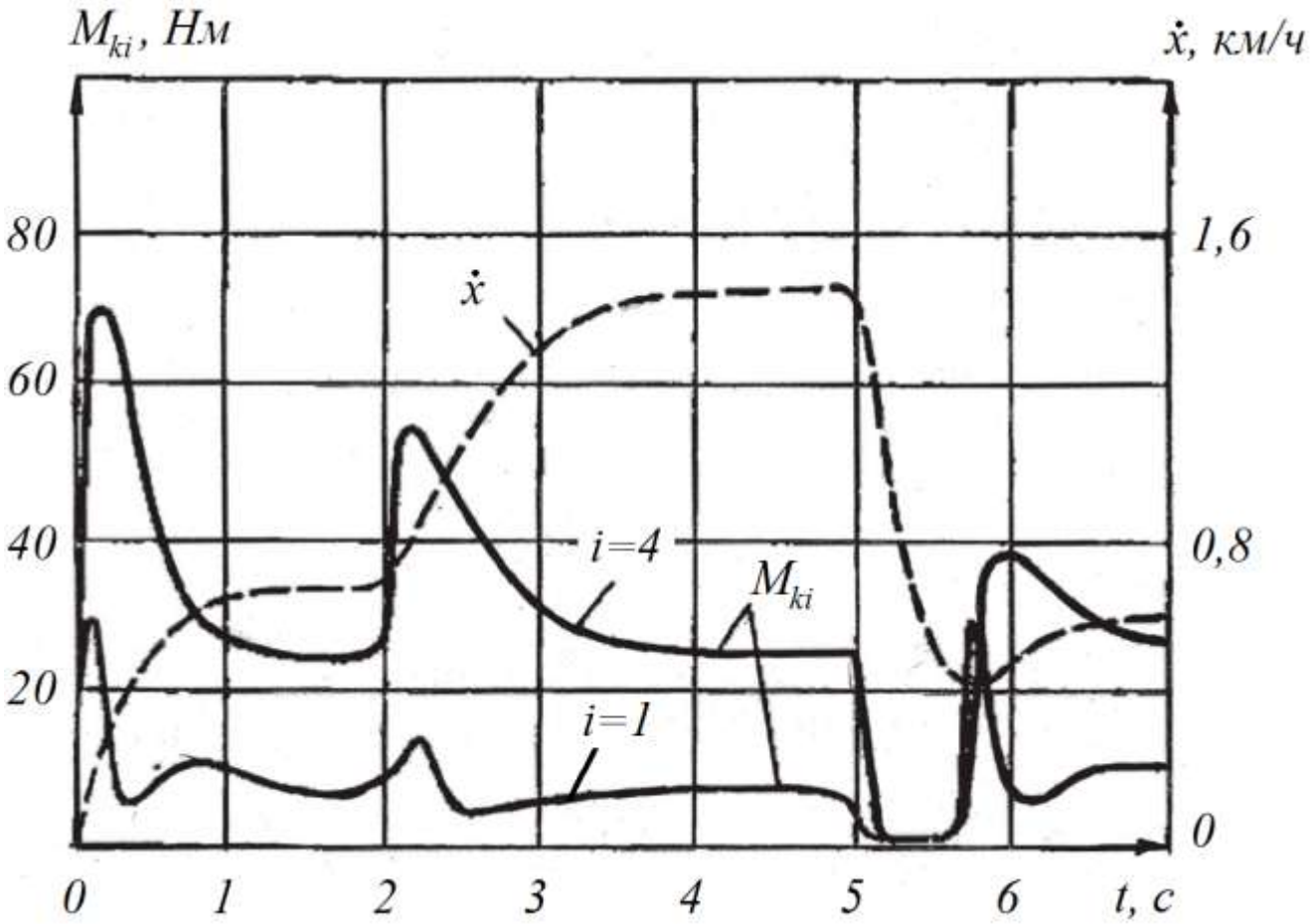


Рисунок 8 - Результаты моделирования режимов работы приводов переднего и кормового мотор-колес при движении на подъем α =10°

Исследования проводились для трех типов грунта с различными ТСС. Результаты моделирования (рисунок 8) относятся к движению по грунту, для которого коэффициент сопротивления движению f = 0,12, а коэффициент полной тяги на предельных углах подъема достигает Ψ_{max} = 0,67. Это примерно соответствует одной из физических моделей лунного грунта, представляющей размельченную слежавшуюся крупно зернистую (размер частиц более 1 мм) пемзу. В период времени (в секундах) 0-2 моделируется разгон и движение на 1-ой скорости, 2-5 – переключение на вторую скорость, 5-6 – переключение на первую скорость.

На рисунке 9 показана зависимость скорости движения от угла подъема, начиная от движения под гору α= -10°, до движения на подъем α= 20°. Здесь моделировалось движение по грунту №2, на котором f = 0,17, а Ψ_{max} = 0,61. Это примерно соответствует взрыхленному кварцевому песку.

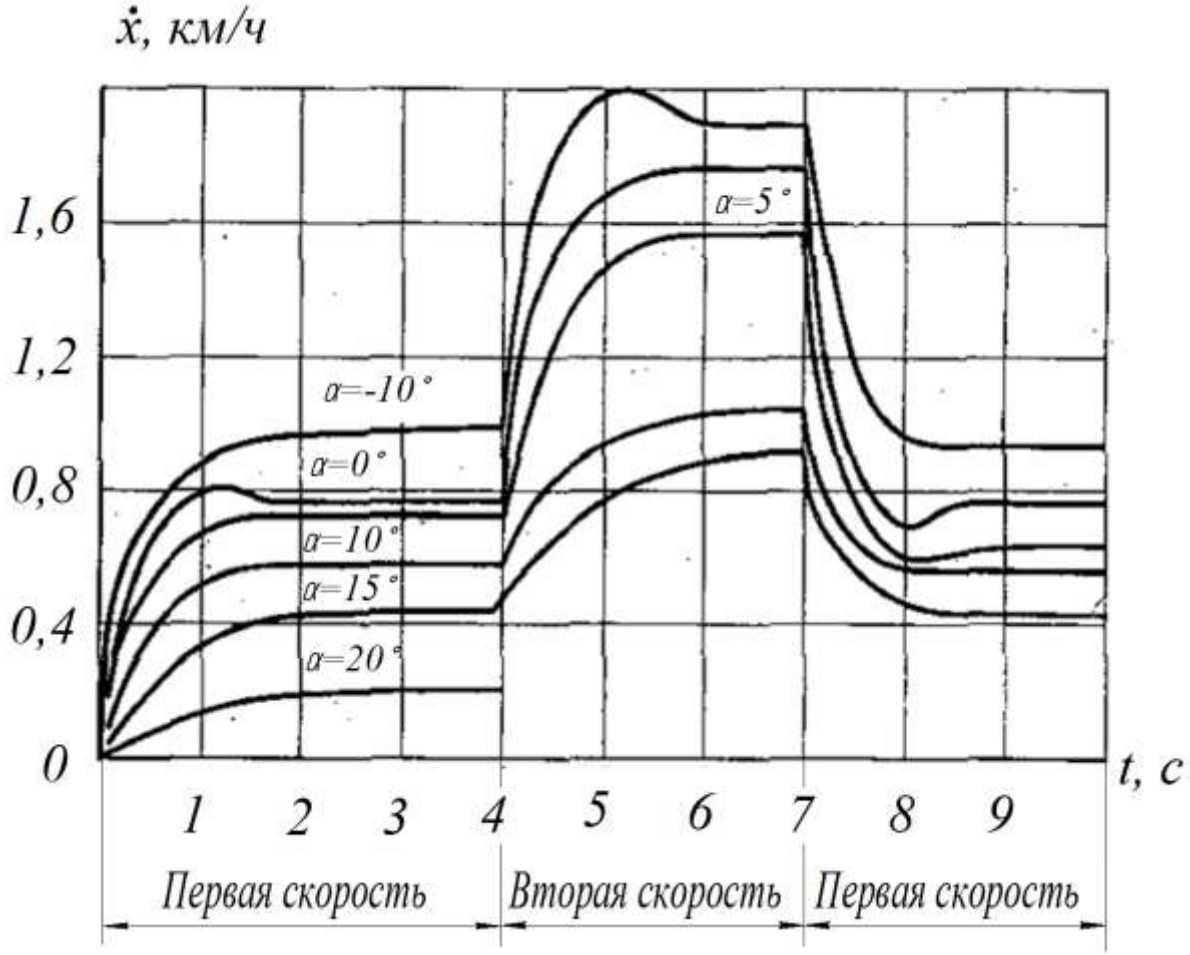


Рисунок 9 – Разгонные и тормозные характеристики модели Лунохода-1 на подъемах различной крутизны

Из приведенных на рисунках графиков видно, что учет буксования колес существенно сказывается на характере движения модели лунохода. При отсутствии управления скоростями вращения колес, каждое мотор-колесо работает в индивидуальном силовом и скоростном режимах. Они характеризуются существенным перераспределением крутящих моментов при движении на подъемах и снижением уровней динамических перегрузок при пуске и переключении вследствие проскальзывания колес. Скорость движения лунохода зависит от крутизны подъема и определяется кормовыми колесами.

Таким образом, разработанные в прошлом веке методы математического моделирования позволяют учесть особенности конструкции планетоходов и все существенные характеристики его взаимодействия со средой в системе «местность – машина». Предложенные подходы к разработке расчетных схем, включая уравнения неголономной связи колес с деформируемым грунтом, сохраняют актуальность. Однако алгоритмы, программное обеспечение и вся методология компьютерного моделирования движения планетоходов,

проектный облик которых первично создается цифровыми методами, безусловно, должны соответствовать современному уровню.

3 Обоснование выбора и проверка адекватности метода компьютерного моделирования

В рамках конференции «Современное машиностроение: наука и образование» уже докладывались материалы дизайнерских аспектов моделирования планетоходов [20]. В настоящем докладе рассматриваются вопросы моделирования их движения.

В современной практике моделирования работы сложных технических систем, включающих, как и в нашем случае, связи различного типа – механические, электрические, информационные, наиболее часто встречаются два подхода к составлению модели: блочно-ориентированный и объектно-ориентированный. Оба подхода базируются на применении унифицированных языков программирования, UML – unifed modeling language [21].

Суть первого подхода состоит в том, что диаграмма математической модели, которая является воплощением программы и алгоритма ее реализации на компьютере, представлена набором блоков, каждый из которых выполняет какую-либо математическую функцию и выдает соответствующий сигнал. Связь блоков осуществляется посредством линий со стрелками, которые указывают направление действия сигналов и их последовательность и только в одном направлении.

Применение блочно-ориентированного моделирования является сильным инструментом для моделирования математически «хорошо» описанных систем, но зачастую при исследовании сложных, многокомпонентных объектов и влияющих на них факторов, такой тип имитационной симуляции не целесообразен. Так, например, блочно-ориентированная модель PTC ПК, при практическом применении «разрастается» на такое большое количество блоков, что серьезно затрудняет прикладные проектно – компоновочные исследования.

Основу объектно-ориентированных моделей составляют блоки, представляющие математические модели объектов, из чего и получилось название метода. Это позволяет при составлении модели пользоваться уже отработанным программным обеспечением, не требующим очередного математического описания. Поскольку количество и качество моделей непрерывно увеличивается, диапазон их выбора очень широк: от твердого тела до модели судна, а получаемые результаты нисколько не уступают аналитическому решению [22].

Каждый из блоков в зависимости от своего назначения содержит необходимое количество условных входов и выходов. Условными они являются потому, что нет определенного направления следования сигнала, как в блочно-ориентированном типе моделирования. Вместо сигнала здесь

используются силовые воздействия, определяемые третьим законом Ньютона: при воздействии на какую-либо часть модели, изменения отражаются на всех других ее частях. Качество объектно-ориентированного моделирования определяется правильным выбором моделей и связей, наиболее полно отражающих реальные процессы.

Как и в предыдущем случае, здесь используются и другие типы блоков, которые позволяют выполнять различные математические операции, в том числе, например, возможность реализации алгоритмов системы управления.

Для проверки адекватности метода применительно к одной из важных практических задач оценки распределения нормальных реакций и, соответственно, тяговых сил по колесам планетохода, в проекте разработана модель самоходного шасси Лунохода-1. Ограничение задач моделирования позволяет существенно упростить приведенные в предыдущем разделе расчетные схемы шасси при использовании исходных данных таблицы 1.

В частности, здесь использована отработанная модель упруго-демпферного взаимодействия колес с плоской опорной поверхностью, изменяющей свое положение относительно горизонта. При этом отличие составленной модели от расчетных схем, представленных на рисунках 2 и 4, состоит в том, что упруго-демпферная связь колес заведена не между колесами и корпусам, а между колесами и опорной поверхностью. В то же время в новой модели Лунохода-1 учтены различия жесткостей подвесок средних и крайних колес, так что это различие не должно отражаться на конечных результатах расчета величины нормальных реакций, действующих на колеса.

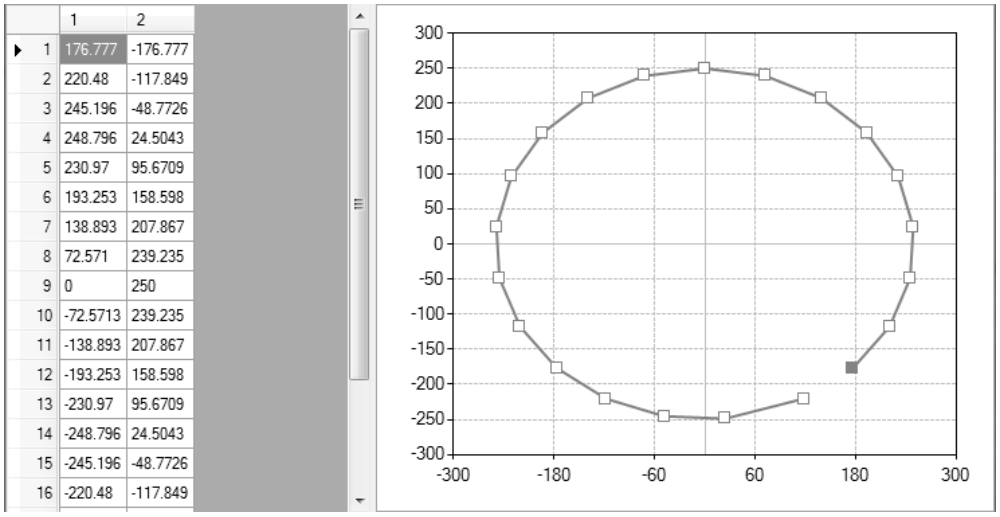
В диаграмме модели, представляющей визуализацию алгоритмов расчета, каждое кинематическое звено описывается блоком, являющимся моделью твердого тела. В свойствах блока могут быть заданы массово-инерционные характеристики звена, которые будут использоваться при моделировании. Эти блоки соединяют между собой с помощью других элементов, которые задают кинематические связи с заданным количеством степеней свободы. «Вход» и «выход» блока кинематической связи позволяют определить для модели, какое из звеньев будет двигаться относительно другого.

Безусловным преимуществом объектно-ориентированного моделирования является то, что в качестве моделей твердых тел могут быть использованы трехмерные модели объектов, построенные в CAD системах, сохраненные в одном из стандартных форматов. Таким образом, при импорте твердотельных моделей в среду имитационного моделирования автоматически переносятся все массово-инерционные характеристики деталей и сборок, что значительно ускоряет создание и повышает точность соответствия конструкции и ее имитационной модели.

Кроме того, во всех видах объектно-ориентированного моделирования процесс симуляции сопровождается трехмерной динамической визуализацией поведения объекта, что еще больше расширяет возможности конструкторов и исследователей для анализа и понимания сущности протекающих при движении процессов.

Задавать движение для кинематических связей можно двумя способами: законом изменения перемещения, скорости или ускорения, либо законом изменения усилия или момента. В настоящей статье используется задание внешних сил и моментов, действующих на колеса и определяемых с помощью методов, рассмотренных в предыдущем разделе. Однако современные программные возможности в принципе позволяют применять и иные методы решения задачи плоских контактных статических взаимодействий не только для случая деформации грунта под жестким колесом, но и при деформации тел произвольной формы с различными характеристиками. Поэтому этот вопрос ниже рассмотрен более подробно.

В работе [23], где рассмотрены общие подходы к формализации расчетных схем и алгоритмов, все взаимодействующие по плоскости тела называются полигонами. Форма взаимодействующих тел определяется путем ввода координат точек на плоскости. Пример задания точек для колеса представлен на рисунке 10.



	1	2
1	176.777	-176.777
2	220.48	-117.849
3	245.196	-48.7726
4	248.796	24.5043
5	230.97	95.6709
6	193.253	158.598
7	138.893	207.867
8	72.571	239.235
9	0	250
10	-72.5713	239.235
11	-138.893	207.867
12	-193.253	158.598
13	-230.97	95.6709
14	-248.796	24.5043
15	-245.196	-48.7726
16	-220.48	-117.849

Рисунок 10 – Задание полигона колеса при моделировании контактных взаимодействий

Блок, имитирующий контакт колес с опорной поверхностью использует модель упруго-демпферного взаимодействия двух тел, основными задаваемыми параметрами которого являются:

k_A – коэффициент жесткости для зоны контакта, имеющий размерность Н/м^2;

b_n – коэффициент демпфирования в направлении нормали, Н·с/м;

μ_τ – коэффициент трения в тангенсальном направлении.

Расчетная модель для общего случая взаимодействия двух полигонов представлена на рисунке 11.

где $V_k, V_{k+1}, \dots, V_{l-1}, V_l$ – элементы массива, описывающие форму полигона *V;*

$U_i, U_{i+1}, \dots, U_{j-1}, U_j$– элементы массива, описывающие форму полигона *U;*

S_v, S_{v+1} – отрезок, соединяющий точки, принадлежащие границам полигонов *U* и *V;*

A – площадь зоны контакта;

C_A – геометрический центр зоны контакта А полигонов;

$F_{k,1}$– сила контактного взаимодействия для зоны контакта с порядковым номером 1 (так как модель может быть применена к телам более сложной формы, где возможны несколько точек контакта).

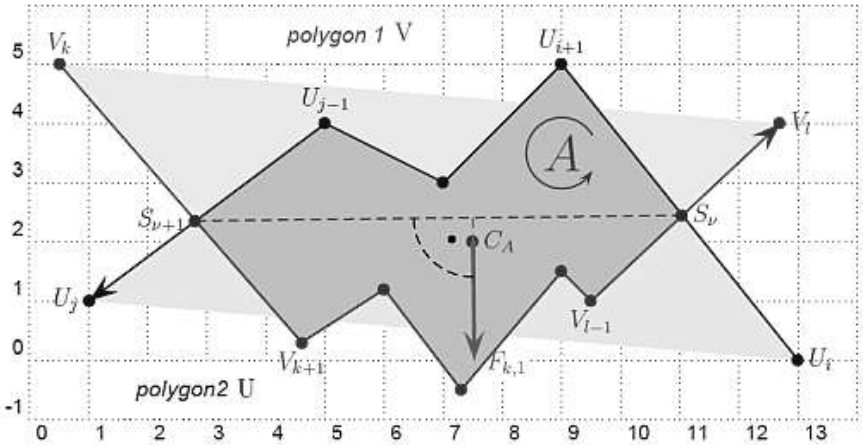


Рисунок 11 – Общий случай контактного взаимодействия полигонов U и V

Программа вычисляет массив точек, которые образуют зону контакта двух тел произвольной формы. Контактная сила имеет две составляющие F_n и F_t , действующие в нормальном и тангенциальном направлении соответственно. Тангенциальное направление определяется как вектор, лежащий на отрезке S_v, S_{v+1}, перпендикулярно ему строится вектор нормали. Нормальная силы вычисляется как сумма силы упругости F_s и демпфирующей силы F_d:

$$\overrightarrow{F_n} = \overrightarrow{F_s} + \overrightarrow{F_d} = (-k_A \cdot A \cdot \vec{n}) + (-b_n \cdot \vec{n}^T \cdot \Delta\vec{v} \cdot \vec{n}) \quad (7)$$

или

$$\overrightarrow{F_n} = -(k_A \cdot A + b_n \cdot \vec{n}^T \cdot \Delta\vec{v}) \cdot \vec{n} \quad (8)$$

где $\Delta\vec{v}$ – разница скоростей между двух контактирующих тел.

Тангенциальная составляющая силы контакта определяется как:

$$\overrightarrow{F_t} = F_f \cdot \vec{t} \quad (9)$$

$$F_f = -\mu_\tau \cdot \left|\overrightarrow{F_n}\right| \cdot sign(\vec{t}^T \cdot \Delta\vec{v}) \quad (10)$$

где F_f – сила трения;

$\vec{t}$ – вектор тангенциального направления.

Полученная модель контакта в «чистом виде» не подходит для моделирования движения колеса по лунному грунту, так как не отражает отмеченные в работе [16] и в предыдущем разделе настоящей статьи физические особенности взаимодействия с такими грунтами жестких колес луноходов и марсоходов. В частности, не учитываются необратимый характер деформаций грунта и возникающее при этом силы сопротивления качению колеса. Кроме того, такое представление дает на графиках моделирования ненужный «шум» - фоновые колебания сил вокруг среднего значения.

Однако при таком моделировании также возможно использование зависимостей коэффициента полной тяги и коэффициента сопротивления движению от коэффициента буксования, пример которых приведен на рисунке 7.а. В первом приближении эти функции для рассматриваемого взаимодействия могут быть записаны в виде:

$$\Psi(S_b) = 0{,}1 + 0{,}8(1 - e^{-\frac{S_b}{\tau}}) \quad (11)$$

где τ – постоянная величина, принятая равной 0,3.

$$f(S_b) = 0{,}15 + 0{,}08 \cdot S_b, \quad (12)$$

а соответствующие силы тяги и сопротивления движению определены по формулам (6).

Для определения фактической скорости движения модели «Лунохода-1», в диаграмму объектно-ориентированной модели добавлен блок одометра.

Оценка адекватности составленной модели проводилась по коэффициенту загрузки $i-$го колеса, который представляет собой фактически реализованный динамический фактор этого мотор-колеса при движении на реальной трассе или при моделировании такого движения [7, 15]:

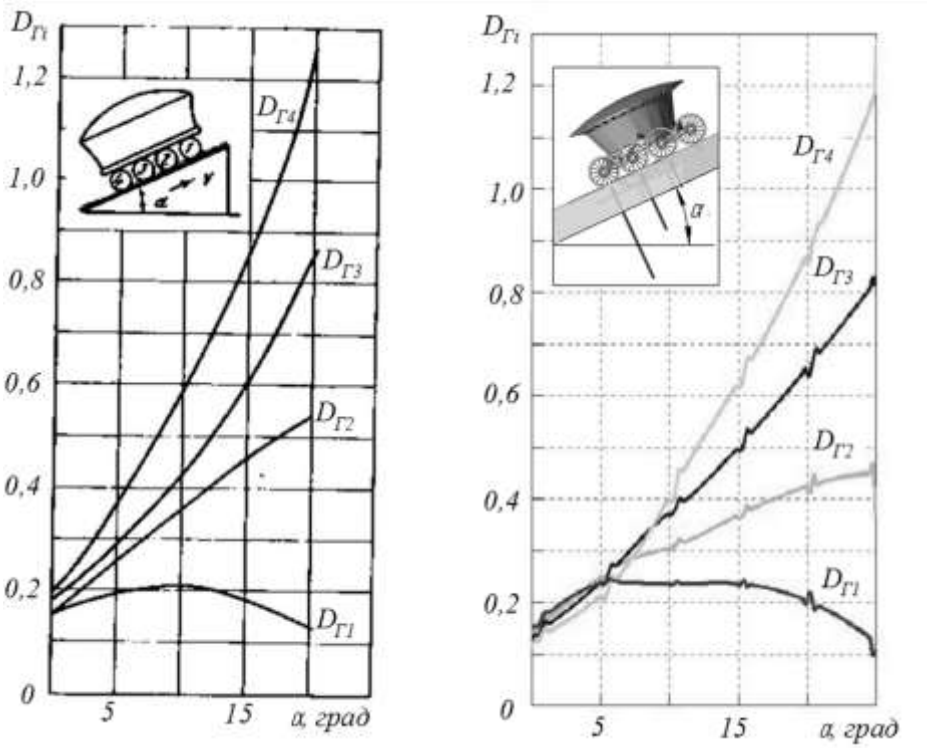
$$D_{\text{г}i} = \frac{nP_{ki}}{m \cdot g_{л}} \quad (13)$$

Главным преимуществом применения безразмерных коэффициентов загрузки является их универсальность. Они позволяют сравнивать эффективность функционирования отдельных мотор-колес планетоходов с различной массой и колесной формулой. Восьми колесный Луноход-1, например, по этим показателям можно сравнить с шести колесными американскими марсоходами и перспективным четырех колесным РТС ПК [24].

Ниже представлены результаты обработки телеметрической информации с борта Лунохода-1 (рисунок 12.а) [8] и результаты объектно-ориентированного моделирования (рисунок 12.б).

В обоих случаях рассматривается движение только на угол наибольшего подъема, когда курсовой угол Θ в неподвижной системе координат равен нолю (рисунок 2) и движение только на первой скорости, поскольку Луноход-1 на второй скорости практически не работал [25]. Смещение центра масс относительно поперечной оси симметрии $\Delta x=0$. Графики на рисунке 12.а построены по точкам, графики на рисунке 12.б моделируют нескольких отдельных заездов при непрерывном движении в каждом из заездов.

Моделирование начинается на горизонтальной поверхности, дискретность угла подъема при моделировании начала заездов составляет 5°. В пределах каждого заезда моделируется увеличение угла подъема с некоторой равномерной скоростью путем вращения опорной плоскости относительно начала неподвижной системы координат. На графиках рисунка 12.б заметны следы динамических процессов при трогании с места на каждом новом заезде.



а) б)

Рисунок 12 – Сравнение зависимости коэффициентов загрузки мотор-колес от угла подъема: а – результаты экспериментальных исследований Лунохода-1; б – результаты объектно-ориентированного моделирования

Как видно из рисунка 12, составленная модель взаимодействия жесткого колеса с грунтом адекватна реальному процессу перераспределения коэффициентов загрузок мотор-колес одного борта при преодолении подъемов различной крутизны.

Таким образом, составленную модель можно использоваться для дальнейших исследований системы передвижения РТС-ПК.

4 Объект исследований – робототехническая система «помощник космонавта» (РТС ПК)

Главные особенности вновь разрабатываемой системы передвижения определяются способом поворота, типами и характеристиками движителя, тягового привода и подвески. В рамках проекта Минобрнауки № 14.576.21.0050 выбрана СП с кинематическим способом поворота, включающая четыре опорно – движительных модуля (ОДМ), каждый из которых связан с рамой с помощью балансирной подвески, выполненной по оригинальной схеме, находящейся в процессе патентования (рисунок 13).

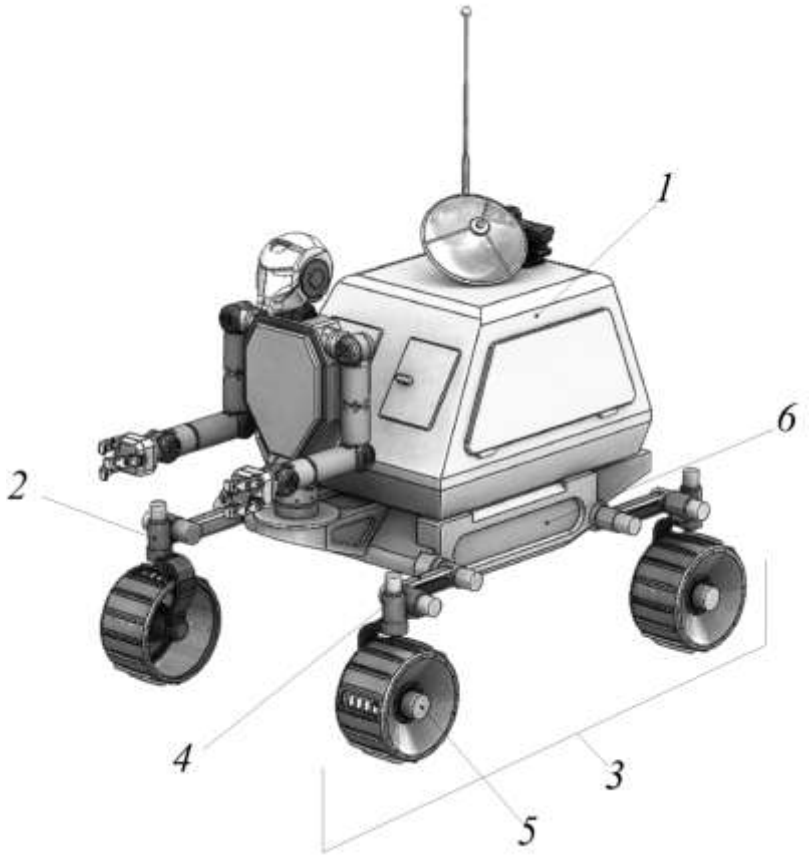


Рисунок 13 – Состав РТС ПК: 1- контейнер с навесным оборудованием; 2- опорно-движительный модуль; 3- система передвижения; 4- приводной двухрычажный механизм шагания; 5- мотор-колесо; 6 – рама системы передвижения

Каждый ОДМ включает жесткое колесо со встроенным в его ступицу тяговым приводом, связанным с подвеской с помощью двух рычажного равноплечего приводного механизма шагания (МШ) специальной конструкции, обеспечивающей возможность работы МШ либо в режиме колесного шагания, либо в режиме активной (адаптивной подвески).

Таким образом, и движитель, и подвеска ОДМ являются комбинированными. Движитель обеспечивает возможность комбинации колесного и колесно – шагающего режимов движения, когда свободные концы равноплечего МШ, оси которых связаны с колесом и подвеской перемещаются поступательно в определенной последовательности, определяемой заданным типом походки. На горизонте это будет перемещение параллельно поверхности. Колесный режим является основным, автоматический переход в колесно – шагающий режим производится только при превышении безопасной величины буксования колес планетохода для исключения опасности потери подвижности на грунтах с низкой несущей способностью.

Одновременно обеспечивается комбинация пассивной балансирной подвески при движении по невысоким неровностям и активной подвески, адаптация которой к высоким неровностям осуществляется путем работы упомянутых МШ в режиме регулирования относительного положения колес и корпуса по вертикали. На горизонте свободные концы упомянутых равноплечих МШ будут при этом перемещаться перпендикулярно опорной поверхности. Режим движения с пассивной подвеской, не требующей расхода энергии, является основным при движении по связным грунтам и грунтам с низкой несущей способностью. При движении по произвольному профилю, расчетным аналогом которой ниже считается синусоида, питание на приводы МШ автоматически подается в случае, если ход пассивных подвесок окажется меньшим амплитуды синусоидального профиля.

Принципы построения, опорная поверхность модели системы передвижения РТС-ПК и принятые упрощения, идентичны положениям, рассмотренным в предыдущем разделе. На рисунке 14 показано окно визуализации с привязкой к времени плоского моделирования, когда режимы работы мотор-колес одной оси считаются полностью идентичными. В окне можно непрерывно наблюдать как сам процесс движения графической модели, так и мгновенные значения расчетных реакций, действующих на колесо в контакте с грунтом.

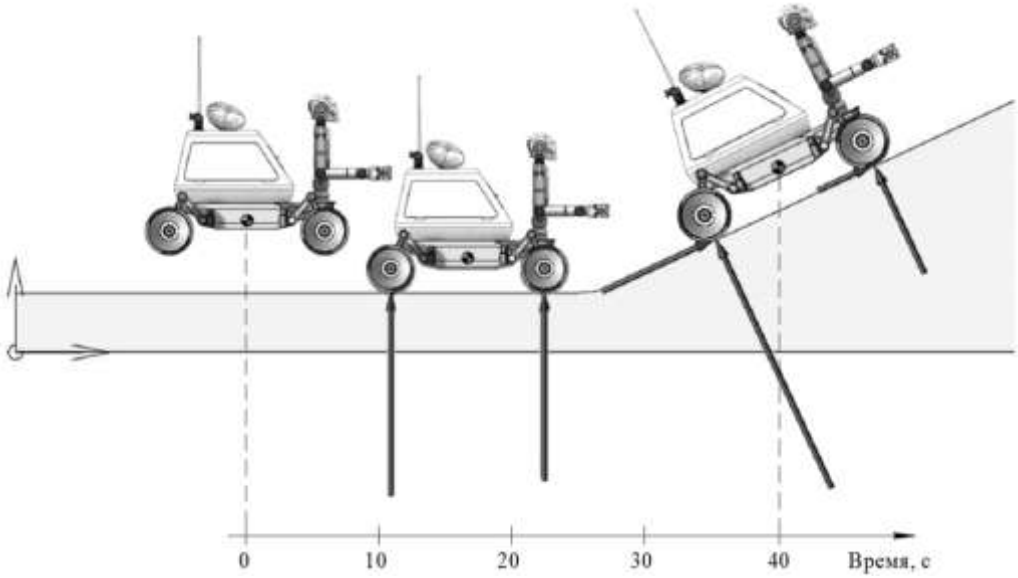


Рисунок 14 – Окно визуализации с привязкой по времени моделирования.

Предполагается, что посадка модели четырех колесного лунохода осуществляется непосредственно на ходовые колеса, как это сделано, например, в экспедиции на Марс действующего марсохода Curiosity. Следовательно, в начальный момент моделирования (t = 0) ходовая часть СП не взаимодействует с опорной поверхностью, положение рычагов балансирной подвески определяется нижними ограничительными упорами корпуса. Далее, под действием лунной силы тяжести, модель находится в свободном падении до момента контакта с опорной поверхностью. Рассматривается расчетный случай одновременного контакта всех четырех колес.

На рисунке 15 показаны результаты моделирования движения РТС ПК на рассмотренной выше модели грунта, которая соответствует рисунку 7.а. Так как момент соприкосновения колеса и грунта (t = 0,5с) носит ударный характер, то возникают скачки нормальных реакций и некоторый динамический, быстро затихающий на деформируемом грунте, процесс (рисунок 15, а, г).

Включение двигателей (t = 2с), вызывает небольшой разно направленный скачок нормальных реакций и появление тяговых усилий (рисунок 15.в), которые на горизонтальной поверхности, при небольших нагрузочных моментах, не оказывают заметного влияния на перераспределение загрузок мотор-колес.

При t = 20с, передние колеса въезжают на наклонную поверхность. Вход РТС ПК в режим преодоления подъема, вызывает пробуксовку колес, увеличивающуюся по мере увеличения угла наклона контейнера (рисунок 15.б). При этом увеличиваются и нагрузочные моменты, и различия в эффективности работы передних и задних колес. В момент времени t = 30 с, на наклонной части трассы оказываются и кормовые колеса.

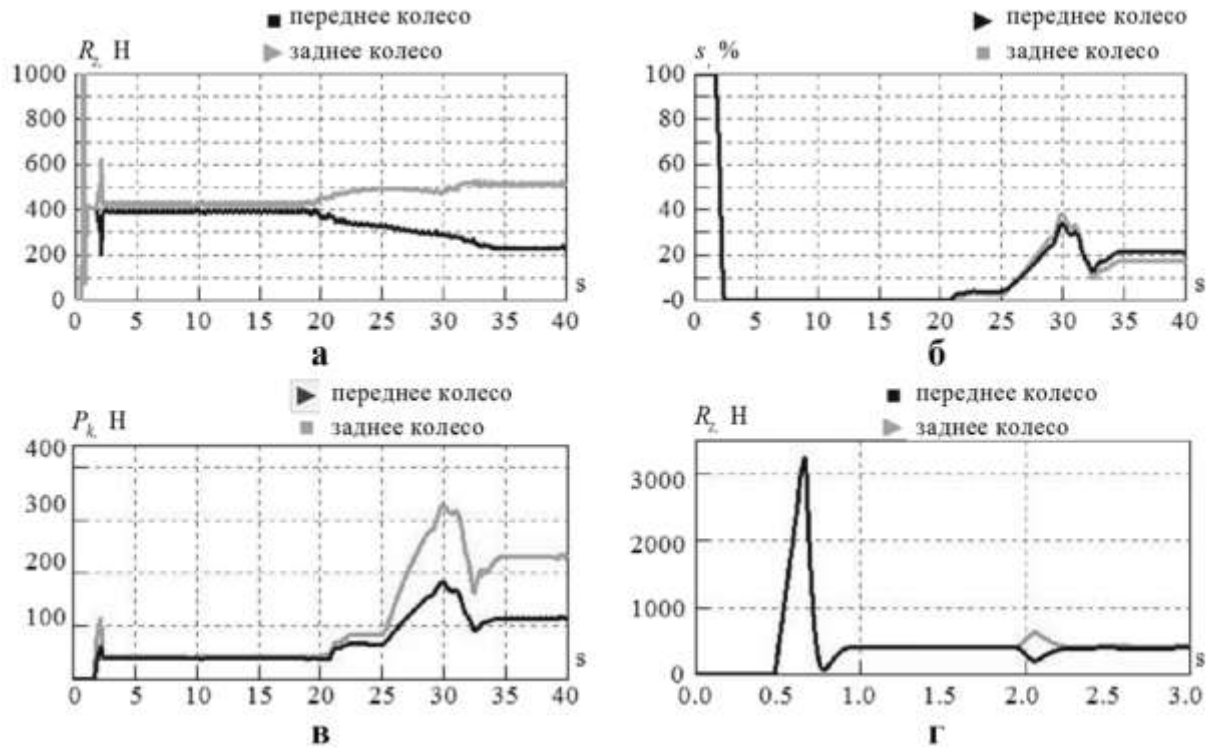


Рисунок 15 – Результаты моделирования движения системы передвижения по ровной и наклонной поверхности с учетом разработанной модели грунта: а – нормальные реакции на колесах; б – буксование; в – сила тяги колес; г – нормальные реакции на колесах в первые 3 секунды моделирования

Затем процесс стабилизируется, значительные реактивные моменты колес, действующие на корпус при преодолении крутых подъемов, приводят к картине перераспределения коэффициентов загрузки, отраженной на рисунке 15.а и 15.в, а также на рисунке 12. Низкая эффективность передних и большая перегрузка кормовых колес, является главным недостатком индивидуального электромеханического привода транспортных машин. Выравнивание режимов работы мотор-колес является одной из задач и, соответственно критериев качества, адаптивных подвесок.

Нужно отметить, что первоначальный скачок коэффициента буксования (рисунок 15.б) не связан с реальным процессом и отражает нерешенные проблемы программного расчета в момент времени, когда и теоретический, и фактически пройденный путь равен нулю.

В настоящее время завершается отработка модели движения РТС-ПК по неровностям, когда механизмы шагания работают в качестве активной подвески. При этом возможно, например, сохранять горизонтальное положение контейнера при движении по расчетным синусоидальным поверхностям (рисунок 16).

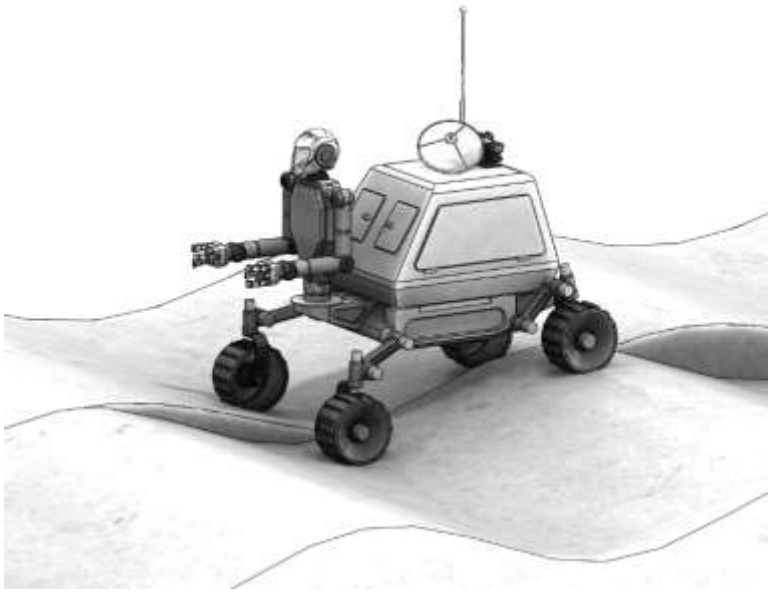


Рисунок 16 – Положение РТС-ПК на синусоидальной поверхности

В этой модели амплитуда синусоидальной поверхности выбрана равной радиусу колеса, а синусоиды под колесами противоположных бортов смещены на пол периода, что приводит к пространственной динамической задаче.

Одной из задач моделирования адаптивных свойств подвески является оптимизация алгоритмов управления механизмами шагания с учетом ограничений траектории поступательного движения свободных осей МШ. При этом предполагается, что модель, так же, как и проектная РТС ПК, снабжены не только традиционными датчиками, полностью определяющими конфигурацию и кинематические характеристики машины, но и датчиками, измеряющими силовые параметры взаимодействия каждой опоры с опорной поверхностью.

Выводы

Так же как методы исследования многих сложных технических систем, моделирование движения планетоходов проходит путь от математических методов, когда ЭЦВМ помогали исследователям выполнить большие объемы сложных расчетов, к компьютерным имитациям, когда исследование свойств новых объектов происходит в программной среде компьютера, в котором этот объект был создан. Преимуществами новых методов, например, метода объектно-ориентированного моделирования является высокая оперативность создания модели, меньшие временные затраты, возможность визуализации происходящего процесса, возможность импортирования объектов из CAD систем, что незаменимо на ранних стадиях разработки проектно-технических решений на альтернативной основе.

В то же время сохраняют актуальность предложенные ранее подходы к разработке расчетных схем, учитывающих особенности конструкции планетоходов и взаимодействия со средой в системе «местность – машина».

Представленные модели в дальнейшем позволят проводить анализ поведения СП при движении не только в колесном режиме, но и в колесно-шагающем, и в режиме адаптации к неровной поверхности. Дальнейшее развитие модели предполагает учет различного навесного технологического оборудования и исследование поведения РТС ПК в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В.Ф., Бируля А.К., Сиденко В.М. Проходимость колесных машин по грунту. М.: Автотранспорт, 1959.
2. Задорожный В.И. Показатели тягово–сцепных качеств многоколесного движителя. В сб. «Автомобильный транспорт», выпуск 2, Киев, «техника», 1966.
3. Яковлев А.И. Конструкция и расчет электромотор – колес. М.: Машиностроение. 1970.
4. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972, с. – 9 – 139
5. Bekker M.G. Track and Wheel Evaluation. Mashine Design. January 21, 1960.
6. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина. М.: Машиностроение. 1970. С. 240 – 309.
7. Исследование механических свойств лунного грунта на самоходном аппарате Луноход-1. А.К. Леонович, Громов В.В., Рыбаков А.В. и др.// Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Под ред. А.П. Виноградова. Москва: Наука, 1971. С. 78 – 88.
8. Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Черкасов И.И. Шварев В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. М.: Машиностроение, 1976. – С. 103-199.
9. Геолого – морфологические исследования лунной поверхности. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Зезин Р.Б. и др. // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Редактор Барсуков В.Л. Москва: Наука. 1978. Том 2. - С. 102 – 135.
10. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунт Луны. Москва: Наука. 1975.140 с.
11. Авотиньш Е.В., Бородачев Б.В., Васин Ю.И. и др. Исследование работоспособности самоходного шасси на Луне // Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1. Редактор Барсуков В.Л. М.: Наука. 1978. Том 2. - С.47 – 66.
12. Наумов В.Н., Забавников Н.А. Исследование взаимодействия одиночного колеса с грунтом применительно к задаче оценки проходимости транспортного средства // Передвижение по грунтам

Луны и планет. Редактор Кемурджиан А.Л. М.: Машиностроение.1986. – С. 53 – 107.
13. Авотин Е.В., Кемурджиан А.Л. Устойчивость движения планетоходов. В книге «Динамика планетохода» под ред. А.Л, Кемурджиана и Б.Н. Петрова. Москва: Наука, гл. ред. Физ. мат. лит. 1979. С. 196 -330.
14. Шпак Ф.П., Кемурджиан А.Л., Авотин Е.В. Колебания планетохода. В книге «Динамика планетохода» под ред. А.Л, Кемурджиана и Б.Н. Петрова. Москва: Наука, гл. ред. Физ. мат. лит. 1979. С. 331 - 432.
15. Маленков М.И., Кемурджиан А.Л. Тяговая динамика планетохода // Динамика планетохода. Редакторы Петров Б.Н. и Кемурджиан А.Л. М.: Наука, главная ред. Физ.-мат. литературы. 1979. – С. 56 – 195.
16. Математическое моделирование и ходовые испытания планетоходов. Кажукало И.Ф., Маленков М.И., Назаренко Б.П. и др. // Передвижение по грунтам Луны и планет. Под ред. А.Л.Кемурджиана. Москва: Машиностроение. 1986. С. 186 – 261.
17. Маленков М.И., Волов В.А., Гусева Н.К., Лазарев Е.А. Анализ подвижности марсоходов для разработки систем передвижения и алгоритмов управления планетоходами нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. №1. – с.82 – 95.
18. Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms // Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 11. - P. 824–831.
19. Громов В.В., Кемурджиан А.Л. Методы и устройства для оценки условий передвижения по грунтам Луны и планет. // Передвижение по грунтам Луны и планет. Под ред. А.Л.Кемурджиана. Москва: Машиностроение. 1986. С. 7 -52.
20. В.А.Дьяченко, М.И.Маленков, Д.В.Сидоров. Поисковые дизайн – проекты планетоходов и интерьеров космических станций. // Труды конференции "Современное машиностроение. Наука и образование", С.-Петербург, СПбПУ, 2014. С. 501-512.
21. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 240 с.
22. Кузьменко Д.Н., Маленков М.И., Лазарев Е.А. Выбор концепции и предварительное моделирование движения самоходного шасси планетохода с адаптивной подвеской мотор-колес. // Материалы конференции «Неделя науки СПбПУ» . СПб.: Изд-во Политехн. университета, ИММиТ, часть 2. 2015. С. 6-9.
23. Greiner, G., Hormann, K.: Efficient Clipping of Arbitrary Polygons, Computer Graphics Group, University of Erlangen, Juli 2011.
24. Маленков М.И., Волов В.А. Сравнительный анализ компонентов ходовой части самоходных шасси планетоходов. // Известия ЮФУ. Технические науки. Ростов на Дону: ЮФУ, 2016. №1. – с.169 – 185.

25. Mikhail Malenkov. Self-propelled automatic chassis of Lunokhod-1: History of creation in episodes. Front. Mech. Eng. 2016. Volume 11, Issue 1. P. 60-86. DOI: 10.1007/s11465-016-0370-5.

M.I. Malenkov, D.N. Kuzmenko, E.A. Lazarev

METHODS AND SOME RESULTS OF THE MOTION SIMULATION OF PLANETARY ROVERS TAKING INTO ACCOUNT THE RELIEF AND SOIL PROPERTIES*

STC "ROCAD" JSC, St.Petersburg, Russia

Abstract

This paper considers issues of research road performance and engineering data optimization of adaptive locomotion systems during steps of planet rover's motion simulation for rugged topography, formed substantially with weakly cohesive soils that have low-load-bearing capacity. It is shown that in this case it is possible to build on methodological approach, that have emerged in the last century due to creation self - propelled chassis for Lunokhod-1 and Lunoknod-2 and subsequent working prototypes of planet rovers at OJSC VNIItransmash. The development of modern software allows creating models with higher quality by virtue of a sharp increase of efficiently, volume and reliability of the obtained information. Particularly, it becomes possible to visualize the movement of the planet rovers with wheel-walking locomotion system where walking mechanisms are used for adjusting the relative position of the wheels and the body vertically.

Keywords: systems of locomotion, control algorithm, wheel-walking locomotion system, model, adaptive suspension, walking mechanism, robotic system

REFERENCES

[1] Babkov V.F., Birulia A.K., Sidenko V.M. Prohodimost kolesnyh mashin po gruntu. M.: Avtotransport, 1959.
[2] Zadorojny V.I. Pokazateli tiagovo–scepnyh kachestv mnogokolesnogo dvijitelia. vol. «Avtomobilny transport», vypusk 2, Kiev, «tehnika», 1966.
[3] Iakovlev A.I. Konstrukciia i raschet elektromotor – koles. M.: Mashinostroenie. 1970.
[4] Agekin Ia.S. Vezdehodnye kolesnye i kombinirovannye dvijiteli. M.: Mashinostroenie, 1972, Pp. 9 – 139
[5] Bekker, M.G., Introduction to Terrain-Vehicle Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1969.
[6] Bekker M.G. Track and Wheel Evaluation. Mashine Design. January 21, 1960.
[7] Issledovanie mehanicheskih svostv lunnogo grunta na samohodnom apparate Lunohod-1. A.K. Leonovich, Gromov V.V., Rybakov A.V. i dr. //

Peredvijnaia laboratoriia na Lune Lunohod-1. Pod red. A.P. Vinogradova. Moskva: Nauka, 1971. Pp. 78 – 88.
[8] Kemurdjian A.L., Gromov V.V., Cherkasov I.I. Shvarev V.V. Avtomaticheskie stancii dlia izucheniia poverhnostnogo pokrova Luny. M.: Mashinostroenie, 1976. Pp. 103-199.
[9] Geologo – morfologicheskie issledovaniia lunno poverhnosti. Florenski K.P., Bazilevski A.T., Zezin R.B. i dr. // Peredvijnaia laboratoriia na Lune Lunohod-1. Redaktor Barsukov V.L. Moskva: Nauka. 1978. Vol 2. Pp. 102 – 135.
[10] Cherkasov I.I., Shvarev V.V. Grunt Luny. Moskva: Nauka. 1975. 140 p.
[11] Avotinsh E.V., Borodachev B.V., Vasin Iu.I. i dr. Issledovanie rabotosposobnosti samohodnogo shassi na Lune // Peredvijnaia laboratoriia na Lune Lunohod-1. Redaktor Barsukov V.L. M.: Nauka. 1978. Vol 2. Pp. 47 – 66.
[12] Naumov V.N., Zabavnikov N.A. Issledovanie vzaimodestviia odinochnogo kolesa s gruntom primenitelno k zadache ocenki prohodimosti transportnogo sredstva // Peredvijenie po gruntam Luny i planet. Redaktor Kemurdjian A.L. M.: Mashinostroenie.1986. Pp. 53 – 107.
[13] Avotin E.V., Kemurdjian A.L. Ustochivost dvijeniia planetohodov. V knige «Dinamika planetohoda» pod red. A.L, Kemurdjiana i B.N. Petrova. Moskva: Nauka, gl. red. Fiz. mat. lit. 1979. Pp. 196 -330.
[14] Shpak F.P., Kemurdjian A.L., Avotin E.V. Kolebaniia planetohoda. V knige «Dinamika planetohoda» pod red. A.L, Kemurdjiana i B.N. Petrova. Moskva: Nauka, gl. red. Fiz. mat. lit. 1979. Pp. 331 - 432.
[15] Malenkov M.I., Kemurdjian A.L. Tiagovaia dinamika planetohoda // Dinamika planetohoda. Redaktory Petrov B.N. i Kemurdjian A.L. M.: Nauka, glavnaia red. Fiz.-mat. literatury. 1979. Pp. 56 – 195.
[16] Matematicheskoe modelirovanie i hodovye ispytaniia planetohodov. Kajukalo I.F., Malenkov M.I., Nazarenko B.P. i dr. // Peredvijenie po gruntam Luny i planet. Pod red. A.L.Kemurdjiana. Moskva: Mashinostroenie. 1986. Pp. 186 – 261.
[17] Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Analiz podvijnosti marsohodov dlia razrabotki sistem peredvijeniia i algoritmov upravleniia planetohodami novogo pokoleniia // Izvestiia IUFU. Tehnicheskie nauki. Rostov-na-Donu: IUFU, 2015. №1. Pp.82 – 95.
[18] Malenkov M.I., Volov V.A., Guseva N.K., Lazarev E.A. Increasing the Mobility of Mars Rovers by Improving the Locomotion Systems and Their Control Algorithms // Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 11. - Pp. 824–831.
[19] Gromov V.V., Kemurdjian A.L. Metody i ustrostva dlia ocenki uslovi peredvijeniia po gruntam Luny i planet. // Peredvijenie po gruntam Luny i planet. Pod red. A.L.Kemurdjiana. Moskva: Mashinostroenie. 1986. Pp. 7 – 52.
[20] V.A. Dyachenko, M.I. Malenkov, D.V. Sidorov. Search Design-Projects of the Planetary Rovers and Interiors of Space Stations. Proc. Conf.

"Sovremennoe Mashinostrejenie. Nauka and Obrasovanie", St. Petersburg, SPbPU, 2014. Pp. 501-512.
[21] Kolesov Iu.B. Obektno-orientirovannoe modelirovanie slojnyh dinamicheskih sistem. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2004. 240 p.
[22] Kuzmenko D.N., Malenkov M.I., Lazarev E.A. Vybor koncepcii i predvaritelnoe modelirovanie dvijeniia samohodnogo shassi planetohoda s adaptivno podvesko motor-koles.– «Nedelia nauki SPbPU» . – SPb.: Izd-vo Politehn. universiteta, 2014.
[23] Greiner, G., Hormann, K.: Efficient Clipping of Arbitrary Polygons, Computer Graphics Group, University of Erlangen, Juli 2011.
[24] Malenkov M.I., Volov V.A. Comporative Analysis of Propulsor Components of Planetary rover Chassis. // Izvestiia IUFU. Tehnicheskie nauki. Rostov-na-Donu: IUFU, 2016. №1. – p. 169 – 185.
[25] Mikhail Malenkov. Self-propelled automatic chassis of Lunokhod-1: History of creation in episodes. Front. Mech. Eng. 2016. Volume 11, Issue 1. P. 60-86. DOI: 10.1007/s11465-016-0370-5.

УДК 621.01+001.57; DOI 10.1872/MMF-2016-65

И.А.Несмиянов

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Иван Алексеевич Несмиянов, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, Волгоград
Тел.: (8442) 30-86-60, E-mail: ivan_nesmiyanov@mail.ru

Аннотация

В работе представлены закономерности структурного строения параллельно-последовательных манипуляторов, на основе которых реализован алгоритм структурного синтеза, позволяющий сузить границы области поиска рациональных структур пространственных механизмов манипуляторов.

Ключевые слова: манипулятор параллельно-последовательной структуры, манипулятор-трипод, структурный анализ, структурный синтез.

Отличительной особенностью разработанных и спроектированных на кафедре «Механика» Волгоградского ГАУ погрузочных манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом от традиционных манипуляторов параллельной структуры (триподов, гексаподов) является подвижность основания, увеличивающая количество степеней подвижности на одну и более единиц (рис.1) [3, 6, 11, 13]. Эти манипуляторы являются примером применения параллельных механизмов в разомкнутых кинематических цепях манипуляторов и представляют собой механизмы параллельно-последовательной структуры [2, 7].

Исполнительными звеньями (внутренними входами) могут быть как гидроцилиндры, так и электроцилиндры (линейные актуаторы) с поступательной и вращательной местной подвижностью или только поступательной местной подвижностью. От количества внутренних входов, а соответственно и степени подвижности зависит максимальное число возможных одновременных управляющих воздействий на звенья манипулятора.

Сложность системы управления таким манипулятором будет зависеть от программных траекторий исполнительного (выходного) звена манипулятора и от законов изменения обобщенных координат.

а) б)

Рис. 1. Манипулятор – трипод с подвижным основанием: а) с гидроцилиндрами; б) с электроцилиндрами.

Конструкция манипулятора – трипода, способная агрегатироваться на мобильных роботах представлена рис. 1. Механизм состоит их трех звеньев 1, 2, 3 (рис.1, б) концы которых закреплены с помощью специальных двухподвижных шарниров на поворотном основании 5, что позволяет увеличить зону обслуживания. Противоположные концы звеньев соединены специальным шарниром 6, обеспечивающим пересечение геометрических осей этих звеньев в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов от внешних нагрузок [16, 17]. В результате образуется пространственная структура повышенной жёсткости с высокими динамическими характеристиками. Основание 5 имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси за счёт изменения длины звена 4. Перемещаемый груз с помощью захвата крепится на жестком подвесе, который с помощью цилиндрического шарнира прикреплен к узлу 6. Ось шарнира во все время движения остается горизонтальной и перпендикулярной продольной оси первого звена.

Следует отметить, что структурному анализу и синтезу представленных погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры до последнего времени не уделялось должного внимания. В настоящее время известно достаточно много моделей структурного синтеза плоских и пространственных механизмов, однако для пространственных механизмов параллельной структуры, однозначных методов синтеза до сих пор не разработано [8, 9, 10, 12].

В целом, задача структурного синтеза механизма манипулятора сводится к проектированию структурной схемы его исполнительного механизма. Решение задачи структурного анализа и синтеза механизмов, как правило, осуществляется в два этапа:

1. Генерация всех возможных кинематических цепей в соответствии с заданными условиями.
2. Отбор работоспособных механизмов из ряда полученных комбинаций структур.

Решение задачи структурного синтеза манипуляторов параллельной структуры по поиску рациональных структур, сумм подвижностей манипулятора f_Σ, позволяющих в результате синтеза получить требуемые значения степени подвижности W, без избыточных связей q и лишних подвижностей η, желательно получить в виде ограниченного количества возможных вариантов.

Оптимизационная задача структурного синтеза решалась для погрузочного манипулятора-трипода на подвижном основании, представляющем собой пространственный механизм параллельно-последовательной структуры (рис. 2.).

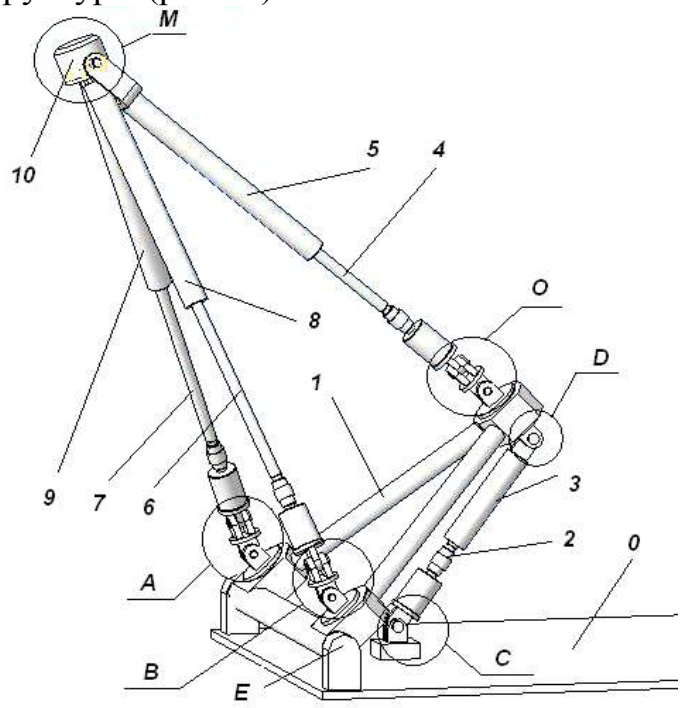


Рис. 2. Манипулятор -трипод на поворотном основании: 0- стойка; 1- платформа; 2, 4, 6, 7 – штоки актуаторов (исполнительных цилиндров); 3, 5, 8, 9 – цилиндры актуаторов; 10 – универсальный шарнир.

Для этого манипулятора (рис.2) число подвижных звеньев не может быть меньше 10 (схват 10, поворотная платформа 1 и четыре цилиндра, состоящих из поступательных пар шток-цилиндр: 2-3, 4-5, 6-8, 7-9), с учетом возможных промежуточных звеньев в составных шарнирах (*A, B, M, O*) принимается ограничение $10 \le n \le 15$. Минимальное количество одноподвижных поступательных пар низшего класса равно семи – кинематические пары платформа-шасси (*E*), шток-платформа (*D*), цилиндр-шасси (*C*) и четыре пары шток-цилиндр, с учётом применения в механизме только лишь одноподвижных пар 5 класса их максимально количество равно 17, тогда $7 \le p_5 \le 17$. Ограничения по двухподвижным и трёхподвижным кинематическим парам низшего класса запишутся как: $0 \le p_4 \le 5$ и $0 \le p_3 \le 6$. Суммарное количество кинематических пар для данной схемы манипулятора не может быть менее 10, поэтому $p_5+p_4+p_3 \ge 10$.

Таким образом, решая оптимизационную задачу определяется структура манипулятора с требуемой степенью подвижности, без избыточных связей и не имеющего местных подвижностей.

С учетом требований нормальности механизма ($n_Ц$=W) за целевую функцию принято выражение [1, 9, 14]:

$$n_{Ц} = W(n, p_i) = 6n - \sum_{i=3}^{5} i \cdot p_i \,, \qquad (1)$$

ограничения по числу кинематических пар и их подвижностей:

$$\begin{aligned} &10 \le n \le 15, \\ &7 \le p_5 \le 17, \\ &0 \le p_4 \le 5, \\ &0 \le p_3 \le 6, \\ &p5+p4+p3 \ge 10. \end{aligned} \qquad (2)$$

При заданных ограничениях (2) и W=4 получен 121 вариант целочисленного решения, однако не все сочетания кинематических пар определённого класса при данном числе подвижных звеньев могут образовывать работоспособный механизм. Следовательно, необходим более качественный анализ, позволяющий выбрать из 121 варианта только те решения, которые бы объективно описывали структуру манипулятора.

В процессе всестороннего структурного анализа [4, 5, 9, 14, 15] выявлено, что для пространственных исполнительных механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры при q=0 и η=0 число независимых контуров Гохмана k имеет следующую зависимость от степени подвижности W:

$$\begin{cases} k = W + 1, \text{ при } W = 1, \\ k = W, \text{ при } W = 2, \\ k = W - 1, \text{ при } W \ge 3. \end{cases} \qquad (3).$$

Дополнительно выявлено, что для пространственного механизма параллельной структуры, при добавлении одной степени подвижности стойки, разность суммы подвижностей и степени подвижности равно сумме произведения числа степеней свободы рабочего пространства манипулятора на число независимых контуров Гохмана и числа степеней свободы в плоскости

$$f_{\Sigma} - W = 6k + 3. \qquad (4).$$

Выражение (4) является частным случаем условия нормальности механизма [15], справедливо при W≥3 и может быть полезно при синтезе манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

Выражения (3, 4) значительно сужают границы поиска рациональных структурных строений пространственных механизмов параллельно-последовательной структуры.

Алгоритм нахождения рациональных структурных схем

работоспособных механизмов с кинематическими парами не ниже 3-го класса можно записать в виде следующей последовательности действий:

1. Задаётся требуемая степень подвижности механизма *W*.
2. Определяется число независимых контуров Гохмана *k* из условия (4).
3. Задаются ограничения q=0 и η=0, обеспечивающие получение механизма без избыточных связей и лишних подвижностей.
4. Задаются ограничения по подвижностям кинематических пар, (например, если в механизме присутствуют только одноподвижные кинематические пары, то ограничения запишутся в виде $p_5>0$, $p_4=0$, $p_3=0$).
5. Решается задача линейного программирования, состоящая из системы линейных уравнений

$$\begin{aligned} W &= 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ k &= p_\Sigma - n, \\ p_\Sigma &= p_5 + p_4 + p_3, \\ f_\Sigma &= p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{aligned} \qquad (5)$$

и неравенства

$$f_\Sigma \geq W + 6k. \qquad (6)$$

6. Проверка полученных вариантов решений на целочисленность.
7. Анализ полученных вариантов методом графов и/или матричными методами с составлением матриц смежности и инцидентности и выбор работоспособных и рациональные схем.

Таким образом, задача синтеза сводится к решению целочисленной задачи линейного программирования, что значительно уменьшает границы возможных решений. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на языке *Visual Basic v*.6.5, апробация алгоритма проведена при синтезе манипулятора параллельной кинематики с 4-мя степенями подвижности. Результаты расчетов показали, что для синтезируемого манипулятора при ограничении числа подвижных звеньев $9 \leq n \leq 16$ существует 77 вариантов решений. Из этих вариантов 26 не имеют лишних подвижностей и избыточных связей и лишь 4 варианта (!) являются рациональными, то есть позволяют получить требуемый пространственный механизм в виде трипода с подвижным основанием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Степанов. О современном уровне компьютерного решения задач структурного синтеза механизмов // Теория механизмов и машин. - 2011. - №1. - Том 9. - С.25-32.
2. В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев. Пространственные механизмы параллельной структуры. – М.: Наука, 1991. – 94 с.
3. В.М. Герасун, А.Ф. Рогачёв, И.А. Несмиянов. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических цепях

манипуляторов // Экстремальная робототехника. Труды XXI международной научно–технической конференции. – Санкт–Петербург: Изд–во «Политехника–сервис»; 2010. - С.169-172.
4. Исследование манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами / Герасун В.М. [и др.] // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – С.81-85.
5. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора-трипода с поворотным основанием / Герасун В.М. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. - №6. – с.21-26.
6. Исследование устойчивости манипулятора с пространственным исполнительным механизмом / Герасун В.М. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции / под. Ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. – С.680-690.
7. Кинематическое исследование манипулятора-трипода / Герасун В.М. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, - 2012. – с.251-258.
8. Л.Т. Дворников. Основы всеобщей (универсальной) классификации механизмов. // Теория механизмов и машин. – 2011 - №2. – Том 9. – с. 18-29.
9. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования / Герасун В.М. [и др.] // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. - №44. - 24 с.
10. О.Д. Егоров. Структурный анализ исполнительных устройств роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. - №7. - С.29-33.
11. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода / Герасун В.М. [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. - №3. – с.2-8.
12. Особые положения трипода в кинематических цепях манипуляторов / Герасун В.М. [и др.] // Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. Т.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С.196-198.
13. Патент №2476372 РФ, МПК B66C23/36, B60P3/00. Аварийно-спасательная машина. / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Ерёменко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов. – Опубл.27.02.2013.
14. Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси / Герасун В.М. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. - №5. – С.51-54.
15. Ю.А. Семенов, Н.С. Семенова. Структурный анализ механизмов. // Теория механизмов и машин. - 2003. - №2. - С.3-14.

16. Dinamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod. V.V. Zhoga, V.M.Gerasun, I.A. Nesmiyanov, N.S. Vorob'eva, and V.V. Dyashkin-Titov. Journal of Mashinery Manufacture and Reliabitily, 2015. Vol. 44, No. 2, pp 181-186.
17. Walking Mobile Robot with Vanipulator-Tripod. V.Zoga, A.Gavrilov, V.Gerasun, I.Nesmianov, V.Pavlovsky, V.Skakunov, V.Bogatyrev, D. Golubev, V.Dyashkin-Titov, N.Vorobieva. Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, pp. 463-471.

I.A. Nesmiyanov

FEATURES OF THE STRUCTURAL RESEARCH MANIPULATORS SERIES-PARALLEL STRUCTURE

Volgograd State Agricultural University, Russia.

Abstract

The paper presents of the structural regularities of structure of parallel-sequential manipulators, of which is implemented on the basis of structural synthesis algorithm to narrow down the search area borders sustainable patterns of spatial manipulators mechanisms.

Key words: manipulator series-parallel structure, manipulator-tripod, structural analysis, structural synthesis.

REFERENCES

[1] A.V. Stepanov. O sovremennom urovne kompyuternogo resheniya zadach strukturnogo sinteza mekhanizmov // Teoriya mekhanizmov I mashin. - 2011. №1. Vol 9. Pp. 25-32. (rus.)
[2] V.A. Glazunov, A.Sh. Koliskor, A.F. Kraynev. Prostranstvennye mekhanizmy parallelnoy struktury. Moscow. Nauka, 1991. 94 p. (rus.)
[3] V.M. Gerasun, A.F. Rogachev, I.A. Nesmiyanov. Opyt ispolzovaniya prostranstvennykh mekhanizmov v kinematicheskikh tsepyakh manipulyatorov // Ekstremalnaya robototekhnika. Trudy XXI mezhdunarodnoy nauchno - tekhnicheskoy konferentsii. - Sankt_Peterburg: Izd-vo «Politekhnika_servis»; 2010. Pp.169-172. (rus.)
[4] Issledovanie manipulyatora na osnove prostranstvennogo mekhanizma parallelnoy struktury s chetyrmya postupatelnymi parami /_Gerasun V.M. [i_dr.] // Ekstremalnaya robototekhnika: Sbornik dokladov vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. St.Peterburg. 2012. Pp.81-85. (rus.)

[5] Issledovanie optimalnykh konfiguratsiy manipulyatoratripoda s povorotnym osnovaniem / Gerasun V.M. [i dr.] // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. №6. Pp.21-26. (rus.)
[6] Issledovanie ustoychivosti manipulyatora s prostranstvennym ispolnitelnym mekhanizmom / Gerasun V.M. [i dr.] // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. Un-ta, 2013. Pp.680-690. (rus.)
[7] Kinematicheskoe issledovanie manipulyatora-tripoda / Gerasun V.M. [i dr.] // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. SPb.: Izd-vo Politekhn.un-ta, 2012. Pp.251-258. (rus.)
[8] L.T. Dvornikov. Osnovy vseobshchey (universalnoy) klassifikatsii mekhanizmov. // Teoriya mekhanizmov i mashin. 2011 №2. Vol. 9. Pp. 18-29. (rus.)
[9] Manipulyatory dlya mobilnykh robotov. Kontseptsii i printsipy proektirovaniya / Gerasun V.M. [i dr.] // Preprint IPM im. M.V. Keldysha. 2012. №44. 24 p. (rus.)
[10] O.D. Yegorov. Strukturnyy analiz ispolnitelnykh ustroystv robotov // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2008. №7. Pp. 29-33. (rus.)
[11] Opredelenie zony obsluzhivaniya mobilnogo manipulyatora-tripoda / Gerasun V.M. [i dr.] // Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie. - 2013. - №3. – p.2-8. (rus.)
[12] Osobye polozheniya tripoda v kinematicheskikh tsepyakh manipulyatorov / Gerasun V.M. [i dr.] // Materialy 4-y Vserossiyskoy multikonferentsii po problemam upravleniya. T.2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2011. Pp.196-198. (rus.)
[13] Patent №2476372 RF, MPK B66C23/36, B60P3/00. Avariyno-spasatelnaya mashina / V.V. Zhoga, V.N. Skakunov, A.V. Yeremenko, P.V. Fedchenkov, V.M. Gerasun, I.A. Nesmiyanov, V.V. Dyashkin-Titov. – Opubl. 27.02.2013. (rus.)
[14] Sintez manipulyatora dlya mobilnogo robota na gusenichnom shassi / Gerasun V.M. [i dr.] // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2011. №5. Pp. 51-54. (rus.)
[15] Yu.A. Semenov, N.S. Semenova, Strukturnyy analiz mekhanizmov. // Teoriya mekhanizmov i mashin. 2003. №2. Pp.3- 14. (rus.)
[16] Dinamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod. V.V. Zhoga, V.M.Gerasun, I.A. Nesmiyanov, N.S. Vorob'eva, and V.V. Dyashkin-Titov. Journal of Mashinery Manufacture and Reliabitily, 2015. Vol. 44, No. 2, pp 181-186.
[17] Walking Mobile Robot with Vanipulator-Tripod. V.Zoga, A.Gavrilov, V.Gerasun, I.Nesmianov, V.Pavlovsky, V.Skakunov, V.Bogatyrev, D. Golubev, V.Dyashkin-Titov, N.Vorobieva. Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, pp. 463-471.

УДК 621.865.8; DOI 10.1872/MMF-2016-66

К.В. Никитина[1], В.Л. Жавнер[2]

ОСОБЕННОСТИ РОБОТА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ

[1]Ксения Валерьевна Никитина, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: kasandra37@mail.ru.

[2]Виктор Леонидович Жавнер, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: vjavner@outlook.com.

Аннотация

В работе рассмотрены особенности роботов с параллельной кинематикой для погрузочно-разгрузочных работ и пакетирования грузов на основании сравнения их с существующими серийно выпускаемыми роботами с открытой кинематической структурой, особенности организации системы управления и изложены требования к точности позиционирования рабочего органа робота. В результате показаны преимущества таких роботов и даны рекомендации к использованию системы управления с адаптацией.

Ключевые слова: параллельный робот, погрузочные работы, позиционно-контурное управление, точность.

Среди промышленных роботов, связанных с технологическим процессом, можно выделить особую группу роботов, предназначенных для погрузочно-разгрузочных работ и пакетирования. На сегодняшний день на рынке представлено большое разнообразие роботов для пакетирования грузов различных фирм-производителей: KUKA, Kawasaki, ABB, FANUC, Hyundai и др. Однако вся номенклатура таких роботов может быть сведена к одной из четырех представленных ниже структурных схем (рисунок 1).

Наиболее часто среди роботов для пакетирования встречается схема а) в силу традиционности применения в робототехнике. По такой схеме построены роботы фирм FANUC и KUKA. Схема б), воплощенная во всех пакетирующих роботах фирмы ABB, используется также фирмой Kawasaki при пакетировании крупногабаритных и тяжеловесных изделий.

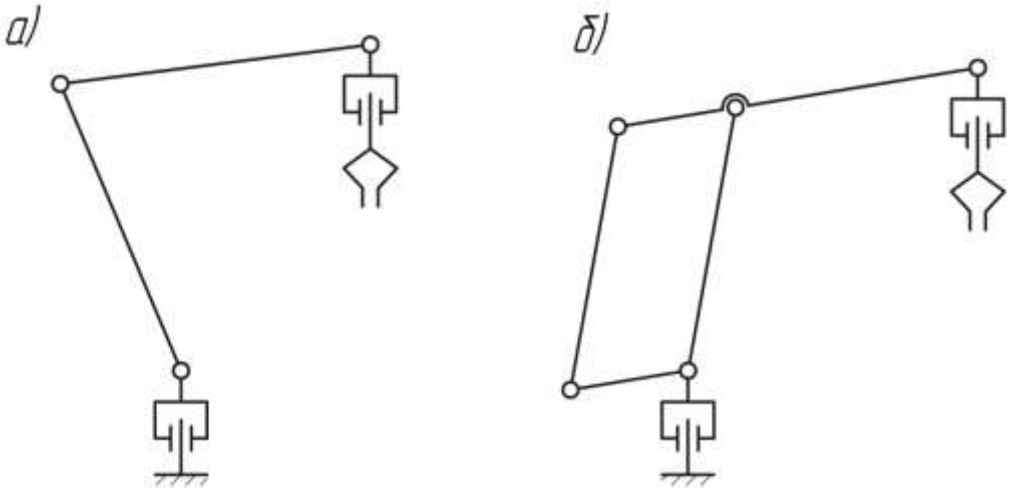


Рисунок 1 Структурные схемы промышленных роботов для пакетирования, представленных на рынке

Если не рассматривать вопрос об обеспечении постоянного вертикального расположения захватного устройства, в этих схемах для перемещения грузов в базовой вертикальной плоскости используется структурная схема с двумя вращательными парами. Между собой они отличаются тем, что в первой из них приводы расположены последовательно в местах шарнирного соединения звеньев, а во второй – на основании при использовании механизма параллелограмма между основанием и предплечьем. В последнем случае существенно изменяется масса подвижных элементов и снижаются энергетические затраты.

И хотя серийно выпускаемые роботы для пакетирования уже давно зарекомендовали себя, у них есть ряд недостатков: большие энергетические затраты, достаточно большие рабочие объёмы, затрудняющие их размещение в составе автоматизированных технологических линий. К тому же, в открытых кинематических цепях из-за наличия изгибающих моментов на звеньях их размер приходится увеличивать, в результате чего все такие роботы являются громоздкими конструкциями, способными перемещать изделия относительно небольшого веса. В таблице 1 приведены отношения массы к грузоподъемности некоторых серийно выпускаемых роботов, подтверждающие вышесказанное.

Традиционно сложилось так, что все роботы разрабатывались для замены человека-оператора, и поэтому их устанавливали рядом с технологической линией на место самого оператора. Так было раньше и в большинстве случаев так делают и сегодня. При этом значительная часть пространства производственного помещения отводится на установку робота и специальных защитных ограждений.

В используемом авторами подходе к пакетированию грузов тенденция совершенно другая: робот с параллельной кинематикой устанавливается над технологической линией и он не занимает лишнего места рядом с ней,

что позволяет располагать на освободившейся площади другое оборудование. Такой подход известен еще со времен активного внедрения сбалансированных манипуляторов. В работе [1] показано применение этих манипуляторов на примере одного из манипуляторов фирмы FBA. Наиболее целесообразно использование манипулятора в подвесном исполнении, как это сделано, например, в случае «перекладки квадратных плиток из керамики при обжиге». Так рабочее пространство для передвижения оператора остается свободным, и все оборудование в зоне выполнения работ становится легко доступным.

Таблица 1 – Соотношения массы робота и его грузоподъемности для роботов с открытой кинематической цепью

Модель	Грузоподъем-ность, кг	Масса, кг	Отношение массы к грузоподъем-ности	Приводы
KUKA				В шарнирном соединении звеньев
KR 40 PA	40	695	17,4	
KR 120 R3200 PA	120	1075	9,0	
FANUC				
M-710*i*C/45M	45	570	12,7	
R-2000*i*B/100H	100	1150	11,5	
Kawasaki Robotics				
RD80N	80	540	6,8	
ZDE130S	130	1350	10,4	На основании
ABB				
IRB 260	30	340	11,3	
IRB 460	110	925	8,4	
Hyundai				
HP160	160	1280	8,0	

В последние годы серийные роботы с параллельной структурой, например, триподы фирмы Festo или дельта-роботы компании ABB, стали расширять области своего применения. Интерес к этим роботам обусловлен тем, что они достигают наибольшего быстродействия среди прочих роботов (во многом благодаря расположению приводов на основании, а не на звеньях). Однако используют параллельные роботы преимущественно в операциях основного технологического цикла, таких как сварка, установка компонентов на печатные платы, сортировка и упаковывание кондитерских изделий и других мелких предметов. Отсутствует ярко выраженная специализация параллельных роботов на погрузочно-разгрузочные работы, хотя в работе [14] представлен робот для

пакетирования газет в полиграфической промышленности. К тому же, следует отметить их небольшую грузоподъемность, в то время как на операциях пакетирования тарно-штучных грузов требуемая грузоподъемность обычно превышает 10 кг.

Поэтому авторами предложена конструкция робота с параллельной кинематикой (рисунок 2), разработанная специально для пакетирования грузов, на основе шарнирной фермы переменной конфигурации. Понятие шарнирной фермы переменной конфигурации впервые введено в работе [2]. Механизмы параллельной структуры на основе шарнирной фермы переменной конфигурации применялись и в качестве привода манипулятора [15], исполнительное устройство которого представляет собой механизм пантографа (рисунок 3).

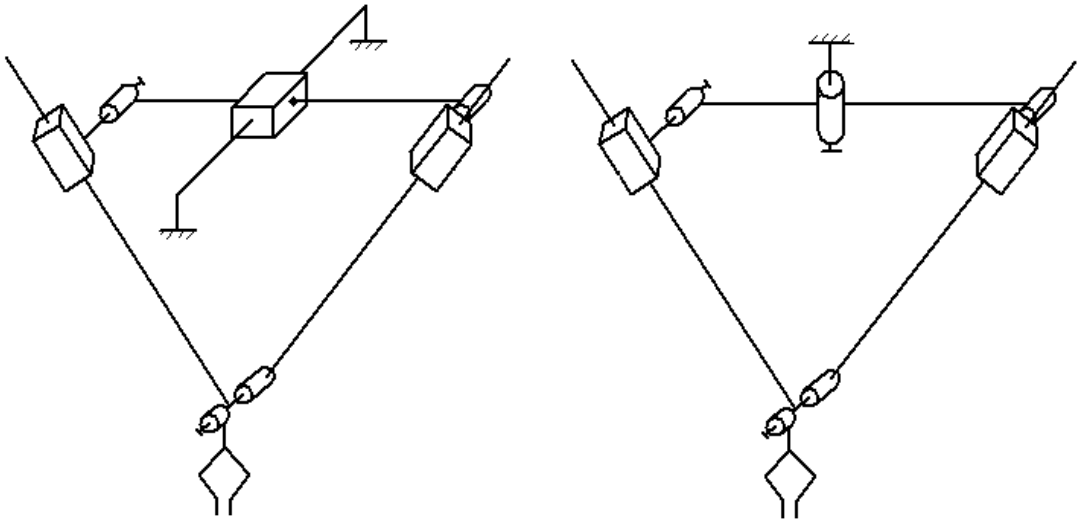


Рисунок 2 Структурная схема робота с параллельной кинематикой для пакетирования грузов

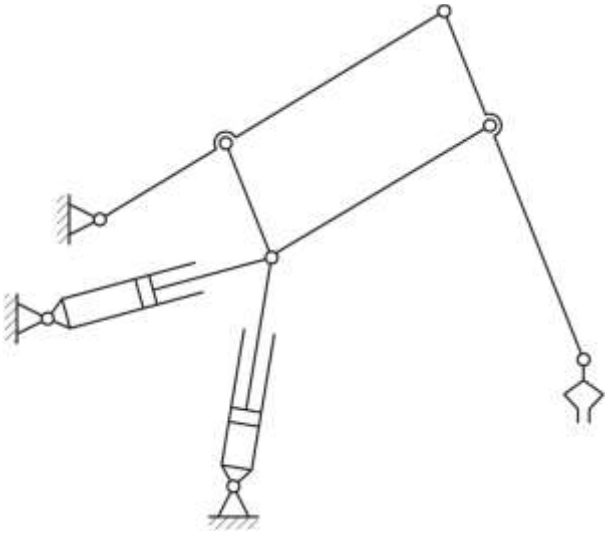


Рисунок 3 Манипулятор с приводом в виде механизма параллельной структуры

Основной особенностью такой конструкции является то, что сам привод является звеном, и испытывает нагрузки только на растяжение-сжатие, что повышает жёсткость конструкции и позволяет снизить массу

манипуляционной системы. Кроме того, такой робот может быть выполнен на гидроцилиндрах, в результате чего снимаются ограничения по грузоподъемности: исходя из веса переносимого груза просто подбирается соответствующий типоразмер гидроцилиндров.

Рабочая операция представляет собой перенос груза с выходного конвейера технологического оборудования на поддоны. Таким образом, граф рабочей операции имеет простой вид и изображается отрезками прямых линий, параллельных осям системы координат (рисунок 4).

Обслуживаемая зона представленного робота была подробно изучена в работе [3] и представляет собой фигуру, сечение которой в базовой плоскости образовано пересечением четырех окружностей с центрами на осях крепления приводных элементов.

Задача управления параллельными роботами является на сегодняшний день достаточно сложной, так как в отличие от роботов с открытыми кинематическими цепями, у роботов с механизмами параллельной структуры каждое из нескольких звеньев влияет на положение рабочего органа в пространстве.

Принимая это во внимание, проводятся исследования законов движения рабочего органа по прямолинейной, а также по заранее неопределенной траекториям [4], расчет погрешностей позиционирования и влияние на них погрешностей приводов и величины приложенной силы [5], выводится методика планирования траектории движения для манипуляторов с гибкими связями [6].

Основные принципы организации системы управления для разработанного робота изложены в работе [7]. Так как по предложенной структурной схеме могут быть построены разные типы роботов в зависимости от используемого типа привода, то система управления имеет универсальный характер. Для управления параллельными механизмами недостаточно знать координаты текущего и следующего положения захватного устройства. Необходимо согласовать работу всех приводов, т.е. согласовать их скорости. Тогда, согласно работе [2], получаем следующие зависимости для скоростей линейных приводов:

$$\dot{S_1} = \dot{x} \cdot \cos\alpha + \dot{z} \cdot \sin\alpha,$$
$$\dot{S_2} = -\dot{x} \cdot \cos\beta + \dot{z} \cdot \sin\beta.$$

Для любого исполнительного устройства, будь то станок или робот, всегда имеется базовая точка, от которой начинается выполнение необходимой операции. В нашем случае базовой точкой является точка над конвейером в месте захвата коробок (точка 0 на рисунке 4). В этой точке по умолчанию находится захватное устройство при включении робота, а также во время ожидания появления коробки на конвейере.

Наиболее рационально для операций пакетирования и погрузочно-разгрузочных работ применять позиционно-контурное управление (рисунок 4). В этом случае движение по горизонтали осуществляется по

заданным программным точкам (позиционно), а вот вертикальное движение происходит по заданному вектору скорости, т.е. контурно. Такое управление позволяет смягчить требования к грузоподъемной платформе, входящей в состав робототехнического пакетирующего комплекса, опускающей поддон с установленными грузами по мере его заполнения. Смещение платформы с поддоном на один шаг вниз не всегда происходит равномерно в силу особенностей конструкции платформы, однако опускание груза всегда будет производиться до его контакта с поверхностью поддона, другими словами, имеет место адаптация системы управления под внешние параметры окружающей среды робота.

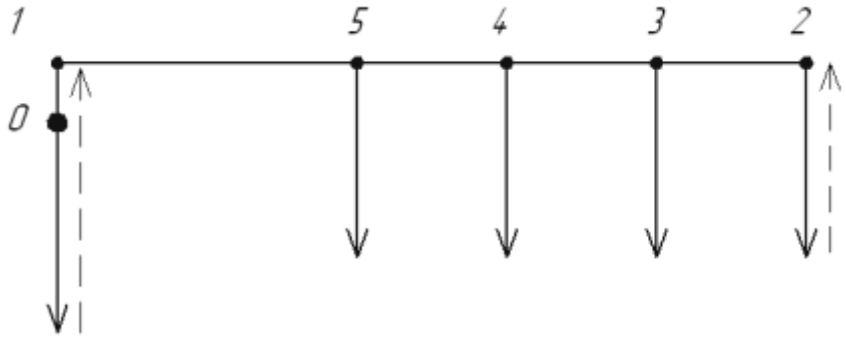


Рисунок 4 Граф рабочей операции при позиционно-контурном управлении

С этой целью может применяться механическое размыкание силовой части при опускании груза после контакта с поддоном. Например, используются конические стержни и втулки, подключенные в общую электрическую схему (наподобие ключа). При опускании груза до упора о поддон происходит выдвижение конического стержня из втулки, и соединение размыкается. Потеря контакта воспринимается системой управления как сигнал к завершению вертикального движения вниз, и автоматически начинается подъем, во время которого стержень вновь входит в контакт с конической втулкой. Подъем рабочего органа осуществляется до заданного внешнего упора.

Вертикальная траектория не регламентируется, движение предполагается прямолинейным, но при этом накладываются ограничения на отклонение вектора скорости от заданного программой в пределах погрешности, определяемой некоторой исходно заданной трубкой точности [8].

Говоря о точности позиционирования робота для пакетирования, не имеет смысла создавать, проектировать робот с высокой точностью, она должна быть сопоставима с точностью изготовления переносимых изделий. Обычно в качестве таких изделий выступают коробки, наполненные определенным видом товаров. Все размеры коробок и других упаковочных приспособлений унифицированы и соответствуют [9] с учетом стандартных размеров поддонов, чтобы обеспечить максимальный уровень его заполнения грузами. Точность размеров коробок варьируется в

зависимости от их вида. Так как нам заранее неизвестно, в какой таре переносится объект, то рассмотрим возможные варианты. Для коробок из картона и бумаги по [10], «предназначенных для упаковывания пищевых продуктов, промышленной продукции и непродовольственных товаров», устанавливаются отклонения контролируемых (внутренних) размеров от -2 до -10 мм в зависимости от типоразмера коробки. Согласно [11], [12], [13] отклонения размеров ящиков из гофрированного картона и плоского склеенного картона не должны превышать допускаемых отклонений -2…-5 мм. Кроме того, в [12] оговаривается погрешность изготовления разверток коробок высеканием из листа материала, которая не должна превышать ±2 мм.

Заключаем, что стандартами регламентируется только допускаемое отклонение в минус от номинального размера. Это говорит о том, что в большинстве случаев тара будет большего размера, причем насколько именно неизвестно. В соответствии с этим мы не можем сделать точный вывод о необходимой точности позиционирования робота для пакетирования грузов, можно дать лишь рекомендацию об использовании системы управления с адаптацией, которая наиболее полно учитывает непостоянство размеров тары.

Таким образом, предложенная концепция робота для пакетирования грузов позволяет освободить рабочее пространство рядом с технологической линией от несущих колонн, крепежных соединений и ограждений за счет использования свободного пространства над технологической линией. Конструкция робота обеспечивает наиболее выгодное соотношение массы робота к его грузоподъемности, особенно при использовании гидроцилиндров. Система управления такого робота носит универсальный характер и должна быть построена с адаптацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сбалансированные манипуляторы / И.Л. Владов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
2. Жавнер В.Л. Роботы и манипуляторы для погрузочно-разгрузочных работ: дис. ... докт. техн. наук. – СПб., 1992. – 535с.
3. Никитина К.В., Жавнер В.Л. Обслуживаемая зона параллельных манипуляторов // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 18-20.
4. Дяшкин-Титов В.В. Разработка методов расчета манипулятора-трипода на поворотном основании: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2014. – 148 с.

5. Гапоненко Е.В. Динамика управляемого движения робота-трипода с шестью степенями подвижности: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2014. – 219 с.
6. Толстунов О.Г. Обоснование структуры и кинематических параметров для параллельно-последовательного манипулятора с гибкими звеньями: дис. ... канд. техн. наук. – Шахты, 2015. – 169 с.
7. Жавнер В.Л., Никитина К.В. Система управления манипулятором // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 10-13.
8. Мясников В.А., Игнатьев М.Б., Покровский А.М. Программное управление оборудованием. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1974. – 542 с.
9. ГОСТ 21140-88. Тара. Система размеров. – Введ. 1989-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 15 с.
10. ГОСТ 12301-2006. Коробки из картона, бумаги и комбинированных материалов. Общие технические условия. – Введ. 2008-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 18 с.
11. ГОСТ 9142-2014. Ящики из гофрированного картона. Общие технические условия. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 31 с.
12. ГОСТ 54463-2011. Тара из картона и комбинированных материалов для пищевой продукции. Технические условия. – Введ. 2011-09-30. – М.: Стандартинформ, 2011. – 20 с.
13. ГОСТ 13511-2006. Ящики из гофрированного картона для пищевых продуктов, спичек, табачных изделий и моющих средств. Технические условия. – Введ. 2007-10-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.
14. Елимелех И.М., Жавнер В.Л., Наумова А.Б. Универсальный полиграфический робот // Всесоюзное совещание по методам расчета полиграфических машин-автоматов. – Львов, 1987. – С. 97.
15. Манипуляционные системы роботов / А.И. Корендясев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 472 с.

K.V.Nikitina[1], V.L.Zhavner[2]

FEATURES OF APPLICATION OF ROBOT WITH PARALLEL STRUCTURE FOR LOADING AND UNLOADING WORKS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstact

The paper deals with the features of robots with parallel kinematics for loading and unloading and packaging the goods by comparing them with

existing commercially available robots with open kinematic structure, features of organization of the control system and sets out the requirements for the positioning accuracy of the working body of the robot. As a result, the advantages of such robots are shown and recommendations for the use of a control system with adaptation are provided.

Key words: parallel robot, loading works, positioning-contouring control accuracy.

REFERENCES

[1] Balanced manipulators. I.L. Vladov [et al.]. Moscow. Mashinostroenie, 1988. 264 p. (rus.)
[2] Zhavner V.L. Robots and manipulators for loading and unloading works: dis. ... dokt. tehn. sciences. St.Petersburg, 1992. 535 p. (rus.)
[3] Nikitina K.V., Zhavner V.L. Working space of parallel manipulators // SPbPU Science week: Proc. of science forum with international participation. Institute of metallurgy, machine building and transport. P. 1. – St-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2015. Pp. 18-20. (rus.)
[4] Djashkin-Titov V.V. Development of calculation methods for manipulator-tripod on swivel base: dis. ... cand. tehn. sceinces. Volgograd, 2014. 148 p. (rus.)
[5] Gaponenko E.V. Dynamics of controlled motion of robot-tripod with six degrees of freedom: dis. ... cand. tehn. sciences. Belgorod, 2014. 219 p. (rus.)
[6] Tolstunov O.G. Rationale of structure and kinematic parameters for parallel-to-serial manipulator with flexible links: dis. ... cand. tehn. sciences. Shahty, 2015. 169 p. (rus.)
[7] Zhavner V.L., Nikitina K.V. Manipulator control system // Science forum with international participation «SPbPU Science week»: proc. of scientific and practical conference. Institute metallurgy, machine building and transport. P. 2. St.Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2015. Pp. 10-13. (rus.)
[8] Mjasnikov V.A., Ignat'ev M.B., Pokrovskij A.M. Equipment program control. – Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otdelenie, 1974. 542 p. (rus.)
[9] GOST 21140-88. Tare. The system of sizes. Intr. 1989-01-01. Moscow. Izd-vo standartov, 2005. 15 p. (rus.)
[10] GOST 12301-2006. Boxes made of cardboard, paper and combined materials. Common technical conditions. Intr. 2008-01-01. Moscow. Standartinform, 2008. 18 p. (rus.)
[11] GOST 9142-2014. Boxes made of corrugated cardboard. Common technical conditions. – Intr. 2016-01-01. Moscow. Standartinform, 2015. 31 p. (rus.)
[12] GOST 54463-2011. Tare of cardboard and combined materials for food products. Technical conditions. Intr. 2011-09-30. Moscow. Standartinform, 2011. 20 p. (rus.)

[13] GOST 13511-2006. Boxes made of corrugated cardboard for food products, matches, tobacco products and detergents. Technical conditions. – Intr. 2007-10-01. – M.: Standartinform, 2007. 12 p. (rus.)
[14] Elimeleh I.M., Zhavner V.L., Naumova A.B. Universal printing and publishing robot // All-Union Conference on the methods of calculation printing and publishing machines-automates. – L'vov, 1987. – P. 97. (rus.)
[15] Manipulating systems of robots. A.I. Korendjasev [et al.]. – M.: Mashinostroenie, 1989. 472 p. (rus.)

УДК 620.1.052.4; DOI 10.1872/MMF-2016-67

А. Н. Попов[1], Н. Е. Пуленец[2], А. К. Васильев [3], Е. А. Лопатина[4].

МАКЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО УДАРНОГО СТЕНДА

[1]Аркадий Николаевич Попов, к. т. н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел. : +7 (812) 5526118 ; E-mail: popov@deltamec.ru

[2]Пуленец Николай Евгеньевич, к. т. н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел. : +7 (812) 5526118 ; E-mail:pulenetc@deltamec.ru

[3]Васильев Алексей Константинович, магистр
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург

[4]Лопатина Екатерина Андреевна, магистр
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург

Аннотация

В работе выполнен анализ отечественных и зарубежных стендов многократных ударов, описан макет пневматического ударного стенда, разработанный на кафедре «Автоматы». Приведены первые результаты испытаний макета и представлены осциллограммы ударных импульсов, полученные на отечественных полиуретановых формирователях. Оценены предельные частоты работы макета. Результаты работы будут использованы при создании ударных стендов в рамках программы импортозамещения.

Ключевые слова: пневматический стенд многократных ударов, разработка, макет, испытания, ударный импульс, амплитуда, форма импульса, частота

Ударным воздействиям наряду с климатическими и вибрационными подвергается большинство объектов человеческой деятельности. Удары могут быть как следствием падения при перегрузке или транспортировке,

так и результатом неаккуратного обращения с изделиями. Падение с высоты для большинства бытовых изделий, как правило, приводит к утрате внешней эстетики и механической прочности, может вызвать нарушение функционирования и ухудшение эксплуатационных характеристик. Падение ответственных промышленных устройств, транспортных контейнеров для вредных и радиоактивных отходов, военной техники и приборов, профессионального инструмента, детских игрушек и многих других изделий не должно приводить к изменению их свойств. Одной из обязательных стадий разработки и создания новых приборов и устройств является их проверка на ударное воздействие. Подобная проверка регламентирована рядом стандартов, в которых определяются средства, методы и параметры испытаний. Целью испытаний является определение усталостных явлений или ухудшения параметров изделий, вызванных воздействием многократных ударов, а также использование полученной информации вместе с требованиями соответствующей нормативной технической документации для определения степени пригодности изделий [1].

ГОСТ Р 51371-99 [2] различает четыре вида испытаний изделий на ударную нагрузку: на ударную прочность, ударную устойчивость, на воздействие одиночных ударов и на воздействие сейсмического удара.

Основное требование, предъявляемое к испытательным ударным стендам для изделий, сводится к созданию ударных импульсов ускорения заданной формы, амплитуды и длительности**.** Одна из рекомендуемых в ГОСТ Р 51371-99 форм импульсов ударного ускорения – полусинусоидальная – показана на рисунке 1. Другим значимым требованием является воспроизводимость ударного импульса.

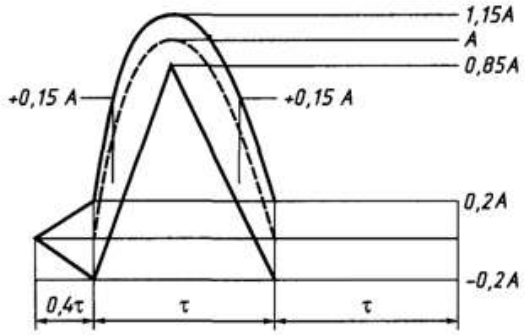


Рисунок 1. Полусинусоидальный импульс ударного воздействия

Амплитуда и длительность нарастания импульса при заданной скорости падения платформы на наковальню (скорость зависит от высоты падения) связаны обратно пропорциональной зависимостью. За длительность нарастания τ_0 принято считать половину длительности импульса τ или время от начала его действия до достижения максимума ускорения. Требования по длительности нарастания ударного импульса обычно лежат в диапазоне от 5 до 50 мс, а пиковое ударное ускорение в диапазоне от 100 до 1000 м/с^2. Длительность и форма ударного импульса в

ударных стендах регулируются, как правило, подбором формирователей импульса (амортизирующих прокладок), устанавливаемых между падающим столом и наковальней, пиковое ударное ускорение – изменением высоты падения стола. Формирователи изготавливаются из различных материалов и могут иметь простую или сложную форму: цилиндрическую, коническую, призматическую, ступенчатую.

Несмотря на то, что по техническим требованиям необходимо воспроизведение "чистого" закона полусинуса, на практике реализовать его фактически не удается; график в виде полусинуса получается в результате обработки сигнала с датчика ускорения за счет полосового фильтра.

Стандарты на ударные испытания регламентируют воспроизводимость ударного импульса, которая по амплитуде должна лежать в диапазоне ±15% А (см. рисунок 1). Это особенно важно для многократных ударов, поскольку ресурс формирователя импульса всегда ограничен и уход амплитуды относительно исходного значения неизбежен.

На отечественном рынке представлен механический ударный стенд фирмы ООО "Вибросервистест" [3]. Кинематическая схема стенда и его внешний вид показаны на рисунке 2.

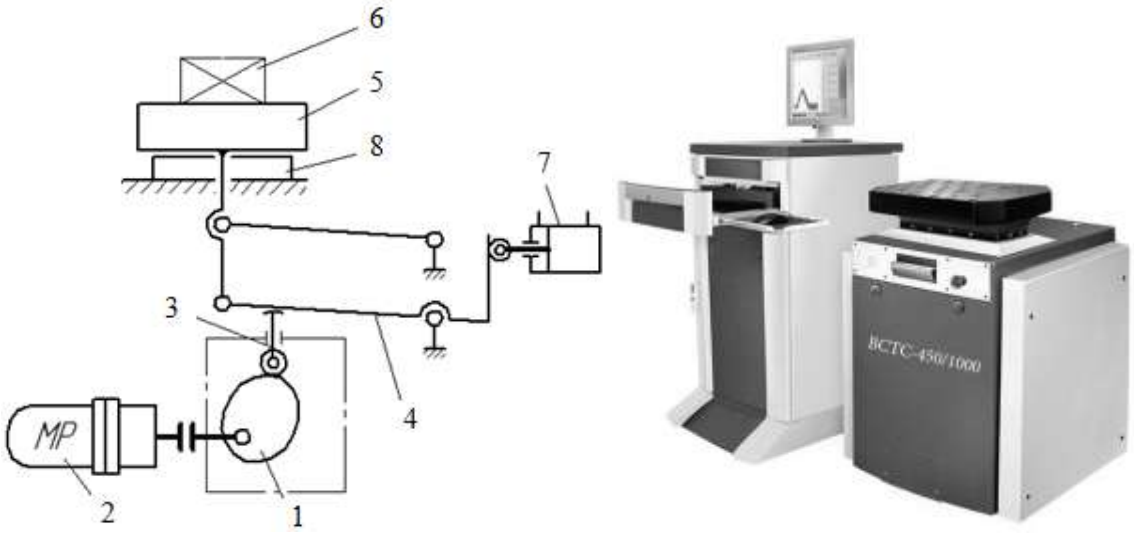


Рисунок 2. Электромеханический ударный стенд фирмы ООО "Вибросервистест"
1 – кулачок; 2 – мотор-редуктор; 3 – кулачковый механизм; 4 – механизм параллелограмма; 5 – стол; 6 – испытуемое изделие; 7 – пневмоцилиндр

Привод кулачка 1 осуществляется от мотор-редуктора 2. Поступательный или качающийся толкатель кулачкового механизма 3 воздействует на коромысло пространственного механизма параллелограмма 4, вертикальное звено которого осуществляет подъем стола 5 с испытуемым изделием 6. Замыкание кулачкового механизма выполняется за счет силы тяжести стола и дополнительно за счет металлической или пневматической пружины, реализованной, например, с помощью пневматического цилиндра 7. Изменяя давление в цилиндре,

можно регулировать усилие замыкания кулачкового механизма. При обратном ходе толкателя 3 стол с изделием и четырехзвенным механизмом падает на формирователь 8, создавая, таким образом, ударный импульс. Отсутствие поступательных направляющих стола и использование вместо них параллелограммного механизма существенно упрощает конструкцию стенда. Такая конструкция позволяет добиваться большой частоты ударов – несколько герц, а также грузоподъемности в несколько сотен килограммов. Однако, механические ударные стенды с кулачковым механизмам имеют все недостатки свойственные такого типа приводу. В современных условиях механические ударные стенды часто заменяются пневматическими, которые обеспечивают большую глубину регулировок по таким параметрам, как высота подъема ударного стола, сочетание свободного и ускоренного падения за счет обратного давления в цилиндрах, использование формирователей различной геометрии и высоты, воспроизведение одиночного удара с большой энерггией и т.д. Вопросам разработки ударных стендов большое внимание уделяют многие зарубежные компании. В настоящее время пневматические ударные стенды с грузоподъемностью от 50 до 500 кг выпускаются компаниями ELSTAR Elektronik AG (Швейцария), VST (originally M/RAD Corporation): Vibration and Shock Technologies, (США), Sonic Dynamics, Dongling Technologies (КНР), фирмой ENVIRONMENT EQUIPMENTS (Индия) [4] и рядом других.

Типовые пневматические ударные стенды компаний *Vibration & Shock Technologies и Sonic Dynamics* показаны на рисунке 3 и 4 [5].

Рисунок 3. Пневматические ударные стенды

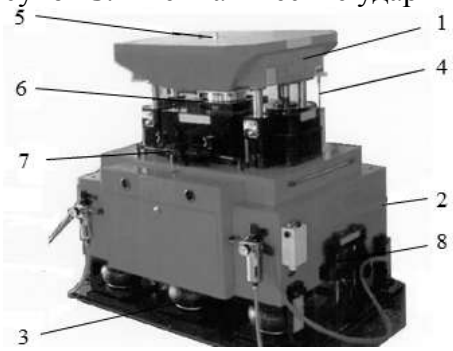


Рисунок 4. Пневматический ударный стенд компании *Sonic Dynamics*:
1 – ударный стол; 2 – инерционный блок; 3 – пневмоподушка;
4 – измеритель высоты подъема; 5 – акселерометр; 6 – формирователь импульса;
7 – гидротормоз; 8 – гидродемпфер

Актуальность проведения испытаний на пневматических ударных стендах, равно как и их исследования, обусловлены широкими возможностями этого типа оборудования, быстрым совершенствованием элементной базы пневматики и отсутствием теоретических рекомендаций по синтезу оборудования данного типа [6, 7].

Кинематическая схема ударного пневматического стенда компании Sonic Dynamics (КНР) [8] приведена на рисунке 5. Кинематическая схема обеспечивает подъем стола 1 с закрепленным на нем изделием 2 на заданную высоту, определяемую параметрами испытания, и последующее свободное падение стола на наковальню 7. Ударный импульс реализуется за счет формирователя 6. Подъем стола по четырем направляющим 4 осуществляется с помощью двух пневматических цилиндров 3.

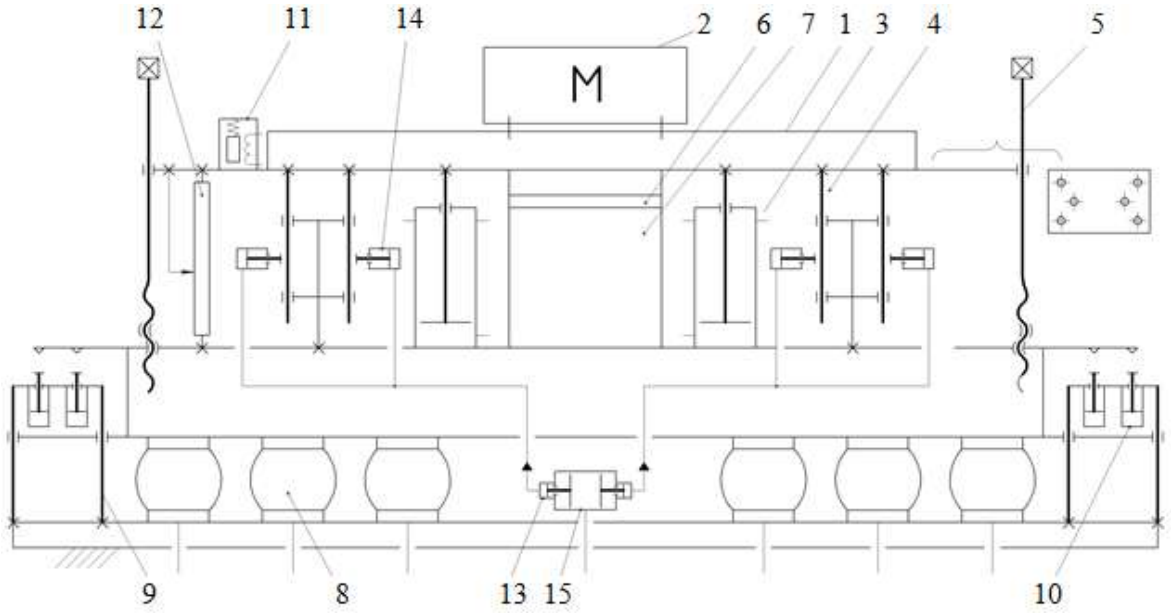


Рисунок 5. Кинематическая схема пневматического ударного стенда:
1 – стол; 2 – изделие; 3 – пневматические цилиндры; 4 – направляющие стола; 5 – упор; 6 – формирователь импульса; 7 – наковальня; 8 – пневмоподушки; 9 – направляющие основания; 10 – амортизатор; 11 – акселерометр;12 – резистивный датчик перемещения; 13, 15 – пневмогидравлический редуктор; 14 – гидротормоз

Высота подъема стола определяется заданием давления и противодавления в цилиндрах и контролируется резистивным датчиком 12. Акселерометр 11 позволяет записать закон изменения ускорения во время удара. Для аварийной остановки стола на необходимой высоте могут использоваться упоры 5, для компенсации отскока стола в режиме однократного удара используются гидравлические тормоза 14, работающие от пневмогидравлического редуктора 13, 15. Сигнал о включении тормозов поступает от резистивного датчика 11. Для уменьшения воздействия на окружающее оборудование стенд имеет массивное основание, находящееся в массовом соотношении к падающему грузу 10:1. Основание устанавливается на пневматических подушках 8.[4]

Для исключения раскачивания основания на подушках, в конструкцию введены демпфирующие элементы – амортизаторы 10. Они ограничивает скорость сжатия и расширения подушек, поглощая большую часть энергии колебаний и превращая ее в тепловую.[9]

Но основе описанных выше прототипов и принятых в ГОСТ ограничениях на проведение механических ударных испытаний был разработан и изготовлен макет пневматического стенда многократных ударов (рисунок 6). Схема макета представлена на рисунке 7.

Рисунок 6. CAD-модель пневматического ударного стенда

Макет был разработан для решения следующих задач:

- тестирования различных алгоритмов управления пневматическим приводом;
- оценки конструктивного решения макета по основным критериям качества: жесткости, точности, грузоподъемности, погрешности позиционирования стола, достигаемой скорости перед началом удара;
- оценки предельных свойств запорно-распределительной пневматической арматуры по частоте срабатывания при реализации различных алгоритмов управления;
- исследования реализуемых ударных импульсов ускорения по основным критериям: закон, амплитуда, длительность;
- исследования влияния свойств формирователей импульсов, изготовленных из отечественных полимерных композиций, на параметры ударных ускорений;
- определения ресурса формирователей и качества адгезии к подложке в режиме многократных ударов;
- создания первичной базы данных формирователей импульсов.

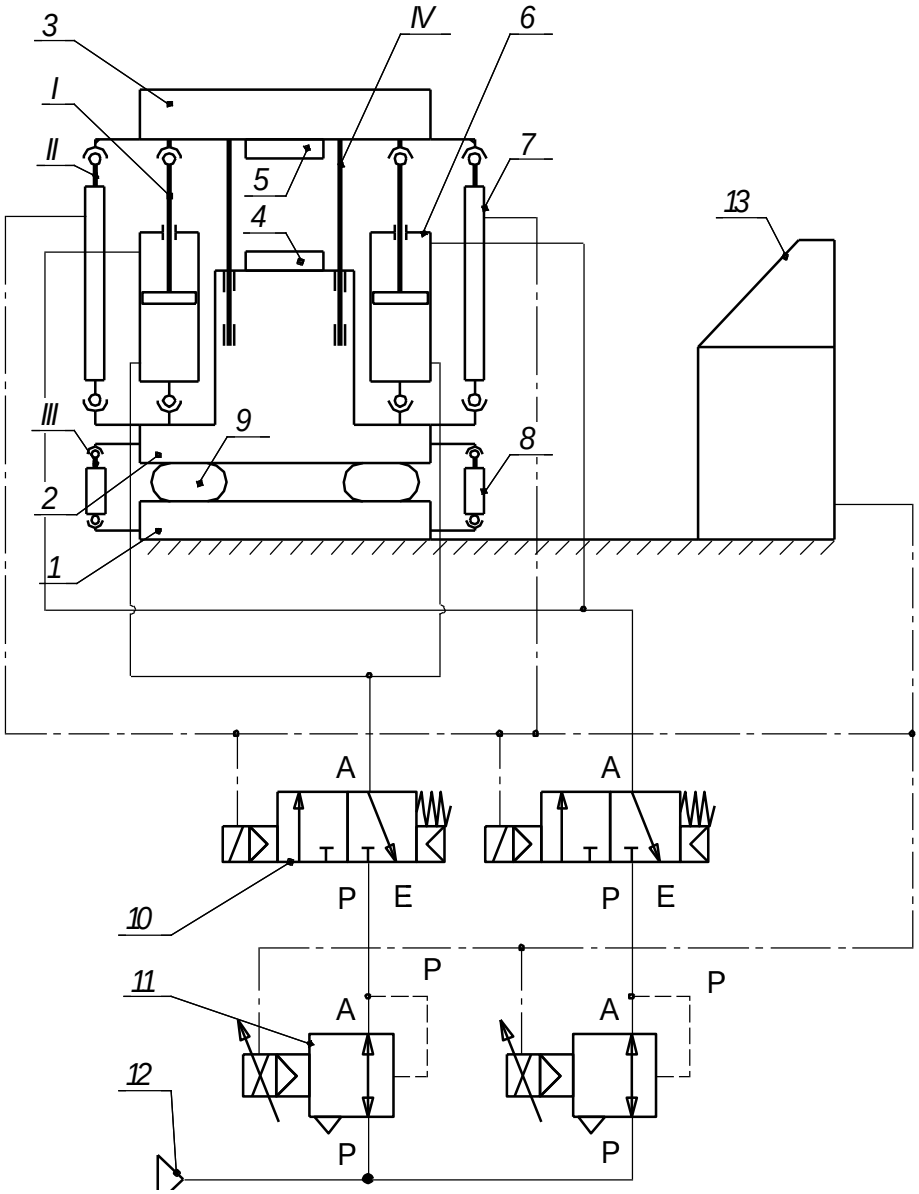


Рисунок 7. Комбинированная схема пневматического ударного стенда
I – шток пневмоцилиндра; II – шток линейного измерительного датчика;
III – шток гидравлического амортизатора; IV – направляющая.1 – неподвижное основание; 2 – инерционный блок; 3 – стол; 4 – наковальня; 5 – боек;
6 – пневматический цилиндр; 7- измерительный линейный датчик; 8 – гидравлический амортизатор; 9 – пневматическая подушка; 10 – пневматический распределитель;
11 - электропневматический преобразователь; 12 – напорная магистраль;
13 – стойка управления.

Макет (рисунок 7) имеет неподвижное основание 1, с которым посредством пневмоподушек 9 и гидравлических амортизаторов 8 соединен массивный инерционный блок 2. Испытываемый образец устанавливается на стол 3, который приводится в движение по направляющим IV пневмоцилиндрами 6. На наковальне 4 крепится формирователь импульса. Макет снабжен стойкой 13, в которой расположен компьютер с управляющей программой, написанной в среде LabView. Компьютер обрабатывает информацию, получаемую с датчиков

линейных перемещений 7, а также управляет подачей сжатого воздуха в полости пневмоцилиндров из напорной магистрали 12, которая осуществляется посредством пневматических распределителей 10 и электропневматических преобразователей 11.

Первые результаты исследований макета по одному из интегральных критериев – параметрам ударного импульса (рисунок 1) представлены на рисунках 9,10,11.

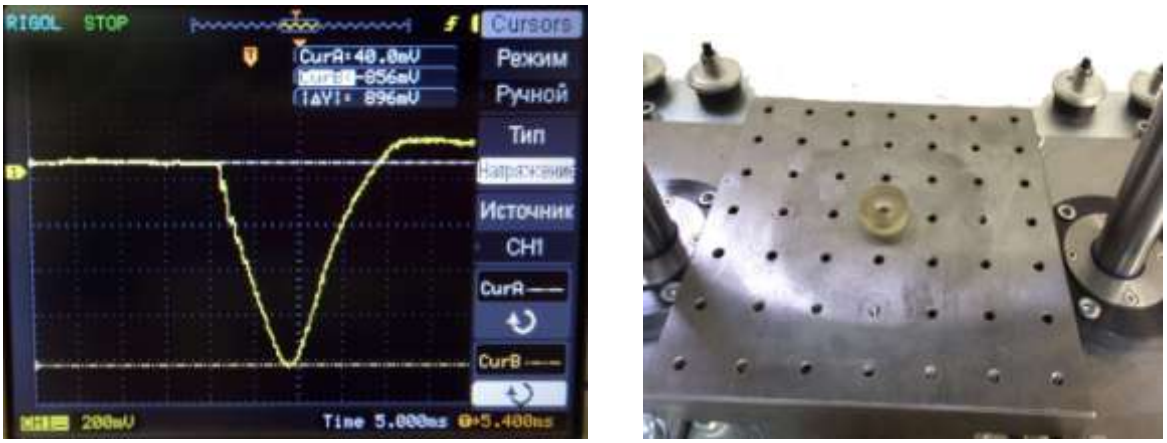


Рисунок 9. Кольцевой формирователь импульса

Форма ударного импульса (рисунок 9) – полусинусоидальная, материал формирователя – полиуретан, твердость по Шору 95А. Высота свободного падения стола 20 мм. Длительность нарастания импульса τ_0– 8 мс, амплитуда – 9 g.

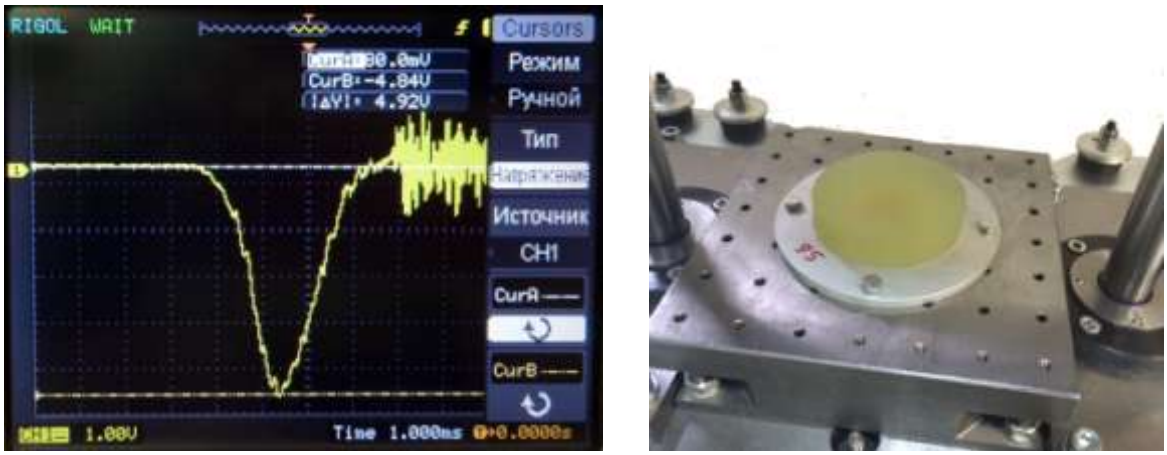


Рисунок 10. Цилиндрический формирователь импульса на подложке

Форма ударного импульса (рисунок 10) – полусинусоидальная, материал формирователя – полиуретан, твердость по Шору 95А. Высота падения стола 20 мм. Длительность нарастания импульса τ_0 – 2 мс, амплитуда – 50 g.

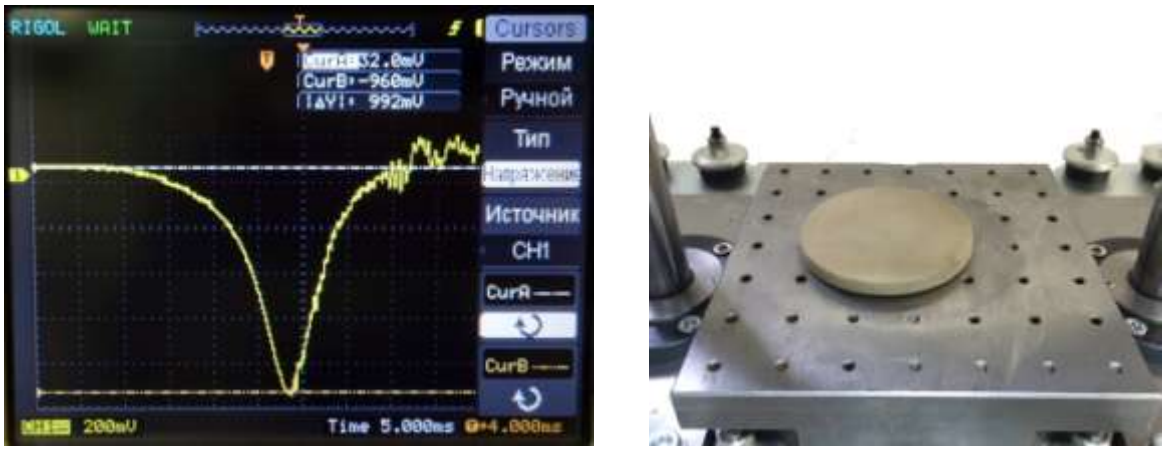


Рисунок 11. Цилиндрический формирователь импульса

Форма ударного импульса (рисунок 11) – полусинусоидальная, материал формирователя – пенополипропилен, твердость по Шору 20А. Высота падения стола 20 мм. Длительность нарастания импульса τ_0– 20 мс, амплитуда – 10 g.

Самый длительный импульс получился на формирователе с минимальной твердостью. Самая большая амплитуда – на жестком формирователе с большой площадью контакта.

Продолжая исследования формирователей, можно составить базу данных с характеристиками различных формирователей, что облегчит подбор формирователей импульса при испытаниях с разными требованиями к форме ударного импульса, его длительности и амплитуде.

Выводы

1. Проведен выбор и сравнительный анализ различных схем пневматических ударных стендов. На основании выполненного анализа, был разработан и изготовлен макет пневматического стенда многократных ударов.
2. Выполнены начальные работы по исследованию формирователей ударного импульса. Анализ различных вариантов показывает, что в зависимости от используемых материалов, возможно достижение больших значений амплитуд ударного ускорения, но при этом длительность ударного импульса существенно уменьшается. Полученные значения ускорений удовлетворяют требованиям, предъявляемым в промышленности [10].
3. Необходимы дополнительные исследования для определения вариантов компоновки ударных стендов разной грузоподъемности, а также для создания оптимального алгоритма управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ударный стенд свободного падения. Тимофеев А.Н., Попов А.Н., Полищук М.Н. Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 247-255.

2. ГОСТ Р 51371-99. Методы испытания на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов. Москва, Госстандарт, 2000. 28 с.
3. Компания «Вибросервистест» [официальный сайт]. URL: http://vstest.ru/ (дата обращения 10.04.2016).
4. Пневматический ударный стенд. Попов А.Н., Кузнецова В.В., Никитина Ю.В. В книге: Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» материалы научно-практической конференции. Институт металлургии,машиностроения и транспорта СПбПУ. Санкт-Петербург, 2015. С. 21-24.
5. А.Н. Попов, М. Н. Полищук, Ал. Н. Тимофеев. Стенды для механических испытаний: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016, с 82-83.
6. Моделирование работы пневматического ударного стенда. А. Н. Попов, Васильев А. К. В книге: Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии,машиностроения и транспорта СПбПУ. Санкт-Петербург, 2015. С. 23-27
7. ГОСТ 28215-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Москва, Стандартинформ, 2006, с 6.
8. Компания «Sonic Dynamics (КНР)» [официальный сайт]. URL: http://www.sonicdynamics.com.cn/ (дата обращения 8.04.2016).
9. Добромиров В.Н., Острецов А.В. Конструкции амортизаторов: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение». – М: МГТУ «МАМИ», 2007. – 7 с.
10. Евстафьев М.И., Ковалев А.С., Елисеев Д.П., Розенцвейн Д.В.. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях// Гироскопия и навигация 2011.- №1.-С. 49-58.

A.N. Popov, N.E. Pulenets, A.K. Vasilev, E.A. Lopatina

PNEUMATIC SHOCK MACHINE LAYOUT

all: Peter the Great St.Petersburg PolytechnicUniversity, Russia

Abstract

The article is devoted to analyze foreign and domestic models of repeat shock-testing machines. The describtion of pneumatic shock machine layout designed by engineers of department “Automated Machines” is prezented. First effects of pulse formers research and shock pulse oscillogram by domestic polyurethane pulse former are introduced. Cutoff frequencies of the layout are measured. The results are used as the basis for future domestic industrial design of pneumatic shock machine in the framework of the import substitution programme.

Key words: repeat pneumatic shock machine, design, layout, test, shock pulse, amplitude, pulse waveform, frequency.

REFERENCES

[1] Free fall shock machine. A.N. Timofeev, A.N. Popov, M.N. Polishchuk. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2013. Pp.247-255

[2] GOST R 51371-99. Mechanical environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test for influence of shocks. Moscow, Gosstandart of Russia, 2000, 28 p.

[3] Company «Vibroservicetest» [official website]. URL: http://vstest.ru/ (accessed 10.04.2016).

[4] Pneumatic shock machine. A.N. Popov, V.V. Kuznetsova, Y. V.Nikitina. Lib: International Scientific and Practical Conference "Science Week at SPbPU": conference proceedings. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, SPbPU. Saint-Petersburg, 2015. Pp. 21-24.

[5] A.N. Popov, M.N. Polishchuk, Al.N. Timofeev. Mechanical testing stands: training manual. SPb.:Polytechnic university publishing house, 2016, pp. 82-83.

[6] Pneumatic shock machine simulation. A.N. Popov, A.K. Vasilev. Lib: International Scientific and Practical Conference "Science Week at SPbPU": conference proceedings. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, SPbPU. Saint-Petersburg, 2015.

[7] GOST 28215-89. Basic environmental testing procedures. Part 2. Tests. Moscow, Standartinform, 2006, p. 6.

[8] Company «Sonic Dynamics» (PR China) [official website]. URL: http://www.sonicdynamics.com.cn/ (accessed 8.04.2016).

[9] V.N. Dobromirov, A.V. Ostrecov. Shock-absorber design: manual for graduate students with a degree in «Automobile and tractor construction». – M: MSTU «MAMI», 2007. 47 p.

[10] M.I. Evstaf'ev, D.P. Eliseev, A.S. Kovalev, D.V. Rozentsvein. Results of MEMS Gyro Mechanical Tests. Gyroscopy and navigation. 2011. №1. Pp. 49-58.

УДК 67.17; DOI 10.1872/MMF-2016-68

А. Н. Попов[1], А. Н. Тимофеев[2], М. Н. Полищук[3]

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КЛАДКИ КИРПИЧНЫХ СТЕН

[1]Аркадий Николаевич Попов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: porka.n@mail.ru

[2]Александр Николаевич Тимофеев, к.т.н., ведущий инженер
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: automats@inbox.ru

[3]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

Аннотация

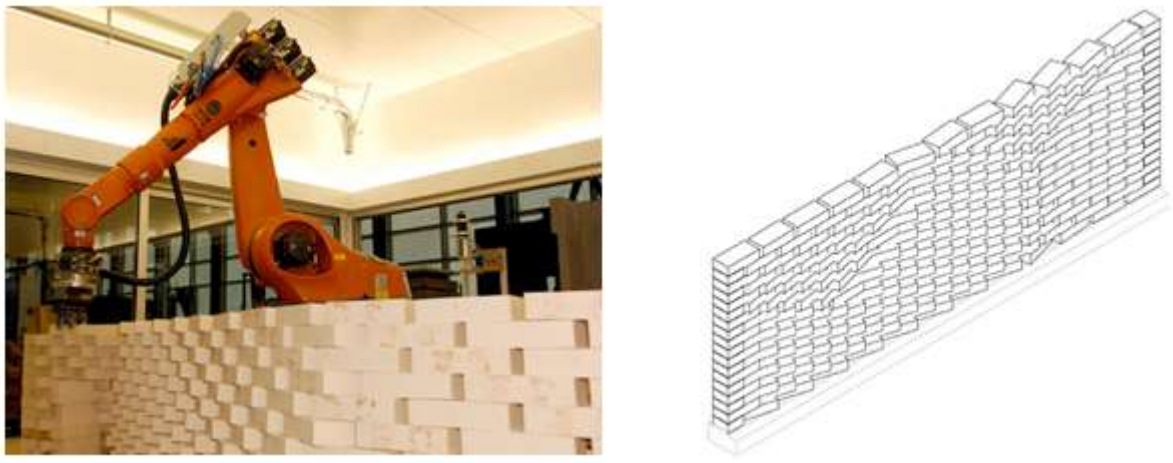
Предложена новая технология и оборудование для кладки фасадных кирпичных стен. Инновация основана на использовании ручной машины с электромагнитным следящим приводом, работающей в комплексе с двумя лазерными построителями плоскостей. Главным преимуществом новой технологии является высокая точность кладки стен. Отклонение положения кирпича по вертикали и горизонтали составляет не более ± 0,5 мм. Вторым преимуществом технологии является возможность получения высокой производительности работы при низкой квалификации каменщика. Описан ряд устройств, позволяющих реализовать инновации. Рассмотрен принцип действия, схемы устройств, представлена их структура, приведены результаты полевых испытаний. Технология и оборудование защищены рядом патентов.

Ключевые слова: строительство, кирпичная кладка, технология, качество, производительность, оборудование, позиционер, лазерные построители плоскостей.

В настоящее время высокими темпами ведется строительство в жилищной сфере. Несмотря на широкое распространение монолитных конструкций из железобетона с навесными вентилируемыми фасадами, по-прежнему пользуется спросом индивидуальное жилье, построенное из

газобетонных блоков, пенофибробетонных блоков с кирпичной отделкой и, конечно, из кирпича. Причиной этого, скорее всего, являются многовековые традиции и привлекательность самого кирпича, как строительного материала [1, 2, 9]. К примеру, только в США ежегодно производится более 10 млрд. кирпичей. Аналогичная ситуация характерна для стран Евросоюза и России. Укладываются кирпичи до настоящего времени вручную. При этом делалось множество попыток предложить новые способы и построить машины, которые бы механизировали и автоматизировали процесс кладки кирпичных стен, обеспечивая высокую производительность и стабильное качество.

К качеству кладки, особенно фасадных стен, всегда предъявляются высокие требования. Фасадные стены выкладываются отделочным кирпичом, они должны иметь правильную геометрию, которую можно обеспечить только при определенном положении каждого кирпича на стене. При этом погрешность положения кирпичей не должна превышать ±2..3 мм [10], как по длине, так и по высоте стены. Такие требования по укладке легко могут обеспечить роботы, широко применяемые в автомобильной промышленности. Робот для кладки кирпичных стен компании KUKA Roboter – "R.O.B", установленный на рельсовые направляющие, был продемонстрирован в 2009 г. в Нью-Йорке компанией Gramazio & Kohler GmbH (Zurich, Switzerland) и годом ранее на 11-ом архитектурном биеннале в Венеции. Робот может выкладывать стену произвольной геометрии (рис. 1, *а*), фактически реализуя технологию быстрого прототипирования – послойного выкладывания произвольных архитектурных форм (рис. 1, *б*). Технология изготовления произвольных архитектурных форм реализована компанией ROB Technologies AG [3].



а *б*

Рис. 1. Демонстрация возможностей промышленного робота при кладке кирпичных стен

Но этот робот может работать только в цеху или при хороших погодных условиях и не может использовать в качестве связующего цементно-песочный раствор. Роботизированная технология требует укладки жесткого рельсового пути, параллельного стене, с погрешностью, меньшей погрешности укладки кирпичей на стене. Укладка точного рельсового пути на грунте не вызывает трудностей, но поэтажная укладка рельсовых путей при строительстве зданий уже технически трудоемка, экономически не эффективна и поэтому работа каменщика по-прежнему оказывается востребованной.

Количество патентов, относящихся к способам и устройствам для ручной кладки кирпичных стен зданий, машинам и манипуляторам для их реализации, исчисляется сотнями. При жестких требованиях к качеству кладки, меняющихся в широких пределах свойствах кладочного раствора и недетерминированности производственной среды на строительной площадке большинство попыток автоматизации заканчивалось патентованием и изготовлением только опытных образцов, которые не пошли в серию. Причиной этой ситуации явились не только особые условия строительной площадки, плохо сочетающиеся с требованиями промышленной автоматизации, но и желание разработчиков автоматизировать весь технологический цикл, максимально исключив из процесса рабочего. Это резко поднимает стоимость автоматизации, снижает надежность оборудования и становится экономически неэффективным и технически нецелесообразным. Поэтому сегодня автоматизирован только процесс производства кирпичей на кирпичных заводах и их укладки на транспортные поддоны, на которых они доставляются на строительную площадку. Далее все операции выполняются вручную.

Традиционный процесс кладки состоит из нескольких переходов и осуществляется звеном рабочих во главе с каменщиком высокой квалификации. Именно его опытом и уровнем квалификации определяется производительность и качество работ. Так как высокие показатели способен обеспечить только опытный каменщик, то труд такого мастера оказывается чрезвычайно востребованным. На практике же наблюдается острый дефицит подобных специалистов, поскольку каменщикам приходится работать на открытом воздухе в незащищенной среде, часто в жестких погодных условиях. Поэтому особенно актуальным становится создание устройств для кладки кирпича, которые бы позволяли неквалифицированным каменщикам работать на уровне квалифицированных специалистов.

При автоматизации кладки кирпичных стен решаются три основные задачи: нанесение слоя раствора на постельный шов и заполнение вертикальных швов, транспортирование кирпича к позиции укладки и точная укладка кирпича в фиксированной позиции на стене. Если

рассматривать эти операции с точки зрения качества кладки и погрешностей формы стены, то определяющими операциями являются равномерное нанесение дозированного количества раствора и точная укладка кирпича на стене. При соблюдении таких требований получается равномерный шов, строгая горизонтальность каждого ряда кладки и малое, незаметное наблюдателю отклонение углов здания от вертикали.

Для нанесения слоя раствора давно существует различная оснастка в виде кареток, трафаретов и салазок, позволяющая точно регламентировать этот процесс. При кладке стен из газобетонных блоков для равномерного нанесения клея используются зубчатые скребки и шпатели. Авторы статьи разделили эти задачи и предлагают автоматизировать только одну ключевую технологическую операцию – точную укладку кирпича на стене с формированием шва строго фиксированного размера, остальные операции по-прежнему предлагается выполнять традиционным способом с применением оснастки и малой механизации. Известно, что такой подход в ряде отраслей промышленности, в частности, в машиностроении и приборостроении получил название островной автоматизации и дал экономический эффект.

Решение поставленной задачи стало возможным благодаря достижениям в области микроэлектроники, лазерной и оптической техники, управляемого привода и энергоемких аккумуляторов. Схема первого из устройств, реализующих такую постановку, представлена на рис. 2.

Кирпич 1 укладывается на стену с предварительно нанесенным слоем раствора вручную, а на него каменщик накладывает платформу 2 с двумя вибраторами 3. Вибраторы работают и осаживают кирпич до тех пор, пока луч горизонтального лазерного излучателя 4 не попадет на оптический приемник 6. Равномерное осаживание платформы контролируется по уровню 8 [4]. Положение ложковой грани кирпича контролируется по приемнику вертикального луча 7 лазерного излучателя 5. Применение описанного устройства в условиях строительной площадки показало принципиальную возможность высокого качества укладки кирпичей неквалифицированными рабочими, но выявило и основной недостаток – низкую производительность, определяемую двумя факторами: необходимостью ручной синхронизации осаживания кирпича по вертикали и ручным смещением кирпича по фронту. Полевые испытания и общий вид позиционера представлены на рис. 3.

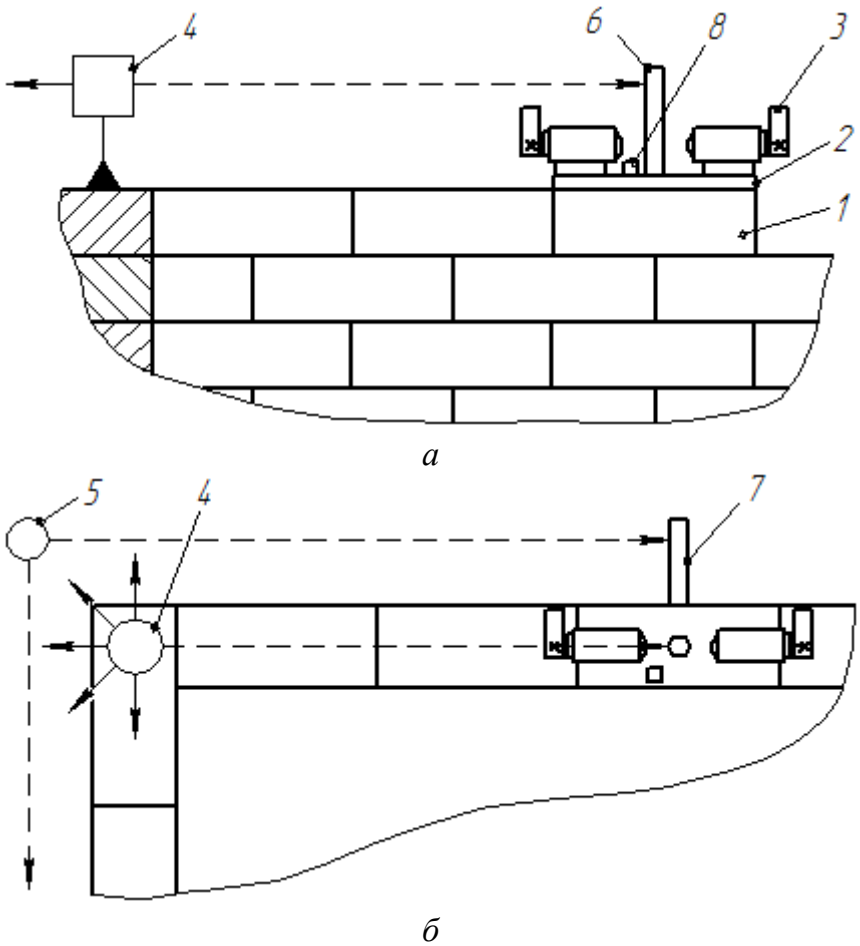


Рис. 2. Расположение на кирпичной стене лазерных излучателей и позиционера с вибраторами

Рис. 3. Первый позиционер на полевых испытаниях

Схема другого устройства, обеспечивающего автоматизацию этих операций представлена на рис. 4 [5].

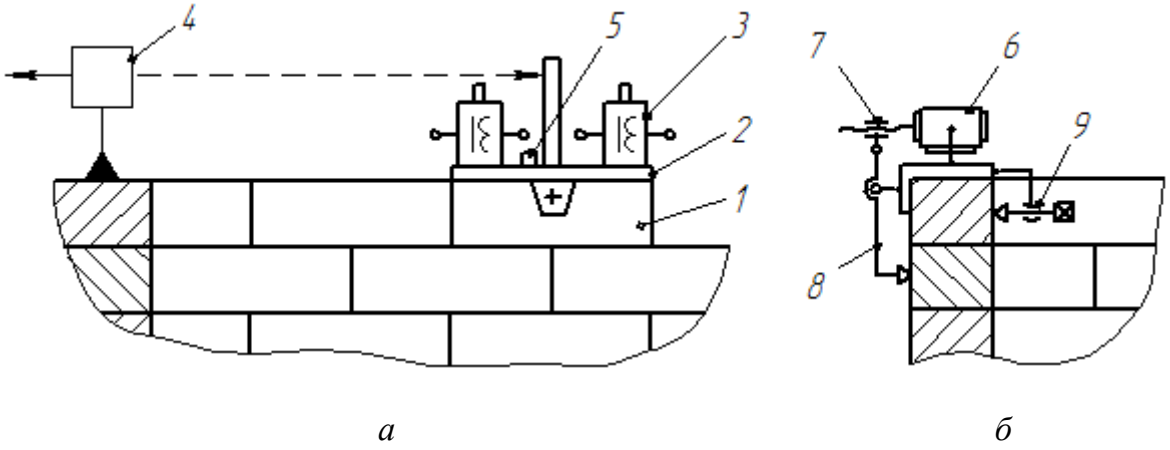


Рис. 4. Расположение на стене лазерных излучателей и позиционера с автоматическим смещением кирпича по вертикали и горизонтали

Устройство осаживает кирпич 1 двумя соленоидными приводами 3 (электромагнитными молотками), смонтированными на платформе 2. Равномерное осаживание кирпича реализовано за счет их независимой работы. Информация об отклонении от горизонтального положения верхней плоскости кирпича поступает на управляющий контроллер с электронного инклинометра 5. Контроллер подает питание на тот или иной соленоидный привод или на два одновременно в функции сигнала с инклинометра. Выравнивание кирпича по фронту стены реализовано двумя рычагами 8 (на рис. 4 показан только один рычаг). Рычаги приводятся в движение через передачу винт-гайка 7 от двигателей постоянного тока 6. Смещение кирпича осуществляется за счет опирания рычагов на нижний ряд кирпичей. В отличие от предыдущей технологии здесь кирпич первично устанавливается на стену вместе с платформой 2 посредством его фиксации с помощью винтового зажима 9. Структурно-функциональная схема такого позиционера приведена на рис. 5. Каменщик кладет кирпич на стену с подготовленной постелью таким образом, чтобы винтовые механизмы 7 (рис. 5) могли его сместить в направлении фасада стены, а электромолотки – осадить кирпич по вертикали, т. е. выше требуемой горизонтали и со смещением вглубь здания.

О правильности первичного положения кирпича сигнализирует блок индикации. После этого оператор запускает позиционер в работу. Все четыре привода начинают работать одновременно. Управление позиционером осуществляется от микроконтроллера. Электрическое питание подается от аккумулятора с напряжением 12 В. Для формирования вертикальной плоскости стены и каждого горизонтального ряда используются два лазерных излучателя и две оптические линейки. Оптические линейки в отличие от точечных приемников лазерного луча дают информацию о текущем положении кирпича по отношению к требуемому, в том числе при первичной установке кирпича на стену.

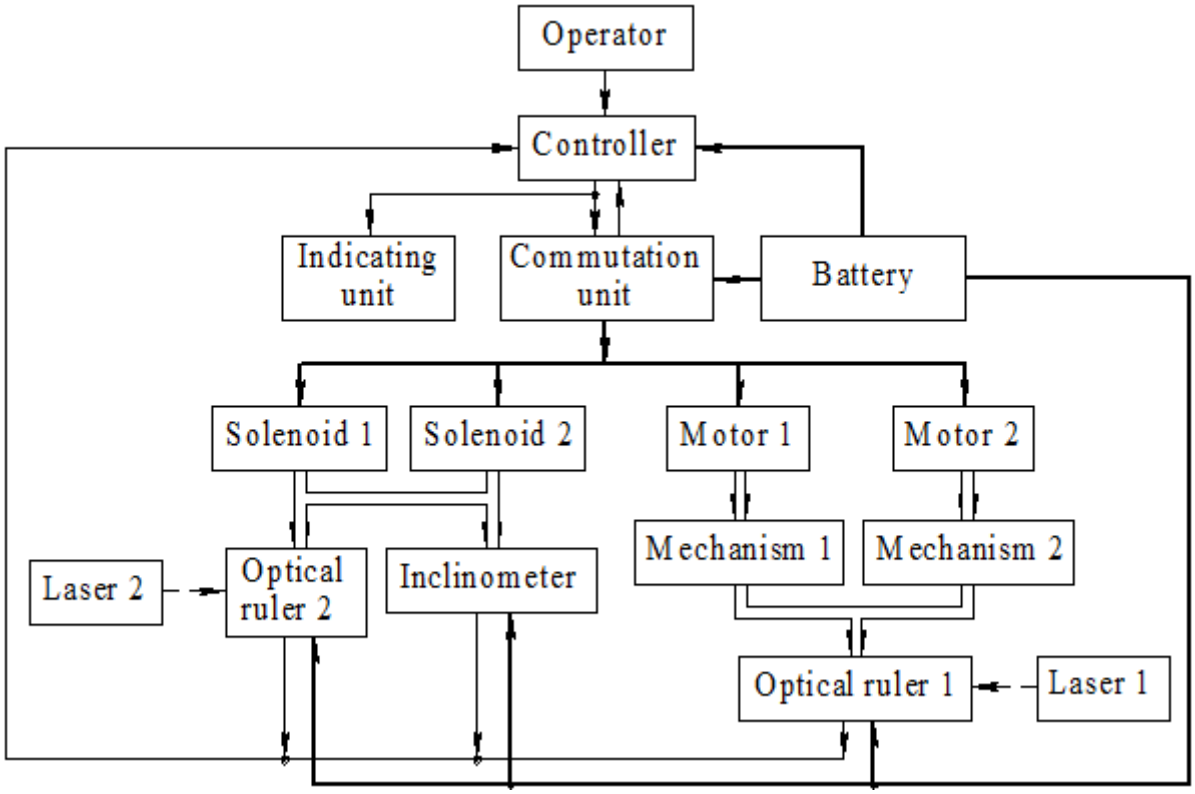


Рис. 5. Структурно-функциональная схема позиционера с автоматическим смещением кирпича: —►- цепи питания; —►- цепи обратных связей; ⇉ - механическое воздействие; – –►- лазерные лучи

Конструктивная реализация позиционера с автоматическим смещением кирпича приведена на рис. 6, позиционер на полевых испытаниях – на рис. 7. На рис. 7, *а* хорошо виден боковой упор, который необходим для формирования вертикального шва кирпичной кладки, на рис. 7, *б* – оптические датчики.

Рис. 6. Комплект оборудования для автоматической кладки кирпичных стен

а *б*

Рис. 7. Автоматический позиционер на полевых испытаниях

Верхний датчик, воспринимает луч лазера, дающего горизонтальную плоскость. Этот лазер установлен на предыдущем слое кирпичей и при формировании каждого последующего ряда кирпичной кладки смещается на один шаг по вертикали. Боковой (фасадный) датчик, контролирующий вертикальность каждого ряда кладки, воспринимает луч лазера, расположенного на грунте, у основания здания. Одной из проблем, которые необходимо было решить, состояла в обеспечении стабильной работы оптических датчиков и минимальное влияние солнечной засветки. Для этого был использован оптический полосовой фильтр, что увеличило дальность приема лазерного луча до 20 м.

Устройство, представленное на рис. 7, обеспечивает малую погрешность установки кирпичей на стене, но имеет и ряд недостатков. Необходимость предварительного захвата кирпичей и их базирования по упорам в позиционере приводит к дополнительным потерям времени и снижает производительность. Выносной аккумулятор ограничивает рабочую зону и также снижает производительность, поскольку требует периодической перестановки. Первоначальную установку позиционера на стене по фасаду необходимо выполнять строго параллельно нижнему слою кирпичной кладки, поскольку винтовые механизмы работают синхронно и не могут повернуть кирпич. Такой позиционер фактически является сложным мехатронным устройством, имеет приборную конструкцию и требует аккуратного обращения. Эти свойства плохо сочетаются с условиями строительной площадки. Вместе с тем, достигнутый авторами уровень понимания проблемы, позволил существенно упростить решение задачи автоматизации позиционирования кирпича за счет передачи позиционеру только одной функции − нормированного удара по кирпичу. Остальное − место удара и перемещение позиционера относительно кирпича отдано каменщику. Фактически позиционер приобрел функции электромагнитного молотка каменщика с обратной связью по положению кирпича [6, 7].

Структурно-функциональная схема такого устройства показана на рис. 8. Функциональное упрощение позволило существенно изменить и унифицировать конструкцию, а технологию приблизить к технологии работы каменщика, заменив молоток каменщика на ручной позиционер или, если быть точнее, на электромагнитный молоток. При этом молоток включается в работу по датчику касания поверхности кирпича. К первичной укладке кирпича на стене, как и в предыдущем случае, предъявляются определенные требования: его верхняя постельная грань должна лежать выше потребного уровня кладки , ложковая – выступать за фасад, а тычковая – должна сразу сформировать необходимый вертикальный шов.

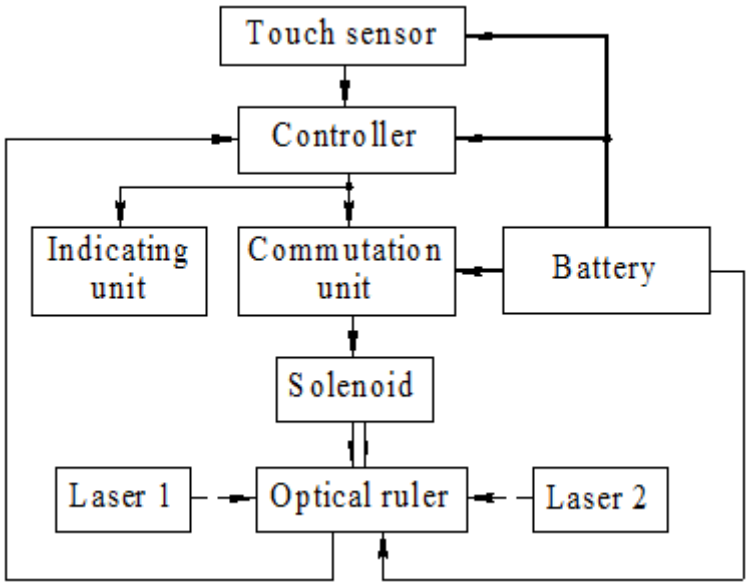
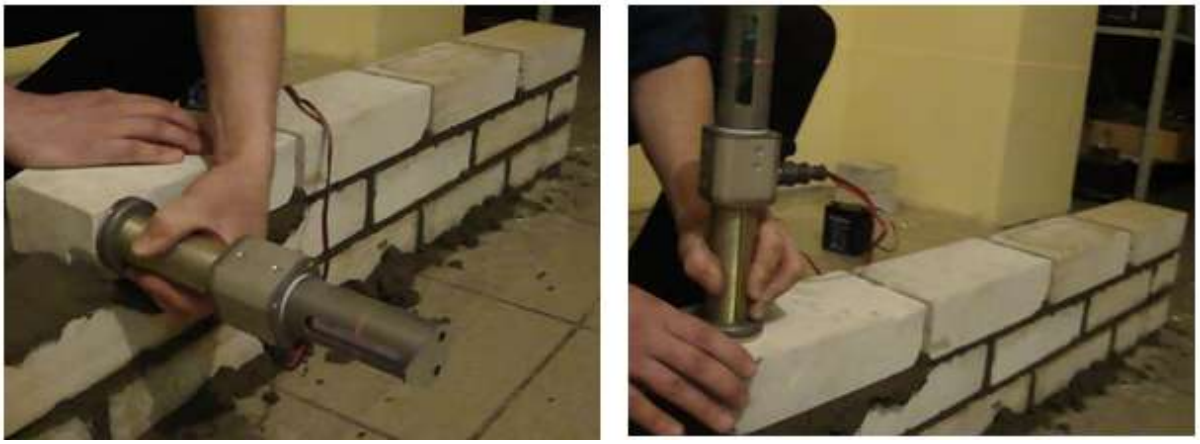


Рис. 8. Структурная схема ручного позиционера каменщика

Лабораторные испытания ручного позиционера с выносным аккумулятором показаны на рис. 9.



а *б*

Рис. 9. Лабораторные испытания ручного позиционера каменщика

На рис. 9, *а* показано формирование фасада стены, определяемого автоматическими ударами молотка по левому и правому краю ложковой грани кирпича, на рис. 9, *б* – осаживание по вертикали путем ударов молотка по постельной грани кирпича. В итоге достигается идеальное положение кирпича на стене. Полученный результат кладки кирпичных стен иллюстрируется на рис. 10. При этом обращаем внимание на то, что кирпичная кладка не выполнялась профессиональными каменщиками, а велась рабочим без специальных навыков.

Рис. 10. Выкладывание стен жилого дома с помощью ручного позиционера

Оптимизация конструкции ручного позиционера [8] позволила существенно уменьшить энергопотребление при сохранении энергии удара, необходимой при использовании традиционного молотка. Поэтому на рис. 10 ручной позиционер имеет не выносной, а сменный аккумулятор, заимствованный у серийного шуруповерта. При емкости аккумулятора 1,2 Ач период его смены при непрерывной работе составил 4 час. Ручной позиционер также позволяет настраивать силу удара в зависимости от жесткости кладочного раствора.

В заключение отметим, что технология и разработанное оборудование обеспечивают решение следующих основных задач:

- замену каменщиков высокой квалификации на малоквалифицированных рабочих при обеспечении высокой производительности и качества работы за счет простоты технологии;
- автоматическое воспроизведение ручной технологии кладки путем создания ударов при осадке кирпича с требуемой частотой и силой;

• малую погрешность позиционирования кирпичей, не обеспечиваемую при традиционной технологии кладки.

Технология и принципы синтеза оборудования, предложенные в статье, могут быть распространены и на другие строительные работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Campbell, James W. P; Pryce, Will (2003). Brick: A World History. London: Thames and Hudson.
2. R. W. Brunskill. Brick Building in Britain. Victor Gollancz (Publisher) in association with Peter Crawley. An imprint of the Cassell Group. Wellington House, 125 Strand, London WC2R 0BB. 1997.
3. http://www.rob-technologies.com/en/projects/bricks.
4. А. Н. Попов, А.Н. Тимофеев, Н.В. Утцов. Патент на полезную модель «Фотоэлектрический уровень» № 79660 от 21.07.2008.
5. А. Н. Попов, А. Н. Тимофеев, Н. В. Утцов. Патент на изобретение «Устройство для ручной кладки кирпича» № 2382858 от 21.07.2008.
6. А. Н. Попов, А. Н. Тимофеев, Н. В. Утцов. Патент на изобретение «Устройство для ручной кладки кирпича» № 2444597 от 16.07.2010.
7. А. Н. Попов, А. Н. Тимофеев, Н. В. Утцов. Патент на изобретение «Устройство для ручной кладки кирпича» № 2445425 от 20.04.2012.
8. А. Н. Попов, М. Н. Полищук, А. Н. Тимофеев. Исследование позиционера кирпичной кладки. Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-ой международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2012. – с. 731-741.
9. М. О. Лукьянов. Искусство кирпичной кладки. – М. Цитадель, 2003. – 176 с.
10. С. С. Астаев, В. А. Бондарик, И. Н. Громов. Технология, механизация и автоматизация строительств. – М.: Высшая школа, 1990. – 592 с.

A. N. Popov, A. N. Timofeev, M. N. Polishchuk

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR BRICK WALLS LAYING

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

A new technology and equipment for facade brick walls laying were offered. The innovation is based on usage of a manual machine with an electromagnetic drive, working in conjunction with two laser tools. The main advantage of new technology is high accuracy of walls masonry. The achieved deviation in vertical and horizontal positioning of bricks is not more than ± 0,5

mm. The second advantage of the technology is an ability to obtain high operation capacity at low qualification of a bricklayer. The series of special devices, which allow to implement innovations were described. The article describes the principle of operation, circuit devices, their structure, the results of field tests. Technical originality confirmed by a number of authors patents.

Key Words: innovation, brick laying, technology, equipment, positioner, laser tools, quality, operation capacity.

REFERENCES

[1] Campbell, James W. P; Pryce, Will (2003). Brick: A World History. London: Thames and Hudson.
[2] R.W. Brunskill. Brick Building in Britain. Victor Gollancz (Publisher) in association with Peter Crawley. An imprint of the Cassell Group. Wellington House, 125 Strand, London WC2R 0BB. 1997.
[3] http://www.rob-technologies.com/en/projects/bricks.
[4] A.N. Popov, A.N. Timofeev, N.V. Utsov. Patent for useful model of 'Photoelectric Level' No. 79660 dated 21.07.2008.
[5] A.N. Popov, A.N. Timofeev, N.V. Utsov. Patent for 'Device for manual brick masonry' invention No. 2382858 dated 21.07.2008.
[6] A.N. Popov, A.N. Timofeev, N.V. Utsov. Patent for 'Device for manual brick masonry' invention No. 2444597 dated 16.07.2010.
[7] A.N. Popov, A.N. Timofeev, N.V. Utsov. Patent for 'Device for manual brick masonry' invention No. 2445425 dated 20.04.2012.
[8] Research of brick masonry positioner. A. N. Popov, M. N. Polishchuck, A. N. Timofeev, Modern Engineering. Science and Education: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference/ under the editorship of M. M. Radkevich and A. N. Evgrafov. SPb. Publishing house of Polytechnical University, 2012. Pp. 731-741.
[9] M. O. Lukyanov. Brick art. M. 2003. 176 p.
[10] S. S. Astaev, V. A. Bondarik, I. N. Gromov. Technology, mechanization and automation in buiding construction. Moscow. 1990. 592 p.

УДК 621.865; DOI 10.1872/MMF-2016-69

А.А.Суханов

МЕТОД ДВОЙСТВЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Александр Алексеевич Суханов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 552-7801, E-mail: Alexeevich@post.ru

Аннотация

В работе рассматривается двойственный метод решения задачи оптимального быстродействия для двухзвенного манипулятора, заключающийся в замене исходной задачи с неопределенным временем управления на задачу с фиксированным временем управления.

Ключевые слова: задача оптимального быстродействия, робот-манипулятор, метод двойственности, уравнения Эйлера-Лагранжа.

1. Постановка задачи оптимизации и проблемы реализации

Одной из основных задач, решаемых при функционировании манипуляционных роботов, задача позиционирования – перемещения рабочего органа робота (схвата манипулятора) в заданную точку пространства [1-4]. При этом обеспечение требуемой точности позиционирования (основной показатель работы манипулятора) находится в противоречии с такой немаловажной характеристикой системы, как быстродействие, которое в свою очередь определяется мощностью двигателей. Одним из источников ошибок здесь является податливость звеньев механизма робота, проявляющаяся в возникновении упругих колебаний, усиливающихся при увеличении движущих моментов. Указанные обстоятельства сильно ограничивают производительность промышленных роботов-манипуляторов [5]. Таким образом, мы необходимо приходим к оптимизационной постановке задачи управления движением роботных систем, формулировка которой выглядит следующим образом. Требуется переместить некоторую массу из одной точки пространства в другую с заданной точностью за минимальное время, учитывая естественные ограничения на управления (задача оптимального быстродействия). Другая возможная постановка задачи позиционирования заключается в минимизации затрат на управление при фиксированном

времени движения. Большие работы в этих направлениях велись и ведутся в Институте проблем механики РАН [6-11].

Рассмотрим задачу оптимального управления на примере простейшего двухзвенного манипулятора, совершающего плоскопараллельное движение (рис.1). Здесь O_1 и O_2 - шарниры манипулятора, l_1 и l_2 - длины звеньев, m - масса груза, M_1 и M_2 - управляющие моменты, приложенные к осям шарниров, r и φ - полярные координаты точки схвата.

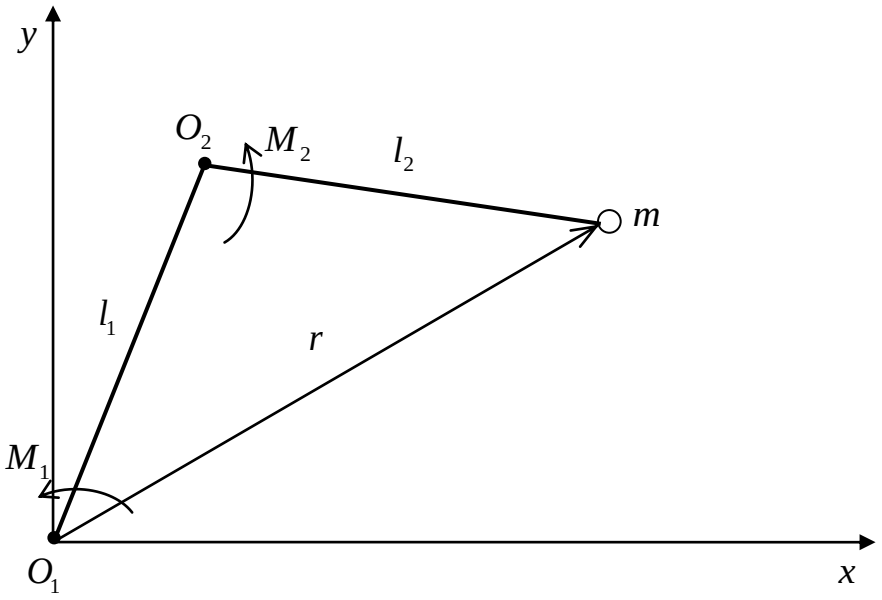


Рис.1. Кинематическая схема двухзвенного манипулятора

Не уменьшая общности, перейдем к безразмерным координатам и положим $l_1 = l_2 = 1,\ \ m = 1.$ Предположим далее, что звенья являются абсолютно жесткими, а их массами по сравнению с массой груза можно пренебречь. Не будем также учитывать момент инерции груза, считая его точечным. В этих классических предположениях в [12, 13] выводятся уравнения движения центра масс груза в декартовой системе координат xO_1y. Удобнее, однако, в данном случае перейти к полярным координатам. Тогда уравнения движения манипулятора запишутся в виде

$$\begin{aligned} &\ddot{r} = r\dot{\varphi}^2 + \frac{2M_2 - M_1}{\sqrt{4 - r^2}}, \\ &\frac{d}{dt}\ r^2\varphi\ = M_1. \end{aligned} \tag{1}$$

Пусть требуется за время T переместить груз из положения покоя, определяемого координатами r_0, φ_0 в заданную точку с координатами r_T, φ_T при скорости в конце перемещения, равной нулю. Граничные условия при этом выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} &r\ 0\ =r_0,\ \ \dot{r}\ 0\ =0,\ \ \varphi\ 0\ =\varphi_0,\ \ \dot{\varphi}\ 0\ =0,\\ &r\ T\ =r_T,\ \dot{r}\ T\ =0,\ \ \varphi\ T\ =\varphi_T,\ \dot{\varphi}\ T\ =0. \end{aligned} \tag{2}$$

Поставим вначале задачу минимизации затрат на управление, роль которого выполняют движущие моменты, при фиксированном времени позиционирования T. Требуется определить моменты $M_1\ t$ и $M_2\ t$, обеспечивающие выполнение условий (2) и минимизирующие интегрально-квадратичный функционал качества

$$J=\frac{1}{2}\int_0^T M_1{}^2+M_2{}^2\ dt\to\min\ , \tag{3}$$

играющий роль энергетических затрат.

Для упрощения дальнейшего исследования удобно использовать следующую замену переменных

$$K=mr^2\dot{\varphi}=r^2\dot{\varphi}\ ,$$

где K - момент количества движения. Тогда уравнения движения (1) и условия (2) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} &\dot{r}=V,\\ &\dot{V}=\frac{K^2}{r^3}+\frac{2M_2-M_1}{\sqrt{4-r^2}},\\ &\dot{\varphi}=\frac{K}{r^2},\\ &\dot{K}=M_1, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &r\ 0\ =r_0,\ \ V\ 0\ =0,\ \ \varphi\ 0\ =\varphi_0,\ \ K\ 0\ =0,\\ &r\ T\ =r_T,\ V\ T\ =0,\ \ \varphi\ T\ =\varphi_T,\ K\ T\ =0. \end{aligned} \tag{5}$$

Теперь поставим более актуальную задачу оптимального быстродействия, формулируемую следующим образом. Требуется

определить управляющие моменты $M_1\ t$ и $M_2\ t$, обеспечивающие перемещение груза в соответствии с (5) за минимальное время T при ограничении

$$\frac{1}{2}\int_0^T M_1^{\ 2} + M_2^{\ 2}\ dt \le J_0\ . \tag{6}$$

Эта задача в общем случае сложнее предыдущей, т.к. появляется новая неизвестная переменная T, для определения которой к уравнениям Эйлера-Лагранжа (см. ниже) должно быть добавлено условие трансверсальности [14]

$$H\ T_{\min}\ = 0, \tag{7}$$

где $T_{\min}$ - определяемое минимальное время управления, H - гамильтониан системы. Более того, наличие дополнительного ограничения-неравенства (6) существенно усложняет решение, особенно, если оно ищется численным способом. И, наконец, присутствие иррациональности в уравнениях движения (4) серьезно затрудняет как аналитические преобразования, так и численные вычисления.

Для преодоления указанные трудностей, характерных для задач оптимизации механических систем, разработаны методы регуляризации решения и сведения исходных задач к более простым двойственным.

2. Сведение задачи оптимального быстродействия к двойственной

Как уже отмечалось, решение задачи оптимального быстродействия (4)-(6) с определение $T_{\min}$ сложнее задачи минимизации функционала (3) при фиксированном времени управления T. Поэтому решим сначала последнюю.

Прежде, чем приступить к решению, избавимся от иррациональности в уравнениях движения (4) оригинальным методом сведения к алгебраическим функциям за счет дополнительных дифференциальных уравнений [15]. Дело в том, что при решении задач оптимального управления непрямыми методами (использующими необходимые условия оптимальности [14]) составление сопряженной системы уравнений подразумевает дифференцирование гамильтониана (а, значит, и правых частей уравнений движения) по вектору переменных. При этом происходит «нагромождение» трансцендентных и иррациональных функций. Далее, при решении полученной краевой задачи необходимо второе дифференцирование для построения матрицы Якоби [16]. И, наконец, желание проверить выполнение достаточных условий

оптимальности приводит к необходимости еще одного дифференцирования гамильтониана для получения второй вариации функционала качества и соответствующей матрицы Гессе [14]. Все это порождает трудоемкие аналитические преобразования с одной стороны, и непомерно большой объем программирования и вычислений с неизбежным увеличением погрешности и времени счета – с другой стороны.

Итак, введем новую переменную

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{4 - r^2}} \ , \tag{8}$$

определяемую из решения дополнительного дифференциального уравнения

$$\dot{\xi} = -\frac{1}{2}\frac{1}{\sqrt{4 - r^2}^{\ 3}} \ -2r \ \dot{r} = r\xi^3 V, \ \ \xi \ T \ = \frac{1}{\sqrt{4 - r_T^{\ 2}}} = \xi_T \ . \tag{9}$$

Задание здесь терминального условия вместо начального сделано для повышения точности интегрирования, т.к. решение краевых задач оптимизации с использованием необходимых условий экстремума является всегда неустойчивым [14].

С учетом (8) и (9) уравнения движения манипулятора и граничные условия примут вид

$$\begin{aligned}
&\dot{r} = V, \\
&\dot{V} = \frac{K^2}{r^3} + \xi \ 2M_2 - M_1 \ , \\
&\dot{\varphi} = \frac{K}{r^2}, \\
&\dot{K} = M_1, \\
&\dot{\xi} = r\xi^3 V,
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
&r \ 0 \ = r_0, \ \ V \ 0 \ = 0, \ \ \varphi \ 0 \ = \varphi_0, \ \ K \ 0 \ = 0, \\
&r \ T \ = r_T, \ V \ T \ = 0, \ \ \varphi \ T \ = \varphi_T, \ K \ T \ = 0, \ \ \xi \ T \ = \xi_T .
\end{aligned} \tag{11}$$

Изменим масштаб времени:

$$t=\omega\tau,\quad \frac{d}{dt}=\frac{1}{\omega}\frac{d}{d\tau}\ . \tag{12}$$

Тогда уравнения (10) запишутся в виде

$$\begin{aligned} r' &= V\omega,\\ V' &= \frac{K^2}{r^3}\omega+\xi\ \ 2M_2-M_1\ \ \omega,\\ \varphi' &= \frac{K}{r^2}\omega,\\ K' &= M_1\omega,\\ \xi' &= r\xi^3 V\omega. \end{aligned} \tag{13}$$

Умножив второе и четвертое уравнения в (13) на ω и сделав замену

$$V\omega=V^*,\quad K\omega=K^*,\quad M_1\omega^2=M_1^*,\quad M_2\omega^2=M_2^*\ , \tag{14}$$

Мы получим уравнения, полностью совпадающие с (10) (с точностью до обозначений). Поскольку по V и K граничные условия нулевые, то сохранится и вид условий (11) для новых переменных.

Таким образом, решение задачи позиционирования инвариантно относительно изменения масштаба времени. Используя (12) и (14), находим, что минимальные значения функционалов (3) в обоих случаях связаны соотношением

$$J\left(\frac{T}{\omega}\right)=\frac{1}{2}\int_0^{\frac{T}{\omega}}\left[\ M_1^{*\ 2}+\ M_2^{*\ 2}\right]d\tau=\frac{1}{2}\int_0^{T}\ M_1^{\ 2}+M_2^{\ 2}\ \ \omega^3 dt=\omega^3 J\ \ T\ \ .$$

Откуда, обозначив $T_0=\omega^{-1}T$, находим

$$J\ \ T\ \ T^3=J\ \ T_0\ \ T_0^{\ 3}=Const\ . \tag{15}$$

Аналогично показывается, что оптимальные значения моментов в зависимости от времени позиционирования T подчиняются условиям

$$M_i\ \ T\ \ T^2=M_i\ \ T_0\ \ T_0^{\ 2}=Const,\quad i=1,2\ . \tag{16}$$

Здесь $M_i\ T$ означает зависимость моментов управления от величины времени управления T.

Таким образом, можно решить оптимальную задачу позиционирования (1)-(3) при любом времени управления T_0, а потом пересчитать полученные оптимальные значения функционала и моментов по формулам (15)-(16) для заданного времени управления T.

Теперь пойдем дальше. Докажем, что более сложную и более актуальную задачу оптимального быстродействия при заданном ограничении на управление (6) можно свести к более простой задаче минимизации функционала (3) при любом фиксированном времени управления T_0 (двойственной задаче). При этом искомое минимальное время управления $T_{\min}$ определится из условия

$$T_{\min} = \sqrt[3]{\frac{J\ T_0}{J_0}} T_0 \ . \tag{17}$$

Из инвариантного соотношения (15) хорошо видно, что минимальное время позиционирования будет при максимальном значении функционала (6), что, впрочем, понятно из физических соображений. Однако, функционал ограничен сверху величиной J_0. Поэтому в задаче оптимального быстродействия вместо неравенства (6) будем иметь ограничение-равенство

$$\frac{1}{2}\int_0^T M_1^{\,2} + M_2^{\,2}\ dt = J_0 \ . \tag{18}$$

Тогда, решая мысленно множество задач оптимизации с различными фиксированными временами управления T_i, выделим две задачи с произвольным временем T_0 и с таким временем, которому будет соответствовать значение функционала (18). В последнем случае, очевидно, время управления и будет равно искомому решению задачи оптимального быстродействия $T_{\min}$. Но подбирать его, конечно же, не требуется. Достаточно просто пересчитать время по формуле (17), вытекающей из (15), решив только задачу минимизации функционала (3) при любом фиксированном времени управления T_0. Аналогично пересчитываются найденные управляющие моменты по формуле (16).

3. Решение двойственной задачи

Для решения полученной двойственной задачи оптимального управления составим [14]:

гамильтониан системы

$$H=\frac{1}{2}\ M_1{}^2+M_2{}^2\ +\lambda_1 V+\lambda_2\left[\frac{K^2}{r^3}+\xi\ \ 2M_2-M_1\ \right]+\lambda_3\frac{K}{r^2}+\lambda_4 M_1+\lambda_5 r\xi^3 V\ ,$$

уравнения Эйлера-Лагранжа для сопряженных переменных λ_i

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_1&=-\frac{\partial H}{\partial r}=3\frac{K^2}{r^4}\lambda_2+2\frac{K}{r^3}\lambda_3-\xi^3 V\lambda_5,\\
\dot{\lambda}_2&=-\frac{\partial H}{\partial V}=-\lambda_1-r\xi^3\lambda_5,\\
\dot{\lambda}_3&=-\frac{\partial H}{\partial \varphi}=0,\\
\dot{\lambda}_4&=-\frac{\partial H}{\partial K}=-2\frac{K}{r^3}\lambda_2-\frac{1}{r^2}\lambda_3,\\
\dot{\lambda}_5&=-\frac{\partial H}{\partial \xi}=-\ \ 2M_2-M_1\ \ \lambda_2-3r\xi^2 V\lambda_5,
\end{aligned}\qquad (19)$$

условие оптимальности

$$\begin{aligned}
\frac{\partial H}{\partial M_1}&=0=M_1-\xi\lambda_2+\lambda_4,\\
\frac{\partial H}{\partial M_2}&=0=M_2+2\xi\lambda_2
\end{aligned}\qquad (20)$$

и условие трансверсальности

$$\lambda_5\ \ 0\ \ =0\ .\qquad (21)$$

Полученная краевая задача (10)-(11), (19)-(21) численно решалась при помощи оригинального метода сведения к задаче Коши [16, 17], реализованного в разработанных алгоритме и программе [18].

Результаты расчетов при $T_0=1$ с последующим пересчетом $T_{\min}$ и моментов в соответствии с ограничением $J_0=1$ представлены на рис.2-3. Точность позиционирования составляла 10^{-13} - 10^{-11}.

На рис.2 приведены оптимальные траектории перемещения схвата манипулятора для различных граничных точек, рядом с которыми стоят минимальные времена управления.

На рис.3 представлены зависимости оптимальных управляющих моментов шарнирах манипулятора для варианта с самой длинной рабочей зоной ($T_{\min} = 1.695$). Интересно отметить, что примерно подобный характер изменения управления имеет место и в остальных случаях.

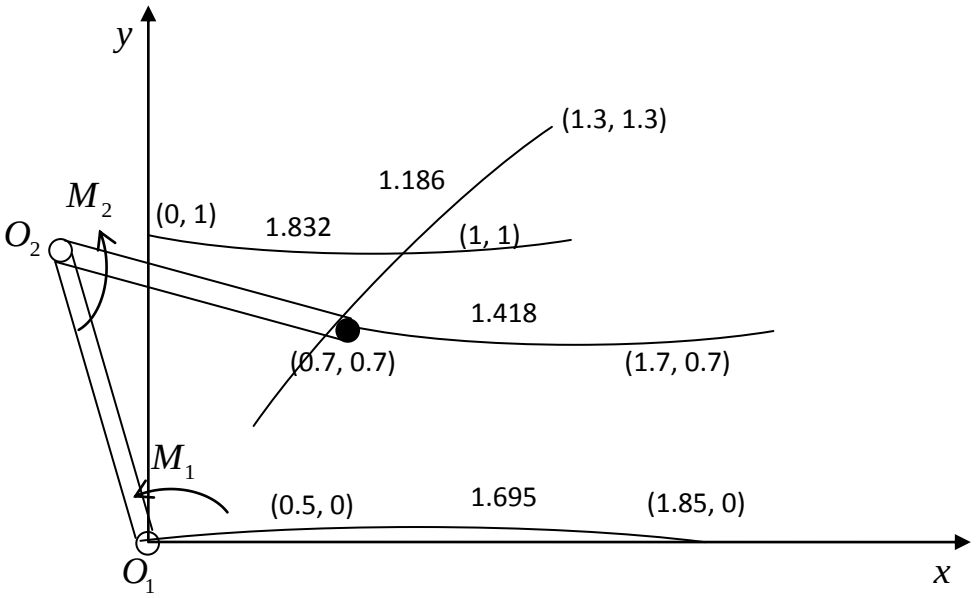


Рис.2. Оптимальные траектории перемещения схвата манипулятора

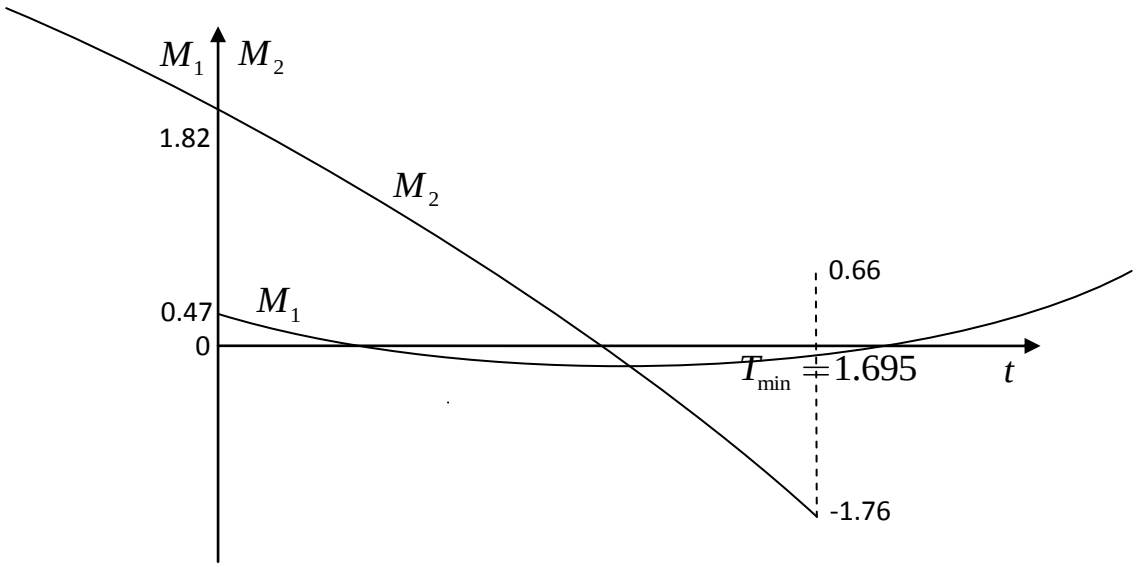


Рис.3. Оптимальные моменты в шарнирах манипулятора

4. Выводы

Предложенный метод решения задачи оптимального быстродействия сведением ее к эквивалентной простой двойственной задаче с фиксированным временем управления с одновременным сведением иррациональных функций к алгебраическому виду продемонстрирован на примере управления плоским двухзвенным манипулятором. Полученные оптимальные траектории движения схвата манипулятора близки к прямолинейным. Аналогичный вывод сделан в [13] при жестких (модульных) ограничениях на управляющие моменты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
2. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 480 с.
3. Лутманов С.В., Куксенок Л.В., Попова Е.С. Задачи управления двухзвенным манипулятором с вращательными кинематическими парами //Фундаментальные исследования. – 2013, № 6, С. 886-891.
4. Андреев А. С., Перегудова О.А. Об управлении двухзвенным манипулятором с упругими шарнирами. Нелинейная Динамика, 2015, Т. 11, № 2, С. 267-277.
5. Системы управления промышленными роботами и манипуляторами /Под ред. Е.И.Юревича. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 182 с.
6. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
7. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
8. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н. Управление колебаниями. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
9. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 238 с.
10. Черноусько Ф.Л., Колмановский В.Б. Вычислительные и приближенные методы оптимального управления //Итоги науки и техники. Серия Математический анализ. - М., 1977, Т.14, С.101-166.
11. Черноусько Ф.Л. Задача оптимального быстродействия при смешанных ограничениях //Изв. РАН. Теор. и сист. упр. – 1995, № 4, С. 103-113.
12. Болотник Н.Н., Каплунов А.А. Оптимальные прямолинейные перемещения груза при помощи двузвенного манипулятора //Изв. АН СССР. Техн. кибернет. – 1982, № 1, С. 180-170.

13. Болотник Н.Н., Каплунов А.А. Оптимизация управления и конфигураций двузвенного манипулятора //Изв. АН СССР. Техн. кибернет. – 1983, № 4, С. 144-150.
14. Брайсон А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
15. Суханов А.А. Сведение трансцендентных уравнений нелинейной механики к алгебраическому виду. - Л.: ЛЦНТИ, 1983, Информ. листок № 691-83. – 4 с.
16. Суханов А.А. Метод решения нелинейных двухточечных краевых задач. – Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1983, Т. 23, № 1, С. 228-231.
17. Kagiwada H., Kalaba R., Rasakhoo N. and Spingarn K. Numerical experiments using Sukhanov's initial-value method for nonlinear two-point boundary value problems //Computers and Mathematics with Applications, 1984, Vol. 10, Nos. 4/5, pp. 327-330.
18. Суханов А.А. О численном решении краевых задач оптимизации методом движущейся мишени //Алгоритмы и математическое обеспечение для физических задач. – Л.: Изд-во ФТИ им. Иоффе, 1983, С. 143-157.

A.A.Sukhanov

DUALITY METHOD IN OPTIMIZATION PROBLEMS OF DYNAMIC SYSTEMS

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper deals with the dual method for solving the optimal control problem for the two-link arm, is to replace the original problem with an uncertain time control challenge with a fixed time control.

Keywords: optimal problem, the manipulator, the method of duality, the Euler-Lagrange equation.

REFERENCES

[1] Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Control systems robotic manipulator. Moscow. Nauka, 1978. 416 p. (rus.)
[2] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. Fundamentals of control robotic manipulator. Moscow. Publishing House of the MSTU of Bauman, 2004. 480 p. (rus.)
[3] Lutmanov S.V., Kuksenok L.V., Popova E.S. Management objectives articulated manipulator with rotational kinematic pairs. Basic Research. 2013, № 6, pp. 886-891. (rus.)

[4] Andreev A.S., Peregudova O.A. On a two-tier management arm with elastic joints. Nonlinear Dynamics, 2015, V. 11, N 2, pp. 267-277. (rus.)
[5] Control systems for industrial robots and manipulators. Ed. E.I.Yurevicha. Leningrad. Publishing House of Leningrad. University Press, 1980. 182 p. (rus.)
[6] Chernousko F.L., Ananevskij I.M., Reshmin S.A. Methods of control of nonlinear mechanical systems. Moscow. FIZMATLIT, 2006. - 328 p. (rus.)
[7] Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. Manipulation Robots: dynamics, management, optimization. Moscow. Nauka, 1989 368 p. (rus.)
[8] Chernousko F.L., Akulenko L.D., Sokolov B.N. Variations in management. Moscow. Nauka, 1980. 384 p. (rus.)
[9] Chernousko F.L., Banichuk N.V. Variational problems of mechanics and control. Numerical methods. Moscow. Nauka, 1973 238 p. (rus.)
[10] Chernousko F.L., Kolmanovskii V.B. Numerical and approximate methods of optimal control. Results of science and technology. A series of mathematical analysis. Moscow. 1977, V.14, pp. 101-166. (rus.)
[11] Chernousko F.L. Optimal control problem with mixed constraints //Math. Russian Academy of Sciences. Theor. and syst. cont. 1995, N 4, pp. 103-113. (rus.)
[12] Bolotnik N.N., Kaplunov A.A. Optimal rectilinear movement of cargo by means of a two-link manipulator. Math. USSR Academy of Sciences. Tech. cybernetics. 1982, N 1, pp. 180-170. (rus.)
[13] Bolotnik N.N., Kaplunov A.A. Optimizing the management and configuration of two-link manipulator. Math. USSR Academy of Sciences. Tech. cybernetics. 1983, N 4, pp 144-150. (rus.)
[14] Bryson A., Ho Yu-Shee. Applied theory of optimal control. Moscow. Mir, 1972. 544 p. (rus.)
[15] Sukhanov A.A. Reduction of transcendental equations nonlinear mechanics to the algebraic mean. Leningrad, LTSNTI, 1983, Inform. leaf N 691-83. 4 p. (rus.)
[16] Sukhanov A.A. A method for solving nonlinear two-point boundary value problems. - Journal Mat. and Math. Phys., 1983, V. 23, N 1, pp. 228-231. (rus.)
[17] Kagiwada H., Kalaba R., Rasakhoo N. and Spingarn K. Numerical experiments using Sukhanov's initial-value method for nonlinear two-point boundary value problems //Computers and Mathematics with Applications, 1984, Vol. 10, Nos. 4/5, pp. 327-330.
[18] Sukhanov A.A. On the numerical solution of boundary value problems of optimization by moving target //Algorithms and software for physical problems. Leningrad. Publishing house of the Ioffe Institute, 1983, pp. 143-157. (rus.)

ТРАНСПОРТНЫЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

UDK 62-112-9; DOI 10.1872/MMF-2016-70

A.Nikolov[1], N.Kazakov[2], S.Elkina[3]

COMPETITIVENESS OF INDUSTRIAL PRODUCTS

[1]Alexi Nikolov,
Technical University
Bulgaria, Sofia
Тел.: +(359)02965-2892, E-mail: alexi.nicolov@gmail.com.

[2]Nikolai Kazakov, d-r., ass. professor
Technical University
Bulgaria, Sofia
Тел+(359)02965-2892, E-mail: nkazakov@tu-sofia.bg

[3]Stoina Elkina
Technical University
Bulgaria, Sofia
Тел.: +(359)02965-2892, E-mail: tony.elkina@gmail.com

Abstract

This paper examined the technical competitiveness of industrial products, according to the strategies of market penetration and life cycle of the machines. As a specific example to illustrate forklifts, represented as a set of parameters analyzed and evaluated. The competitive advantages of the industrial products (machine) are determined by using the structural principle, the theory of forecasting, Fuzzy logic and Velev's theory. The approach to the construction of multidimensional architecture of logistics machinery and minimum total cost is based on accepted classification of logistics equipment. Designers can use the results and recommendations for their future products.

*Key words***:** industrial products, logistics, life cycle, competitiveness, strategies, logistics machines, characteristics

1 Competitiveness. General characteristics

In modern conditions of developed market environment there is a strong competition between manufacturing companies and has a big fight for market share. In industrial products, in particular, logistics machines where individual customer requirements are of particular importance and its satisfaction largely depends on how they are implemented. Worldwide competition is huge, as

production companies producing for domestic market are not so many. All manufacturers are trying for bigger worldwide market share. That's why most of them have offices and dealers in other countries.

The topic of company competitiveness is usually associated with its economic efficiency, i.e. achieving greater levels of profit. This is achieved by several tools and under the influence of several factors. There are different definitions of „competitiveness". A detailed research on the development of definitions over time according to different market conditions is done in [See 13]. As a conclusion in [13] it's said, the company competitiveness is the ability through continuous update and improvement, to create and resistant supports a competitive advantages, leading to higher economic performance in long term.

According to its definition, the following statements are made:

1.Company's competitiveness is related to the development and maintenance of competitive advantages.

2.Company's competitiveness is a relative magnitude.

3.Company's competitiveness includes adaptability to changing conditions and market environment.

4.Company's competitiveness includes the ability of Lifelong Learning, updating and improving.

5.Company's competitiveness includes durability (resistance) of the results.

6.Company's competitiveness is a dynamical value.

Whether you talk about company competitiveness, product or even country, these rules are valid and are used in practice. In this paper is looking for a correlation between these statements as crucial for businesses and their validity when considering industry products.

When we talk about for product competitiveness, is not correct to take in mind only economics results after of its sale. Thus results are achieved in short term thanks to a specific manufacturer marketing policy, temporary market conditions and etc. [13]. In other words, to be one product competitive, its results must be long term. When we are talking about technology product or machine, this can be achieved by increasing its performance, viewed as a combination of many factors.

This paper provides the technical competitiveness of industrial products. For an example, you can see logistics machines - fork lift trucks with there set of analyzed and evaluated parameters.

In the selection of industrial products (logistics equipment), the focus is primarily on technical characteristics, price, service and etc. For underdeveloped markets most important in the choice of equipment is the price. Usually, the initial investment is smaller than the expense of the machine's quality. For this reason, the manufacturers' fight is for the technical parameters, looking for its optimization at

better price. It is very important to know insight the markets trends, competitive products and their development plans. This knowledge helps to produce high level machines with better technical data.

Knowing in depth the market and technical developments, it is possible to forecast with high accuracy the market demand of machines and machines technical data. The dynamics of science and technology, new technologies and predispose dynamic opportunities for design. Better quality results could be achieved using new technologies, materials, innovations and etc.

The machines' quality is a relative and subjective value. Each customer has his own requirements and this defines the quality. Master characteristics and parameters could be defined. The competitiveness of the machines can be shown by comparing their values. Using this results we can monitoring the market trends, project planning and etc.

High level of product technical competitiveness, is guaranteed with creating new advantages. This requires continuously seeking of maintenance and improving products parameters. That's why production companies have to invest in technologies, evaluation and forecast methodologies for market trends in developing competitive products with better parameters. This will help to be established guidelines for the design of future products.

Since the company competitiveness includes the ability to continually "learn", update and improve [9], this creates a requirement for adaptability of the product. In assessing the product technical competitiveness, one should be looking for opportunities for training and setting the valuation model as the markets are dynamic and their development is continuous. Therefore, a good model adaptation option would give better results in post-product development.

2.Strategies for entering the market and lifecycle of the product

2.1.Strategy of market penetration of logistic product

Time introduction of industrial products (logistics machine - forklift or crane) on the market also affects on the manufacturer's strategy in terms of improving its competitiveness, either by designing new generations or entirely new series of products.

A number of authors [3,4], resolved the problem for optimal placing of the new generation market. The models examined in these studies, however, are based on analysis and forecasting of sales. These models are directly related to the profits of manufacturers. This paper seeks expression of the relationship between the time of release of the product and its and competitors and technical competitiveness.

In [2] are described possible strategies according to the time of entry, which are useful in the logistic facilities: Early introduction, Strategy of following, Late introduction.

2.2.Lifecycle of logistics equipment

As known from the literature [7], in economic terms, the product life cycle can be divided into four main stages of its release for sale - implementation, development, maturity, decline . Development of new products must be settled into the company strategy. This must in the development stage at the time of maturity of the old product and, accordingly to reach maturity before it began intensive decline of the old product.

From the standpoint of developing usability, the product life cycle can be divided into the following stages [1,6]: Collection of raw materials, Design and production, Use / Re-use / maintenance, Recycling / Waste Management.

According this classification, the first and second stage are the periods before placing the product on the market. This is the creation of the product. This is known in the literature as Standard mode technology (IFG)[8] and define the stages of development of a new product before its imposition. The customer can compare and choose between different technical data and parameters.

T_0, is the time we need to take decision for product production.

T_1, - it the time realizing the product

So the product inventing process take time

$$t_{creaton} = T_1 - T_0 \quad (1)$$

For this period of time, the readiness of the product R reaches from $R_0 = 0$ to $R_1 = 1$ The new product can be labeled conditionally version (or generation) 1. Similarly conditionally it can be assumed that the readiness of the product at the time of placed on the market complies with its technical competitiveness Ψ as:

$$\Psi_j^i = \mathbf{f}(X_1, X_2, \dots X_n) \quad (2)$$

Where:

X_n are separate technical characteristics of the logistics machine

The upper index i shows the serial number of the generation of the machine

The lower index j shows the serial number of the model of the machine.

Every characteristic is defined by one or more parameters, functionally connected to it:

$$X_k = \mathbf{f}(P_1, P_2, \dots, P_m) \quad (3)$$

After placing a product of generation 1 on the market a time T it has competitiveness Ψ_1^1 and begins the stage of its development. We then perform forecasting and analysis of market, competition and new technologies, begins

developing an improved version of the product 2 (second generation, with red on the chart). Introduction of new generation product is currently T_T^2, when the device has Competitiveness Ψ_1^2 (Fig. 1)

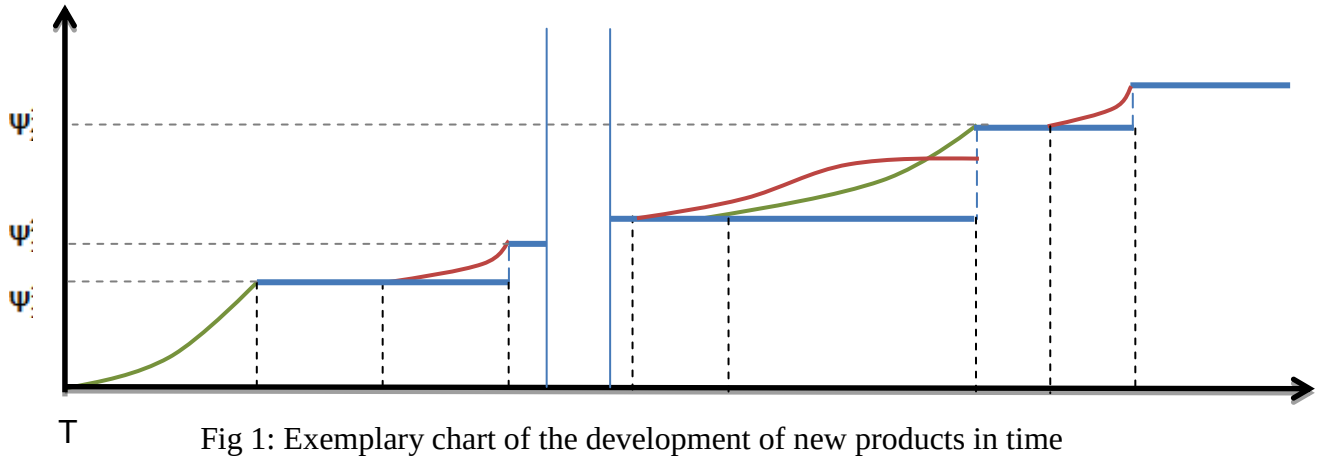


Fig 1: Exemplary chart of the development of new products in time

Researching on and the inventing new product generations is possible to moment T1 'when the forecasts for global competitiveness shows that the technology set in the original model will not be able to reach a level of relative competitiveness of the product at least equal of the current. Then begins the developing of a new model (green graph).

3. Development of the products

In the literature there are many studies on whether at a time to be developing a new generation based on the original product or a completely new [6,10]. Simple answer to this question cannot be given without prior specific analysis and research of existing products and market opportunities. According to Samuel Johnson and Conrad Jones[5] classification, there are nine different versions of the relationship between market and technology:

	No technological change	**Improved technology**	**New technology**
No market change	No activity	Reformulation	Replacement
Strengthened market	Remerchandising	Improved product	Product line extension
Ne market	New use	Market extension	Diversification

According to the elaborated classification, improved logistics product (new generation) appeared on the market when an improved technology is available and

increased market also. A new product (new series) appeares on the market with new implemented technology in the absence of changes in the market.

Product technical competitiveness relative to current overall competitiveness, we call relative competitiveness and note with Ψ‘

$$\Psi' \in [0,1] \quad (4)$$

Due to changed overall competitiveness over time, the manufacturer must set similar competitiveness of his product, in order to maintain a constant or higher relative competitiveness (Fig.2).

In strategy "first on the market" the manufacturing company is seeking to dictate the pace of technological development and the relative technical competitiveness of this product will be equal to 1 at any point in time T.

In the strategy of pursuit, the manufacturing company will strike to maintain relative competitiveness of its product between 0.7 and 1, ie

$$\Psi' = [0,7; 1) \quad (5)$$

Its aim will be reduced to minimum intervals in which $\Psi' < 0,7$. Since it is invariably associated with greater costs, failing these intervals can be shortened sufficient company passes strategy in "late entry".

In each case it is necessary a good understanding and analysis of markets, together with projected calculations to predict trends in technology. In strategy "first to market" companies rely heavily on their own developed and implemented innovations. This is connected in turn with large costs. In the second case, companies rely both on innovation and know-how developed by other companies. In strategy "late entry" The company focuses on primarily on know-how from other manufacturers.

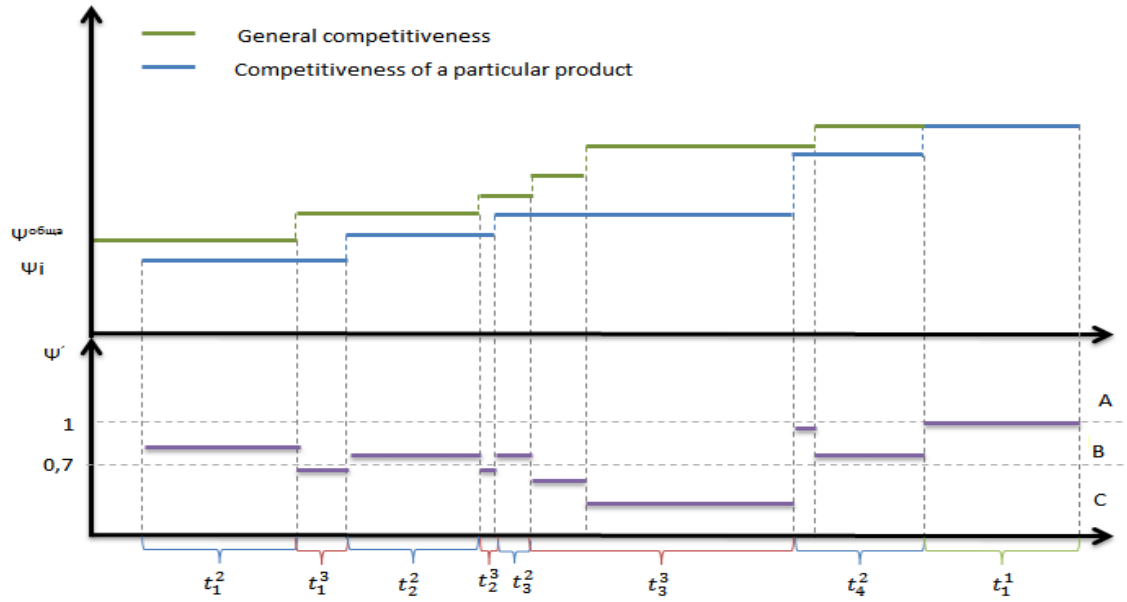
Let at a time T_1 , a particular company launches on the market a machine with technical competitiveness Ψ_1^1 . At this moment, the total technical competitiveness is:

$$\Psi^{min} \leq \Psi_1^1 \leq \Psi^{max} \quad (6)$$

Therefore according to (4), the relative product competitiveness will be Ψ_1^1. At time moment $T_{1'}$ resulting of composed forecasts and market research, the company starts developing a next generation product. The technical competitiveness of its will be:

$$\Psi_i^j = \alpha_1 . \Psi_1^1 \quad (7)$$

The rate of technical innovation α expresses the level of the product improvement. In equation (7) the resulting competitiveness express indexes I and j, because when the rate α is not available, it is not clear whether is a new generation product or completely new product.



Фиг 2: Exemplary distribution of the relative technical competitiveness in time

Since the evolution (improvement) of the product can be done in many different ways, depending on the wanted targets, the rate α is a function of many parameters, or:

$$\alpha = f(p_1, p_2, p_3, \ldots, p_i, \ldots, p_n) \tag{8}$$

Similar developments have been made in [11] where the authors present a functional link between the qualitative modification of certain parameters influencing the product characteristic and other parameters that govern the same characteristic. In [12] on the basis of statistical data, the authors examined the relationship between innovation in products and processes in these different stages of their life cycle.

On the other hand, each parameter p_i is assigned a weight of it's ratio to it's own technical competitiveness of the product w_i. Unlike the model in [7] where the weights are determined on the basis of linguistic values by the method of Taguchi, here the weights are set at the discretion of the investigator and model the condition is:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \tag{9}$$

Where n is the number of parameters included in the study.

Therefore, according to (8) and (9) for the coefficient α we have:

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \frac{p_i'}{p_i} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \alpha_i^p \quad (10)$$

Where p'$_I$ is the improved value of the parameter p_i, and α_i^p is the coefficient of improvement of the i-th parameter.

Assuming that, at the moment of time T_1 the forecast total competitiveness for moment T_2, when the launch of the new product on the market is expected, is $\hat{\Psi}_2^{total}$, therefore for α such a value must be chosen that the value of the own competitiveness of the product Ψ_i^j for the moment of time T_2 to be close enough to the value of $\hat{\Psi}_2^{total}$ so it should accord with the company's strategy on the market. This determines whether to achieve the required value of their competitiveness is enough to start a new generation of the product (with small improvements) or it is necessary to launch a completely new and innovative product.

In relation to this, based on the size of the innovation rate α, there are the following types of improvements regarding the technical competitiveness:

$0 < \alpha \leq 0{,}1$	$0{,}1 < \alpha \leq 0{,}3$	$0{,}3 < \alpha \leq 0{,}5$	$0{,}5 < \alpha \leq 1$
Technical facelift	Technical jump	New generation	New model

4 Classification of industrial products

4.1 Basic principles

As it can be seen from Fig. 4, a device over time can have different values of relative competitiveness and during different periods fall in a different interval. This phenomenon can be used to determine the level of the device with respect to its own technical compatibility and appropriate classification. The classification proposed in this work is based on the time that the article "spent" in the different competitive areas:

-Zone A with relative technical competitiveness Ψ' = 1

-Zone B with relative technical competitiveness $1 > \Psi' \geq 0{,}7$

-Zone C with relative technical competitiveness $\Psi' < 0{,}7$

The product relative time in a certain area gives information about what the overall manufacturer strategy of that product.

The product categorization is in two stages. The first stage calculate the relative times during which the product "spent" in the zone. According this, there are three zone levels: dominant, secondary and tertiary. The dominant zone is the area where the product has spent most of the time. Secondary zone is the second time in length, respectively third-rate zone is the one with the smallest share of time. The relative times are calculated, as follow:

$$t^j = \frac{100\%}{t^{total}} \sum_{i=1}^{n} t_i^j \text{ , \%}, j = 1 \div 3 \quad (11)$$

Where

t^{total} is the time from the placing of the product on the market to date

t_i^j is the i-th period of time in which the product is in zone j

The second stage consists in the arrangement of the times in descending order to identify differences between time:

$$\Delta_{1,2}^t = t^1 - t^2 \text{ , \%} \quad (12)$$

$$\Delta_{2,3}^t = t^2 - t^3 \text{ , \%} \quad (13)$$

After the calculating the relative times, are possible the following cases (Fig.3):

-Category 0: Strong dominant zone ($t^1 \geq 80\%$).

Classes notation: Category number + capital letter for the dominant zone. Examples: 0A, 0B, 0C

Category I: strong dominant zone ($t^1 > 50\%$ и $\Delta_{1,2}^t \geq 10\%$) and strong secondary zone ($\Delta_{2,3}^t \geq 20\%$).

Classes notation: Category number + Capital letter for the dominant zone, small letter for the secondary zone. Examples: IAc, IBa, ICb

-Category II: Strong dominant zone ($t^1 > 50\%$и $\Delta_{1,2}^t \geq 10\%$) and relatively equal secondary and tertiary zones ($\Delta_{2,3}^t \geq 20\%$)

Notation of classes: Category number + Capital letter for the dominant zone. Examples: IIA, IIB, IIC

- Category III: Relatively equal dominant and secondary zones ($\Delta_{1,2}^t \leq 10\%$, $\Delta_{2,3}^t \geq 20\%$).

Classes notation: Category number + Capital letters for the dominant and secondary zones.Examples: IIIAB, IIIBC, IIICA.

-Category IV: Without a dominant zone, relatively equal times ($\Delta_{1,2}^t \leq 10\%$; $\Delta_{2,3}^t < 20\%$)

Classes notation: Category number + The zones in descending order.Examples: IVabc; IVacb, IVbac, IVbca, IVcab, IVcba.

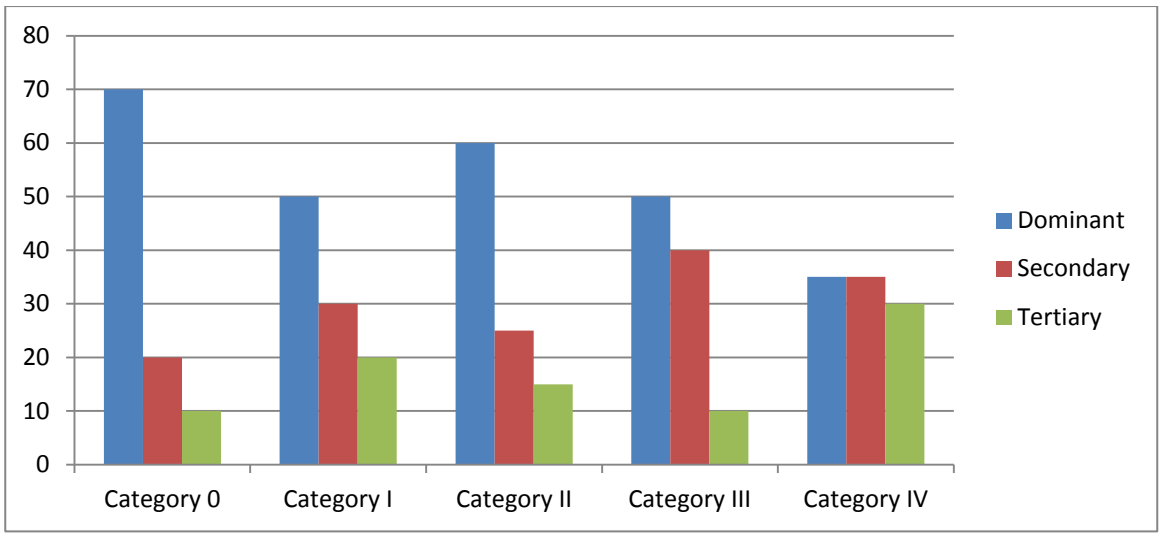


Fig. 3: Classes of distribution of the competitiveness

4.2. Characteristics of the different classes

Category 0

The strong dominant zone of machines from this class shows clearly structured strategy by the manufacturing company regarding the development of this particular product. Deviations (entering in another zone) are rare and are small enough that they can be ignored. So the strategy should be taken in the long term

Case 1 – Class 0A: This corresponds to the strategy of the company - a leader in the technical competitiveness. This company is the innovation founder in the sector, as this strategy carries on the particular product.

Case 2 –Class 0B: The company products from the type "second on the market". Without the ambition to be a leader on the market, this company tries to follow the leader closely in the innovative improvements waiting for the right moment, eventually to anticipate.

Case 3 – Class 0C: Company's strategy type "late entry". Trying not to invest too much in innovation, this company is lagging behind in relation to competitors, in terms of the expense of maintaining lower prices. It's typical for the developed markets.

Category I:

The clear dominant zone shows a strong desire to pursue a strategy undertaken, not always successful. The introduction of the product in a class is usually short-term phenomenon and transition to another class or return to the previous one, whether in a positive or negative direction.

Case 1 – Class IAb: product having leader image, and from time to time gives away. For example, conducting long-term researches to help the return of leadership in the long term.

Case 2 - Class IAc: practically impossible case. Due to the abrupt transition from zone A to C. When, longer retention in zone C, the product will be reclassified in category ICa.

Case 3 – Class IBa: Product tightly "stuck" behind the leader who at some point in time, thanks to some innovation was able to come over competitors for a relatively long period of time.

Case 4 – Class IBc: Product rather tends to lag behind the competition, but still manages to maintain the level in relatively good values.

Case 5 – Class IBa: The reverse case of IAc category. Practically impossible to obtain due to the abrupt transition from zone B to A, but rather a consequence of the delay of a product category Iac.

Case 6 – Class ICb: Shows "fighting spirit" and significant attempts to improve the technical competitiveness of the product without investing excessive resources.

Category II

This category can be characterized by greater uncertainty and imprecision in estimates of future models, they are caused more by the competitors actions than their own.

Case 1 – Class IIA: similar case of category IAb but due greater dynamics in the competitors actions, it has been allowed the product technical competitiveness to be for a long time in zone C.

Case 2 – Class IIB: The clearly expressed following position compared with occasional variations in positive and negative direction. Despite featuring strategy, indicates uncertainty in prediction and design of future products.

Case 3 – Class IIC: can be described as category 0C variation, wherein for a short period of time, it has come to jump zone A. This class can not be valid for the given products for a longer period of time.

Category III

Lack of a clear strategy for the product development. It is preferred to maintain a certain competition level around the zone borders with small investments.

Case 1: Class IIIAB: There is no clear strategy for the development of technical competitiveness of the product, though it is maintained at a very high level, but rather at the upper limit of zone B.

Case 2: Class IIIBC: There is no clear strategy for the development of technical competitiveness of the product, though it is maintained in an acceptable

level around the lower boundary of Zone B and the transition to a higher class can be done relatively easily.

Case 3: Class IIICA: Like Class IIB, it is characterized by sudden jumps or falls between zones A and C. This suggests longer retention in the respective zones. Practical is more likely drop from Zone A to Zone B due to a serious collapse of the manufacturer or the progress of competitors.

Category IV

Lack of strategy for the product evolution. The product is in this class, because of chaotic innovative processes and improvement of the technical competitiveness.

5. Description of logistics equipment

A) Characteristics

As each machine and the machines of the class logistics equipment, provide a set of characteristics which, depending on the machine type fall within the limits of the various standards and regulations constructional characteristics and others. Each feature is defined by a parameter or set of parameters, functional and relatively related. This means that the feature itself has or can it be given a numerical value, which in turn can be manipulated according to the needs of production or customers and the company strategy with respect to the product. Separately, the actual characteristics may also be operably connected to one another.

Basic characteristics, regardless of the type of machine can be divided into the following types:

I.Pre-operational characteristics - these are the characteristics directly linked with the production and Pre-Production stages. They determine the capabilities of the machine in the stages before its launch as research, design, production. Some key pre-performance is competitiveness, adaptability to the conditions of production, level of feasibility and other.

II.Technical features - these are the attributes that provide performance of the machine. They are dependent on the technical qualitative and quantitative parameters of the machine. Some key technical features are: performance, reliability, maneuverability, stability, energy consumption, road, etc..

III.Ergonomics - these are the features which are aimed at increasing the productivity of the machine by the human factor - the driver. The main objective is to reduce the discomfort on the driver and thereby possible to achieve a continuous operation of a driver. Some such features are: human exposure (vibration, noise, ambient temperature), environmental impact (emission of harmful emissions), design, extras, etc..

IV. Economic characteristics - these are the characteristics which have a direct relationship on the economic performance of the machine. Since each production is associated with certain costs and wear an appropriate profit, the goal is that the profits will be maximized. We can mention some basic economic characteristics: the level of investment return, material consumption, versatility and more.

Characteristics and values of the parameters are constrained by a number of standards that ensure safety in operation of the machine. In the classification ICS handling equipment is class 53 as fork lifts are classified under code 53 060 - Industrial trucks and cranes are code 53.020.20.

Standards can be either domestic operating only at local level and national, recognized by more countries. Each state has a department that manages standardization standards.

B) Parameters

Each machine has a number of parameters, some of which are leading and others are secondary functionally related. The main parameters are those to which the machine is designed, and they serve as a basis according to which to define the other (secondary) parameters depending on the type of machine design, unit type and others. To be a competitive product, its parameters must satisfy certain consumer requirements and satisfy their needs. In other words, it could say that a product is competitive when he has high quality. Product quality is a feature strictly individual for each user, but as a result of many years of observations and analyzes, can be developed uniform standards under which products meeting certain requirements that may be considered of high quality. Quality of machines is determined by its parameters and so we can determine whether it meets these conditions. We must have certain basic values of these parameters against which to assess their values. Furthermore, because different safety requirements, design constraints, and other parameter values can not exceed (or lower) than certain preset values. That's why they are limited. The presence of upper and lower limit for the value of each parameter given area of penetration of the parameter and can serve as the basis for its evaluation.

Parameters can be divided in the following types:

- Quantitative - have expressed a numeric value and can easily be compared and evaluated.
- Qualitative – they do not have a precisely expressed value and their “value” usually is expressed by linguistic characteristics. Their assessment may be comprised after setting a numerical value of a linguistic feature.
- Relative - express the relationship between two variables and thus provide additional insight on certain qualitative characteristics of the machine.

In assessing the competitiveness of the machine it is necessary to be able to set (determination) of the basic parameters, one or more, based on which the data is filtered, machines sorted and areas that parameter values, fall identified. The mathematical expression of the meaning of each parameter is determined by weights depending on its level of connectivity with other parameters.

6.Conclusions

As can be seen from the displayed principles, the competitiveness is a dynamic and relative variable. It is a value that is constantly changing in view of the market dynamics, the appearance and disappearance of other participants in it, the appearance of long-lasting trends in the technical parameters of products, the emergence of new technologies and innovation.

The competitiveness relativity is expressed on the fact, that its evaluation is done based on relative estimates [12,14] obtained by reference to the actual value of a parameter to a predetermined base.

Based on the above, the following statements can be made:

1.The competitiveness can be evaluated and compared.
2.Competitiveness is a variable, depending on many factors.
3.The factors that decide competitiveness may vary depending on the need and purpose of the research.
4.Competitiveness is a relative variable.
5.Forecasting can be used as a tool for predicting the parameters of the devices.

Combining these statements gives scope for work on enhancing the machine competitiveness on the basis of forecasts made, depending on market needs or user, which is the objective of this work.

Taking in mind the above competition analyzes, it is developed a model to evaluate the competitiveness of logistics equipment, based on user-selected parameters. The machine competitiveness is a function of various factors. The developed model is based on an adapted version of the emotional model that represents a multi-criteria analysis and expression of a functional connectivity between characteristics and parameters.

A model competitiveness calculation of certain brands of forklift trucks is made based on models developed for forecasting and evaluation. Conclusions are the results and recommendations to designers of future products.

REFERENCES

[1] Gupta S., Veerakamolmal P., DISASSEMBLY OF PRODUCTS, NIST Systems Integration for Manufacturing Application Program, 1996,Grant No. 60NANB5D0112, Final report, Boston, USA,

[2] Innovation: European, national and regional policies, “Practical research and communication” Foundation,2008, ISBN 978-954-9456-12-7
[3] Jiang Zh., Jain D., Optimal marketing Entry Timing for Successive Product/Service Generations, INSEAD Faculty & Research Working Paper, 2012,/83/MKT
[4] Jiang Zh., Jain D., A Generalized Norton-Bass Model for Multigeneration Diffussion, INSEAD Faculty & Research Working Paper, 2012,/49/MKT
[5] Johnson S., Jones C., How to Organize for New Products, Harvard Business Review,1957, (May-June 1957), pp.49-62.
[6] Kahn K; G. Castellion, A. Griffin,; The Handbook of New Product Development. 2nd ed. John Wiley & Sons,2004
[7] Makedonska D, Kazakov N., Logistics basics, Translogistics, Sofia,2001
[8] Mankins, John C. "Technology Readiness Levels: A White Paper". NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, 6 April 1995.
[9] Poirier, C, Forecasting, Demand Management, and Capacity Planning, 03 August 2012, Advanced Supply Chain Institute, http://www.ascinstitute.com/products_whitepapers.php
[10] Sanderson S., Uzumeri M., Managing product families: The case of the Sony Walkman, Research Policy,1995, 24, pp. 761-782, ISSN: 0048-7333
[11] Smith S., Smith G., Shen Y., Redesign for product innovation, Design Studies, 2012, 33, pp. 160-184, ISSN: 0142-694X
[12] Utterback J., Abernathy W., A Dynamic Model of Process and Product Innovation, OMEGA, The Int. J1 of Mgmt Sci., 1975,VoI. 3, No. 6, Pergamon Press. Printed in Great Britain.
[13] Velev, M. Assessment and analysis of company competitiveness, Sofia: Softtrade,2004
[14] http://rolkurs.narod.ru/index2.htm. (accessed October 20,2014)

УДК 625.7/8.002 ; DOI 10.1872/MMF-2016-71

А.В. Бойцев[1], А. А. Шестопалов[2]

КОНСТРУКЦИОННАЯ АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НЕЙ.

[1]Бойцев Андрей Владимирович, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия,Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: a.boitcev@gmail.com.

[2] Шестопалов Александр Андреевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия,Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: shestop-37@yandex.ru.

Аннотация

В данной работе рассмотрены возможности исследования конструкционной анизотропии дорожных одежд. Предложена новая методика подбора асфальтобетонной смеси с помощью оценки структурной анизотропии путем получения кривых деформирования в продольном и поперечном направлениях и дальнейшей оценки их сходимости.

Ключевые слова: конструкционная анизотропия, уплотнение, колееобразование.

Введение

В последние годы в РФ наблюдается рост транспортных потоков, увеличение скоростей движения и грузоподъемности автомобилей. Это вызывает интенсификацию нагрузок на дорожное покрытие, приводит к снижению срока их службы. В процессе эксплуатации покрытия, на нем образуются дефекты различного вида: трещины, волны, колея и т.п. В связи с этим, верхний слой дорожного покрытия устраивают из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА), способного противостоять большим нагрузкам от транспортных средств. Необходимые эксплуатационные свойства такого асфальтобетона обеспечиваются в результате подбора соответствующего зернового состава, использования модифицированного вяжущего и уплотнения щебеночно-мастичных

смесей (ЩМАС)[1,2]. Структура материала такого покрытия, представляет собой жесткий пространственный каркас, образованный зернами заполнителя, склеенного пленками битумного вяжущего материала.

Повышенное содержание щебня в этих смесях предусматривает формирование структуры асфальтобетонного покрытия, обладающего высокой устойчивостью к пластическому течению, образованию колеи.

Необходимые эксплуатационные свойства дорожного асфальтобетонного покрытия из таких смесей обеспечиваются в результате последовательного выполнения двух технологических этапов. Первый - это подбор соответствующего состава и приготовление асфальтобетонной смеси, а второй – технологиями её транспортирования, укладки в покрытие и уплотнения. К каждому из этих этапов предъявляются определенные требования, соблюдение которых обусловливает получение требуемой структуры материала дорожного покрытия. При этом важно иметь простые доступные методы контроля качественного последовательного выполнения этих технологических операций.

Одно из основных требований к структуре материала дорожного покрытия это получение изотропии его физико-механических свойств. Дорожное покрытие, должно одинаково сопротивляться воздействию внешних нагрузок от транспортных средств, как в продольном, так и поперечном направлениях. К сожалению, существующие технологии, включающие этапы подбора состава смеси, её уплотнение, не могут гарантировать получения требуемой структуры. Это связано, с одной стороны, традициями существующих технологий, а с другой - отсутствием методов и средств оперативного контроля за этими процессами. В технологии устройства дорожного асфальтобетонного покрытия, включающей этапы подбора состава смеси и дальнейшее её уплотнение, сопутствуют два фактора формирования его структуры: конструкционная и технологическая анизотропия свойств.

Цель работы -рассмотреть некоторые методы контроля процесса образования анизотропии свойств дорожного покрытия на этапе подбора и приготовления асфальтобетонных смесей. Условно названная нами «конструкционная анизотропия». «Технологическая» анизотропия свойств дорожного покрытия, связанная с завершающим этапом – процессом уплотнения смеси рассмотрена в работе[3].

Конструкционная анизотропия "закладывается" в материал при его создании и обусловлена совокупным распределением частиц щебня, их ориентацией, формой и угловатостью, характером чередования слоев и так далее. В технической литературе отмечено, что поведение несвязанных гранулированных материалов (таких как ЩМА) характеризует существенная анизотропия из-за упорядоченного распределения частиц [6],[8],[9],[3]. Анизотропную зависимость можно объяснить несколькими

аспектами деформационных особенностей геоматериалов, чего не могут сделать обычные теории пластичности. Последние не рассматривают внутреннюю структуру анизотропных материалов. Ода и Накаяма [6] обобщили три источника анизотропии в гранулированных материалах: анизотропное распределение контактных нормалей, что связано с взаимодействием частиц; упорядоченная ориентация пустот в пространстве; упорядоченная ориентации несферических частиц. Авторы отмечают, что первые два источника могут существенно оказывать влияние во время начальных стадиях деформации, в то время как последний источник доминирует на более поздних стадиях деформаций.

1.) **Микроструктурный подход** (цифровой анализ изображений структуры)

Состояние микроструктуры ЩМА может быть оценено с помощью техники анализа изображений (IAT – Image Analyses Technique). Этот метод представляет собой процесс преобразования изображения в цифровую форму и применения различных математических процедур для извлечения необходимой информации из образцов. Подобная методика изучения структуры асфальтобетона была разработана ВНИИГРИ и использовалась Иванченко С.Н. , Шестопаловым А.А. для изучения структуры асфальтобетона на образцах, взятых из дорожного покрытия. При этом исходный слой асфальтобетонной смеси уплотнялся различными способами: статическим катком, вибрационным, а также с одновременным воздействием на уплотняемый слой поверхностного вакуумирования. Изготовленные из этих образцов шлифы изучались под микроскопом, с целью количественного учета степени проникновения компонент битума в разломы и трещины зерен минерального материала, их взаимное расположение, структура пор.

При этом, отмечалась направленная ориентация зерен заполнителя, имевших продолговатую форму. Особенно выразительно эта ориентация наблюдалась при вибрационном уплотнении с одновременным вакуумированием. При этом продольная ось зерен продолговатой формы располагалась параллельно плоскости дорожного покрытия[8],[9].

Позже был разработан автоматизированный компьютерный метод анализа для внутренней структуры ЩМА, а так же были успешно внедрены процедуры для оценки изучения влияния уплотнения на анизотропию свойств в лабораторных условиях.

Ташман и другие [5] разработали IAT для количественной оценки микроструктуры ЩМА на основе объединения ориентаций, совокупных распределений, агрегатных контактов и распределения воздушных пор. В этом исследовании, распределение направленности микроструктуры сформулировано на основе распределения ориентаций частиц. Этот выбор

обусловлен рядом факторов. Во-первых, ориентация частиц сопротивляется переориентации под нагрузкой. Во-вторых, предыдущие экспериментальные исследования пространственно ориентированных фракций асфальтобетона показали, что более практично измерять ориентации частиц, чем зоны контактов частиц. В-третьих, преимущественная ориентация частиц напрямую связана с отклонением частицы от сферической формы поверхности. Такая связь дает возможность прогнозировать степень анизотропии на основе измерений формы частиц без необходимости проводить измерения микроструктуры.

Ташман и др. измеряет совокупное направленное распределение в ЩМА, где ориентация агрегатной частицы определяется углом между ее основной осью и горизонтальной линией на отсканированном изображении. Большая длина оси определяет наибольшее расстояние между двумя краевыми точками граничного контура. Доказано, что совокупная ориентация в ЩМА обладает присущей поперечной анизотропией по отношению к горизонтали[4]. Главные оси частиц, как правило, ориентированы в горизонтальном направлении, и, следовательно, горизонтальная плоскость представляет собой основное направление, а перпендикулярная ей поперечная плоскость представляет собой второстепенное направление. На рис.1 представлена схема оценки направленной ориентации зерен на поверхности среза образца ЩМА.

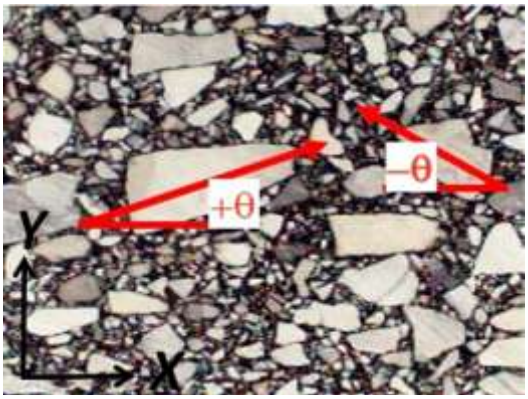


Рис. 1. Принципиальная схема оценки анизотропии в структуре образца ЩМА.

Направленное распределение частиц может быть количественно оценено на изображениях структуры в сечениях образцов ЩМА с использованием вектора направленности Δ:

$$\Delta = \frac{100}{n}\sqrt{(\sum \cos 2\theta_k)^2 + (\sum \sin 2\theta_k)^2} \quad (1)$$

где θ_k является углом ориентации главной оси отдельного агрегата относительно горизонтали. Его значения на изображении составляют от -90º до + 90º, измеренные от горизонтального направления (положительный

знак указывает на то, что угол отсчитывается против часовой стрелки от горизонтального направления, как показано на рисунке 1). В формуле (1)n - представляет общее количество частиц на площади исследуемого сечения. Теоретически, величина Δ колеблется в пределах от 0 и 1, а практически она изменяется от 0 до 0,5 для ЩМА. Значение 0 указывает на то, что агрегаты полностью распределены случайным образом, что отражает изотропное распределение, а значение 1 указывает на то, что агрегаты все ориентированы в одном направлении.

Авторы предлагают ЩМА в расчетах использовать модифицированный тензор напряжений σ_{ij}, который учитывает анизотропию материала, который бы сочетал в себе тензор напряжений и тензор распределения микроструктуры. Модифицированный тензор напряжений может включать в себя тензоры микроструктуры более высокого порядка.

2.) Лабораторные испытания

Рассмотрим элемент однородного трансверсально-изотропного по прочности образца из ЩМА, образованный площадками действия главных напряжений $\boldsymbol{\sigma_1}$ и $\boldsymbol{\sigma_3}$ (рис. 2). Определяем функцию текучести (предельного равновесия, прочности) как функцию напряжений $\boldsymbol{\sigma_{ij}}$ и положения потенциальной площадки сдвига $\boldsymbol{\mu}$ относительно площадки действия наибольшего главного напряжения $\boldsymbol{\sigma_1}$ в виде

$$\boldsymbol{f(\sigma_{ij}, \mu) = |\tau_\mu| - (\sigma_\mu tg\varphi + c_\mu)} \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{\tau_\mu}$ и $\boldsymbol{\sigma_\mu}$— соответственно касательное и нормальное напряжения на площадке $\boldsymbol{\mu}$,; $\boldsymbol{tg\varphi}$ и $\boldsymbol{c_\mu}$— характеристики сдвиговой прочности на той же площадке, являющиеся функциями угла $\boldsymbol{\mu}$, вид которых устанавливается из опыта.

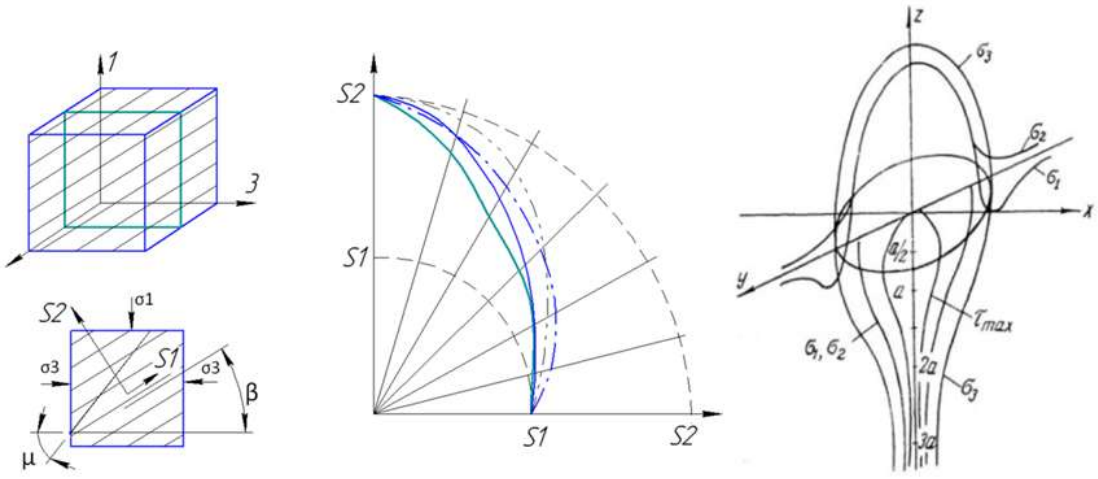


Рис. 2. Элемент трансверсально-изотропной структуры ЩМА с плоскостью изотропии, параллельной $\boldsymbol{\sigma_2}$[7].

При достижении касательным напряжением $\boldsymbol{\tau_\mu}$ значения сопротивления сдвигу, элемент переходит в предельное напряженное состояние. При этом, как и в изотропном варианте, на площадке предельного равновесия функция текучести достигает своего экстремального (наибольшего) значения, равного нулю. На остальных площадках $\boldsymbol{f < 0}$. Таким образом, удовлетворяя одновременно условиям $\boldsymbol{f = 0}$ и $\boldsymbol{\frac{df}{d\mu} = 0}$, можем определить угол наклона площадки сдвига. Для этого воспользуемся известными соотношениями между главными напряжениями $\boldsymbol{\sigma_1,\ \sigma_3}$ и напряжениями на наклонной площадке $\boldsymbol{\sigma_\mu, \tau_\mu}$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma_\mu = \sigma_1 \cos^2 \mu + \sigma_3 \sin^2 \mu} \\ \boldsymbol{\tau_\mu = (\sigma_1 - \sigma_3)\cos\ \mu \sin\ \mu} \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Для нахождения угла наклона $\boldsymbol{\mu}$, площадки предельного равновесия и величины разрушающего напряжения$\boldsymbol{\sigma_1}$ в элементе анизотропного по прочности необходимо знать закон распределения прочности $\boldsymbol{S(\mu)}$. Зависимость сдвиговой прочности от положения площадки сдвига при произвольном угле наклона $\boldsymbol{\beta}$ плоскости изотропии к горизонту (см. рис. 2) была принята в виде

$$\boldsymbol{S_\mu = S_1 + (S_2 - S_1)\sin^2(\mu - \beta)} \quad (4)$$

где $\mathbf{S_1}$ и $\mathbf{S_2}$— предельные сопротивления сдвигу соответственно вдоль и поперек плоскости изотропии (слоистости).

Можно указать ряд функций $\boldsymbol{S_\mu(\mu, \beta)}$графики которых достаточно хорошо укладываются на опытные точки. Используя условие Кулона-Мора $\boldsymbol{|\tau_\mu| - (\sigma_\mu \mathrm{tg}\varphi + c_\mu) = 0}$, можно показать, что из закона изменения предельного сопротивления следуют аналогичные по форме законы изменения прочностных характеристик $\mathbf{tg\varphi}$ и $\mathbf{c_\mu}$

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{tg\varphi\ = tg\varphi_1 + (tg\varphi_2 - tg\varphi_1)\sin^2(\mu - \beta)} \\ \mathbf{c_\mu = c_1 + (c_2 - c_1)\sin^2(\mu - \beta)} \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Поскольку значения характеристик прочности вдоль и поперек слоистости экстремальны, поэтому для оценки степени анизотропии можно использовать отношения:

$$\mathbf{n_c = tg\varphi_2 / tg\varphi_1} \text{ и } \mathbf{n_c = c_2 / c_1} \quad (6)$$

Графики зависимостей (4) и (5) в полярных координатах $\boldsymbol{S_\mu(\mathrm{tg}\varphi, c_\mu), (\mu - \beta)}$представляют собой кривые, близкие по своему очертанию к эллипсам (см. рис. .2). Не случайно в литературе эти зависимости часто называют эллипсами прочности, трения и сцепления. Эллипс прочности (трения, сцепления) ориентирован в материале дорожного покрытия так, что его оси совпадают с направлениями вдоль и поперек плоскости изотропии, а значения полуосей равны $\boldsymbol{S_1, S_2(\mathrm{tg}\varphi_1, \mathrm{tg}\varphi_2, c_1, c_2)}$.

Недостатком данного метода является необходимость проведения большого количества испытаний по определению $\mathbf{tg\varphi_1}, \mathbf{tg\varphi_2}, \boldsymbol{c_1}, \boldsymbol{c_2}$.

3.) Испытания при подборе смеси с помощью колеемеров

Испытания образцов асфальтобетона (максимально приближенных по структуре и плотности к материалу, получаемому в условиях реального уплотнения катками на дороге) проводят на тестовой установке «колесо», например, гамбургское устройство образования колеи (HWTD) (рисунок 3).При этом выполняется 1200 проходов колеса при температуре образцов 25°, 40° и 50° С. Для поддержания температуры испытания используется воздушная камера. В установке испытываются плиты длиной 320 мм, шириной 320 мм и толщиной 40мм. Толщина плиты должна превышать максимальный номинальный размер зерен минерального материала в три раза. Плиты закрепляют в стальных контейнерах многократного использования. Контейнер с образцом переносят в устройство HWTD. Колеса имеют диаметр 203,5 (D) мм и ширину 47,0 (B) мм. Нагрузка равна 685 Н и среднее напряжение при контакте 0,73 МПа. Это подразумевает площадь контакта 970 мм^2, создаваемую при ширине колеса в 47,0 мм и средней длине контакта 20,6 мм по направлению движения. Однако, площадь контакта увеличивается с глубиной колеи, и, таким образом, напряжение контакта является переменным. Заложенное изготовителем напряжение контакта 0,73 МПа приближено к напряжению, производимому одной шиной двухосного грузовика. Средняя скорость каждого колеса приблизительно 1,1 км/час [10, 11,12]. На образец воздействуют путем многократного проезда колеса определенного размера и формы с постоянной вертикальной нагрузкой. Таким образом, имитируется процесс образования колеи в реальных условиях эксплуатации на дороге. При этом фиксируется процесс развития деформации в зависимости от числа циклов проездов колеса.

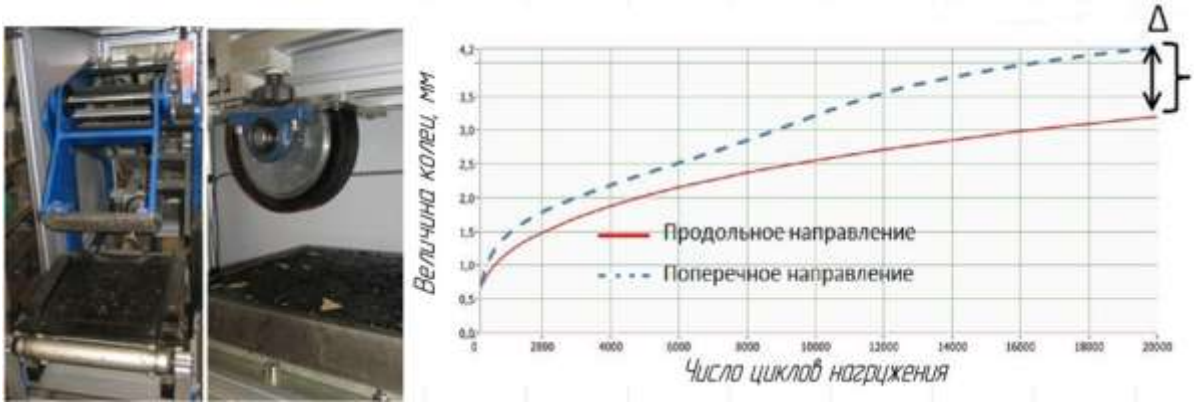


Рис. 3. Деформирование образцов на колесной тестовой установке[4].

Структурную анизотропию можно определить с помощью изменения методики испытаний асфальтобетонов на таких установках. Необходимо

дополнительно испытывать образцы в поперечном направлении относительно направления уплотнения и исследовать сходимость кривых деформирования. Данная методика позволяет оценить деформативные свойства асфальтобетона и позволит снизить величину колееобразования на дороге. Например, если при испытании колееобразования в поперечном направлении размер возникающей колеи после 12000 циклов в продольном направлении 6,61 мм а в поперечном 6,72 мм для одного состава смеси, а для другого состава 6,3 мм и 8 мм соответственно, то необходимо использовать первую смесь. При выборе асфальтобетонных смесей, необходимо выбрать ту, у которой разница в величине колеи между продольным и поперечным направлениях минимальная.

Исследование подтверждает, что продолговатая структура ЩМА склонна к анизотропии и для ее снижения необходимо стремиться к применению щебня кубовидной формы. Это позволит продлить срок службы асфальтобетонного покрытия и, снизив аварийность, повысить потребительские качества автомобильных дорог.

Основные выводы

1. Рассмотрены возможные методики измерения величины структурной анизотропии асфальтобетонов при подборе их состава.
2. Предложена зависимость сдвиговой прочности однородного трансверсально-изотропного образца из ЩМА от положения площадки сдвига при произвольном угле наклона плоскости изотропии к горизонту.
3. Предложена новая методика подбора асфальтобетонной смеси с помощью оценки структурной анизотропии путем получения кривых деформирования в продольном и поперечном направлениях и дальнейшей оценки их сходимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 31015-2002 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные технические условия» [Электронный ресурс]. – Информационно-правовая система ГАРАНТ.
2. ГОСТ 9128-2009 «Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия» [Электронный ресурс]. – Информационно-правовая система ГАРАНТ.
3. Шестопалов А.А. Уплотнение асфальтобетона как действенное средство снижения колееобразования // Дорожная техника. Санкт-Петербург — 2012 С. 83–85.
4. Dessouky, S., Masad, E., and Bayomy, F. (2003). “Evaluation of asphalt mix stability using compaction properties and aggregate structure analysis,” International Journal of Pavement Engineering, 4(2), 87-103.

5. Masad E., Little, D., Tashman L., Saadeh S., Al-Rousan, T., and Sukhwani, R. (2003). “Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance.” Research Report ICAR 203-1, Texas Transportation Institute, College Station, TX.
6. Oda, M., and Nakayama, H. (1989). “Yield function for soil with anisotropic fabric.” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 15(1), 89-105
7. Бугров, А.К. Анизотропные грунты и оснований сооружений. / Бугров А.К., Голубев А.И. СПб: «Недра»., 1993. с. 123-135
8. Шестопалов, А.А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием [Текст] :дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Шестопалов. – М., 1988. с 97-100.
9. Иванченко, С.Н. Рабочий процесс и выбор параметров катка с вакуумным устройством [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук / С.Н. Иванченко. – Л., 1985. с. 86-90.
10. Поздняков, М. К. Зарубежный опыт оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона [Текст] / М. К. Поздняков, Н. В. Быстров // Сб. ст. и док. ежегод. науч. сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. - М., 2009. - С. 7-17
11. Kandhal, Prithvi S. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer [Текст] / Prithvi S. Kandhal, L. Allen Cooley. - NCHRP Report 508, 2003.
12. ОДМ 218.3.017–2011 по определению колееобразования асфальтобетонных покрытий прокатыванием нагруженного колеса. М.: 2011.

A.V. Boitsev[1], A.A. Shestopalov[2]

CONSTRUCTIVE ANISOTROPY OF THE PROPERTIES OF PAVEMENT AND METHODS OF ITS ELIMINATION .

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

In this paper we study the structural anisotropy of the road pavement. A new method of selection of asphalt mixture by evaluating structural anisotropy by obtaining curves of deformation in the longitudinal and transverse directions, and further evaluation of their convergence.

Key words: structural anisotropy, compaction, rutting.

REFERENCES

[1] GOST 31015-2002 mixture of asphalt and asphalt Stone mastic specifications [electronic resource]. Information and legal safeguards (rus.).

[2] GOST 9128-2009 "Mixtures of asphalt road, airport and asphalt. Specifications "[Electronic resource]. - Information and legal safeguards (rus.).
[3] Shestopalov A.A. Compaction of asphalt concrete as an effective means of reducing rutting Road construction //. St. Petersburg - 2012 S. 83-85 (rus.).
[4] Dessouky, S., Masad, E., and Bayomy, F. (2003). "Evaluation of asphalt mix stability using compaction properties and aggregate structure analysis," International Journal of Pavement Engineering, 4 (2), pp. 87-103 (rus.).
[5] Masad E., Little, D., Tashman L., Saadeh S., Al-Rousan, T., and Sukhwani, R. (2003). "Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance." Research Report ICAR 203-1, Texas Transportation Institute, College Station, TX.
[6] Oda, M., and Nakayama, H. (1989). "Yield function for soil with anisotropic fabric." Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 15 (1), 89-105
[7] Bugrov, AK Anisotropic soils and structures foundations. / Bugrov AK Golubev AI St. Petersburg:., 1993. Pp. 123-135 (rus.)
[8] Shestopalov, AA The intensification of the process of rolling compaction of asphalt mixtures with evacuation [Text]: dis. ... Dr. tehn. Science / AA Shestopalov. - M., 1988. Pp. 97-100 (rus.)
[9] Ivanchenko SN Workflow and selection of roller settings with a vacuum device [Text]: Author. Dis. ... PhD / S.N. Ivanchenko. Leningrad, 1985. Pp. 86-90 (rus.)
[10] 10.Pozdnyakov, M.K. International experience in assessing the stability of asphalt concrete shear [Text] / M.K. Pozdnyakov, N. Bystrov // Coll. Art. and dok. scientific. Association of asphalt concrete research session. Moscow. 2009. Pp. 7-17 (rus.)
[11] Kandhal, Prithvi S. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer [Text] / Prithvi S. Kandhal, L. Allen Cooley. - NCHRP Report 508, 2003.
[12] ODM 218.3.017-2011 to determine the rutting of asphalt concrete pavement by rolling a loaded wheel. Moscow. 2011. (rus.)

УДК 629.114-474.22; DOI 10.1872/MMF-2016-72

В.С. Бурлуцкий[1], К.П. Позынич[2], Е.К. Позынич[3]

ПАРК ГРУЗОПОДЪЁМНЫХ КРАНОВ РОССИИ: ФЕДЕРАЛЬНАЯ, РЕГИОНАЛЬНАЯ И ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТЫ

[1]Виктор Степанович Бурлуцкий, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-6088; e-mail: vicstep@rambler.ru

[2]Константин Прохорович Позынич, к.т.н., доцент
Тихоокеанский государственный университет
Россия, Хабаровск
Тел.: (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru

[3]Евгений Константинович Позынич, старший преподаватель
Дальневосточный государственный университет путей сообщения
Россия, Хабаровск
Тел.: (4212) 56-66-47; e-mail: kpp.51@mail.ru

Аннотация

Проблемы обеспечения промышленной безопасности опасных производственных объектов связаны с продолжающимся процессом старения и высокой степенью износа основных производственных фондов оборудования и технических устройств, применяемых на ОПО, низкими темпами реконструкции устаревших производств и несвоевременной заменой оборудования, средств контроля и автоматизации на новые образцы, отвечающие требованиям и нормам промышленной безопасности. В работе проанализировано количественное и качественное изменение парка грузоподъемных кранов на федеральном (в целом по России), региональном (на примере территории, подконтрольной Дальневосточному управлению Ростехнадзора) и территориальном уровне (на примере территории Хабаровского края и Еврейской автономной области, подконтрольной Дальневосточному управлению Ростехнадзора).

Ключевые слова: подъемные сооружения, парк грузоподъемных кранов, динамика изменения, аварийность, травматизм, Ростехнадзор, данные, анализ

Грузоподъемные краны являются одним из важных элементов практически во всех отраслях экономики. Находят применение, а часто и определяют эффективность производства, краны различных типов, модификаций и грузоподъемностей широко используются во многих отраслях экономики. Состояние действующего парка грузоподъёмных кранов, спрос на них, степень их физического и морального износа являются отражением экономических процессов, происходящих в каждой отрасли. Спрос на подъемно-транспортное оборудование (ПТО) в последние годы в значительной степени определялся динамикой развития таких отраслей как машиностроение, черная и цветная металлургия, традиционная и атомная энергетика, строительство, топливная промышленность, нефтегазовая отрасль, другие сырьевые отрасли, а также темпами развития инфраструктурных проектов, портов и перегрузочных терминалов. Перспективы формирования спроса на грузоподъемные краны во многом определяются состоянием и темпами развития перечисленных отраслей экономики Российской Федерации.

В новых экономических условиях в России произошло многократное снижение капиталовложений в промышленное производство и другие отрасли экономики. Это привело к резкому сокращению платежеспособного спроса на ПТО, который по разным оценкам уменьшился в 8-15 раз по отдельным видам машин. Спрос на ПТО был направлен не на прирост парка, а на замену полностью изношенных машин, без которых производство могло просто остановиться.

По данным Росстата 65% оборудования находится в эксплуатации более 15-20 лет, а оборудование, которое можно назвать современным, т. е. срок эксплуатации которого меньше 5 лет, составляет менее 5%. Это говорит о том, что ПТО морально устаревает, а механизмы внедрения новых разработок остаются на невысоком уровне. За последние годы также резко снизилось количество и качество проведения капитальных и капитально-восстановительных ремонтов ПТО. Производившие данный вид работ заводы не выдержали конкуренции. Если в конце 80-х согласно данным Росстата доля отработавших нормативный срок службы мостовых кранов общего назначения составляла около 43%, козловых – 34%, стреловых – 30% (при нормативном сроке службы 10-16 лет в зависимости от грузоподъемности) и башенных – 40%, то теперь по различным экспертным оценкам за пределами нормативного срока службы эксплуатируется до 60% мостовых кранов, около 80% металлургических кранов и более 90% портальных кранов [1]. Многие из кранов отработали два срока службы и более, выработали свой ресурс и их эксплуатация может служить причиной аварий с тяжелыми последствиями.

На уменьшение спроса влияют и завершившееся строительство по таким главным для России прорывным инфраструктурным проектам как Олимпиада-2014 в Сочи, Универсиада в Казани и др., замедление темпов

жилищного строительства после десятилетнего строительного бума на фоне проводимых правительством реформ, в том числе по ипотеке и национальным проектам по развитию регионов, и спад активности развития дорожной инфраструктуры. По данным ассоциации «Союзкран» в 1985 г. из 28 крановых заводов, работавших в СССР, за годы перестройки и экономических реформ было потеряно около 80%.

Рост ВВП России после 2014 года прекратился и в 2015 год составил 3,80%, а уровень промышленного производства в 2015 году, по данным Федеральной службы госстатистики, снизился по сравнению с 2014 годом на 3,4%. Существенно снижаются инвестиции в основной капитал. За период январь-май 2015 года падение составило 4,8%. Оно было вызвано сокращением привлеченных средств, что прямо сопряжено с удорожанием кредитов, импортной продукции машин и оборудования в результате девальвации рубля. Падение инвестиций – длительное явление, которое идет с 2013 года. Сокращение инвестиций связано с уменьшением объемов государственной поддержки и объема привлеченных средств в результате снижения доходности бизнеса. Такие промышленные гиганты как Газпром, Лукойл, ОАО РЖД, Объединенная судостроительная корпорация, «Уралвагонзавод», Объединенная авиастроительная корпорация, Росатом и др., обеспечивающие существенную долю капитальных вложений в российскую экономику, заявили о снижении объемов инвестиций в 2013 году на 30%.

Еще одной отрицательной тенденцией стала потеря российскими предприятиями (в том числе и с госучастием), являющимися мощными потребителями ПТО, способными своими плановыми заказами задать тренд и перспективы развития российской краностроительной отрасли на много лет вперед, системного подхода к формированию потребности в приобретении крановой техники. Что касается текущей ситуации в отрасли ПТО, то для неё характерно существенное снижение спроса, ликвидация некоторых предприятий, закрытие профильных институтов проектирования крановой техники и инженерно-технических центров, утрата квалифицированного персонала и соответствующих компетенций. Действующий в России парк подъёмных сооружений, в том числе грузоподъёмных кранов, наполнен в значительной степени машинами, произведёнными в 70-80-е годы прошлого столетия, а сложившаяся к концу прошлого столетия структура парка машин к настоящему времени не претерпела каких-либо существенных изменений. Учитывая эти обстоятельства, наблюдатели и эксперты прогнозируют на ближайшие годы стагнацию, а в лучшем случае стабилизацию российского рынка ПТО, объем которого в 2014 г. составил 35,8 млрд. руб.

Количество находящихся в эксплуатации подъемных сооружений оказывает влияние на уровень аварийности и смертельного травматизма при их эксплуатации (рис.1). По данным Ростехнадзора [2] в России в 2014 го-

ду на 74206 поднадзорных предприятиях и организациях эксплуатировалось почти 817 тыс. подъемных сооружений (из них 242 231 грузоподъемный кран, 25 815 подъемников (вышек), 529 662 лифта, 167 подвесных канатных дорог, 521 буксировочная канатная дорога, 2 фуникулера, 10 757 эскалаторов (в том числе 341 – в метрополитенах), 4442 строительных подъемника и 3085 подъемников для инвалидов). На территории Российской Федерации эксплуатируется почти 32679 грузоподъёмных кранов импортного производства, что составляет 13% от общего числа зарегистрированных в Ростехнадзоре грузоподъёмных кранов.

До 2008 года крановый парк России сокращался на 5-10 тысяч единиц в год. За 15 лет (с 1993 по 2008 г.) количество грузоподъемных кранов в России уменьшилось более, чем на 100 тыс. единиц [3].

В 2008 году был зафиксирован прирост кранового парка на 10 тысяч кранов, а с 2009 года крановый парк вновь начал сокращаться. По итогам 2011 года количество кранов увеличилось по сравнению с данными 2010 года на 9792 единицы, а в 2012 г. – еще на 2049 ед.; в 2013 г. количество грузоподъемных кранов уменьшилось на 3550 ед., но в 2014 году по сравнению с 2013 годом прирост парка грузоподъемных кранов составил 1829 единиц. Количество других видов подъемной техники также продолжает увеличиваться. Так, в 2014 г. количество подъемных сооружений увеличилось по сравнению с 2013 г. почти на 4 500 единиц.

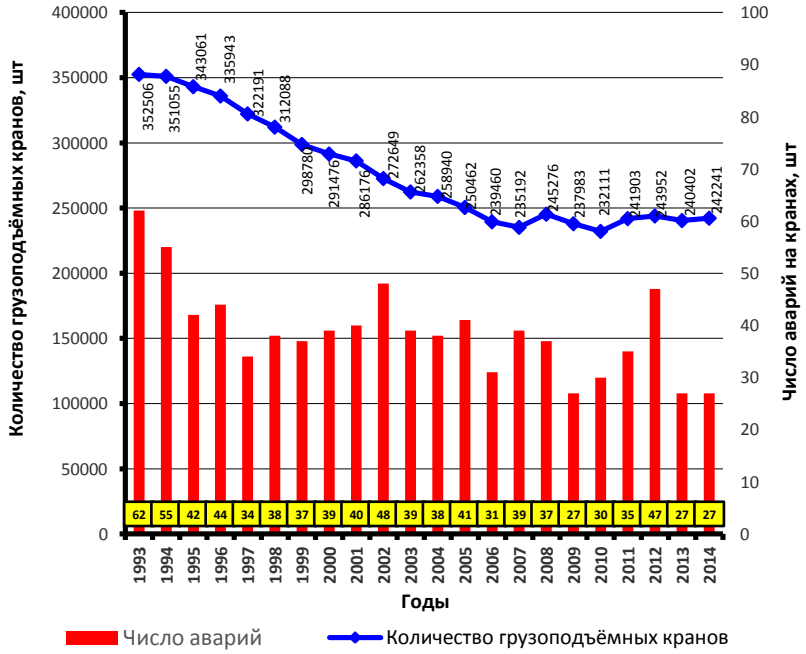


Рис. 1. Динамика изменения кранового парка России и аварийности при его эксплуатации

В доступных для общего сведения источниках, например, в ежегодных отчётах Ростехнадзора, приводятся данные только об общем количестве поднадзорных грузоподъемных кранов в России, динамике изменения парка кранов в целом, данные о среднем износе парка в целом, сведения об

аварийности и смертельном травматизме по типам кранов при эксплуатации (рис.2), что позволяет сделать вывод только об уровне аварийности и травматизма по типам кранов. Так, в 2014 году этот уровень оставался традиционно высоким при эксплуатации автомобильных, пневмоколесных и кранов на спецшасси (41% от общего числа смертельных случаев на кранах), башенных (24%) и мостовых (24%) кранов.

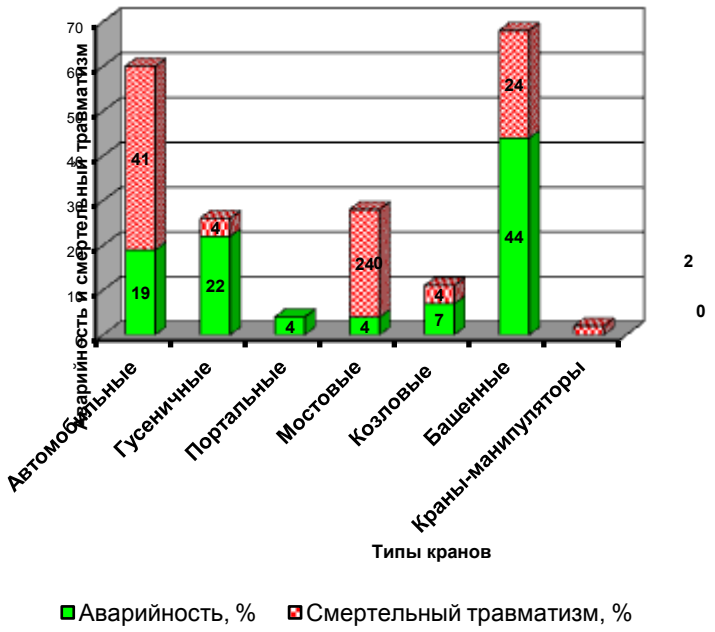


Рис. 2. Аварийность и смертельный травматизм по типам грузоподъёмных кранов в России в 2014 году

Главный недостаток такого подхода в том, что не приводится и не анализируется структура парка по типам грузоподъёмных кранов и динамика изменения структуры парка каждого типа грузоподъёмных кранов во времени, что не позволяет выявить связь между количеством кранов конкретного типа и аварийностью и смертельным травматизмом при их эксплуатации. Имеющиеся данные о численности отдельных секторов кранового парка в большинстве случаев носит неполный, а то и противоречивый характер. Ситуацию усугубляет и то обстоятельство, что в современных сведениях и отчётах необоснованно употребляется обобщённое понятие «автомобильные краны», под которым понимается суммарное количество автомобильных, пневмоколёсных, кранов на специальном шасси автомобильного типа, короткобазовых кранов, а понятие «стреловые самоходные краны» вообще практически не применяется.

Последнее известное нам описание структуры парка грузоподъёмных кранов России, содержавшееся в Письме Госгортехнадзора РФ от 06.04.2001 N 12-01/348 "О травматизме и аварийности на подъемных сооружениях в 2000 г. и I квартале 2001 г." [4], приведено ниже в таблице. В

этой же таблице для качественного сравнения приведены известные нам характеристики структур крановых парков некоторых стран ближнего зарубежья.

Из данных таблицы следует, что парк стреловых самоходных (далее стреловых) кранов является наиболее многочисленным в общем парке грузоподъёмных кранов России. В частности, в России этому, по-видимому, способствует сохранение интереса потребителей прежде всего

Таблица. Сведения о структуре парков грузоподъёмных кранов в России, Республике Беларусь и Украине

Тип грузоподъемного крана	Количество кранов в указанном году и доля кранов данного типа в парке кранов					
	Россия		Республика Беларусь		Украина	
	2000 год		2013 год		2010 год	
	Количество, штук	Доля в парке, %	Количество, штук	Доля в парке, %	Количество, штук	Доля в парке, %
Башенные	24477	8	1377	9,6	5329	5,8
Мостового типа*:	121018	41,5	6338	44	36963	40,0
*Мостовые	98869	34	4926	34	-	-
*Козловые	22149	7,5	1412	10	-	-
Стреловые самоходные**:	140471	48,7	6646	46	49938	53,0
**Автомобильные	105751	36,7	5370	37	-	-
**Гусеничные	16863	5,7	637	4,6	-	-
**Пневмоколесные	12583	4,4	294	2	-	-
**Железнодорожные	4480	1,6	243	1,6	-	-
**На спец. шасси	794	0,3	102	0,8	-	-
Портальные	4214	1,4	32	0,3	1108	1,2
Краны-манипуляторы	1269	0,4	20	0,1	-	-
Итого	291476	100	14413	100	93338	100

к автокранам российских производителей, которые вполне соответствуют мировым стандартам качества и выгодно отличаются от импортных своей стоимостью.

В конце 80-х годов прошлого столетия доля стреловых кранов в общем парке грузоподъемных кранов страны превышала 60% [5], а на конец 2000 года несколько уменьшилась, но составляла в России практически половину – 48,7%. Сказанное характерно также и для стран ближнего зарубежья. Так, в Украине стреловых кранов на конец 2010 года было 54% от общего числа кранов, в Республике Беларусь – 46%. Заметим, что подобное распределение спроса имеет место только в России, в европейских же странах значительную часть этого рыночный сектора прочно занимают краны-манипуляторы, имеющие грузоподъемность до 30 тонн. Число грузоподъемных кранов в одной из развитых в промышленном отношении

стран мира – США, составляет около 225000 [6], т.е. на 10-20% меньше, чем в России, при этом качественная картина парка кранов примерно одинакова.

Кроме тенденции прироста общего количества кранов, в последние годы стала проявляться и тенденция на снижение относительного количества эксплуатируемых грузоподъёмных кранов, отработавших нормативный срок службы. По опубликованным данным Ростехнадзора, средний процент износа кранов в 2011 году составлял 66,9%, в 2012 году – 66,4%, в 2013 году – 64,2%, а в 2014 году уменьшился до 61,6%. Эти цифры показывают, что процент технических устройств, физически и морально устаревших, отработавших нормативный срок эксплуатации, хотя и снижается весьма медленно и остается высоким, но имеется устойчивая тенденция на обновление парка. Из стоящих на учёте в Госпромнадзоре Республики Беларусь грузоподъёмных кранов в 2014 году отработали нормативный срок службы 75,9% от общего количества (в 2013 году – 77%, в 2012 году – 79,9% при снижении общего количества кранов на 0,5%). В ходе модернизации, реконструкции производств предприятиями и организациями Республики Беларусь приобретено 237 новых грузоподъемных кранов всех типов, т.е. уровень обновления составил чуть более 1,5% при норме 8-12%, что приводит к деградации (старению) и изнашиванию кранов. Темпы старения парка кранов Украины также значительно опережают темпы технического перевооружения. По состоянию на 01.01.2010 г. из грузоподъёмных кранов, стоящих на учёте в органах Госгорпромнадзора Украины, доля грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы, увеличилась с 70% в 2003 году до 83% в 2010 году от их общего количества и составила в указанном году для стреловых самоходных кранов – 77%, башенных – 84%, мостовых и козловых – 88%, портальных кранов – 88%.

Анализ «возрастного» состояния парка технических устройств в региональном разрезе показывает, что здесь ситуация во многом сходная, и только примерно четвертая часть организаций находит финансовые средства для решения проблем обновления парка. Естественно, что технические, организационные и финансовые проблемы на поднадзорных предприятиях оказывают влияние на уровень промышленной безопасности.

Необходимо отметить, что в сфере промышленной безопасности начала работать новая модель государственного регулирования. Впервые в практике российских надзорных органов контрольная и разрешительная деятельность Ростехнадзора дифференцирована с учетом степени риска и масштаба возможных последствий аварий на опасных производственных объектах (риск-ориентированный подход [7]) .

В соответствии с положениями Федерального закона № 22-ФЗ 1 января 2014 г. завершился переходный период и в полном объеме вступили в силу принятые в 2013 г. изменения в законодательство о промышленной безопасности в отношении объектов, уже зарегистрированных в госреестре

ОПО. Изменения законодательства в области промышленной безопасности в части классификации ОПО и формирования новых принципов риск-ориентированного надзора за соблюдением эксплуатирующими организациями требований промышленной безопасности привели к тому, что ОПО, на которых используются только стационарно установленные грузоподъемные механизмы (за исключением лифтов, подъемных платформ для инвалидов), эскалаторы в метрополитенах, фуникулеры, отнесены к 4-му классу опасности с низким риском возникновения аварии при эксплуатации ОПО. Учитывая, что подавляющее большинство опасных производственных объектов отнесено к 4-му классу опасности, в отношении которых плановые проверки не проводятся, оценка и анализ состояния промышленной безопасности практически может осуществляться только по информации, представляемой организациями в рамках производственного контроля и поступающих экспертиз промышленной безопасности. Ограничения, наложенные Федеральными законами «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» № 294-ФЗ, в части сроков и порядка проведения поверок, «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ в части возможности проведения плановых проверок, не позволяют объективно оценивать и анализировать состояние промышленной безопасности в организациях, эксплуатирующих ОПО.

К настоящему времени территориальными органами Ростехнадзора проведена значительная работа по перерегистрации ОПО, причём понятие опасного производственного объекта подразумевает осуществление на нем производственной деятельности. Кратко проанализируем итоги перерегистрации поднадзорных ОПО с подъёмными сооружениями, включая их классификацию по классам опасности.

Сравнительный анализ информации за 2012–2014 г.г., приведённой в годовых отчётах о деятельности Ростехнадзора, показывает, что за этот период количество ОПО, на которых эксплуатируются подъемные сооружения, резко (более, чем на 37%) уменьшилось. Так, в 2012 г. их число составляло 83 921 шт. [8] , в 2013 г. - 74 213 шт. [9] , а в 2014 году по итогам перерегистрации с присвоением соответствующего класса опасности и исключения лифтов из категории опасных производственных объектов осталось только 52858 ОПО с признаком опасности 2.3 «Использование стационарно установленных грузоподъемных механизмов, эскалаторов, канатных дорог, фуникулеров», из которых 48 210 объектов отнесены к 4-му классу опасности, что составляет 91% от общего числа зарегистрированных ОПО.

Проведенный нами мониторинг и анализ региональной и территориальных баз данных с 2011 по 2015 г.г. по грузоподъёмным кранам, состоящим на учете в Дальневосточном управлении Федеральной службы по

экологическому, технологическому и атомному надзору (Приморский, Хабаровский, Камчатский край, Амурская область, Еврейская автономная область, Северные Курильские острова (Парамушир, Шумшу) Сахалинской области), показал, что тенденции, характерные для России в целом, характерны и для Дальневосточного федерального округа (ДФО). Остановимся на этом подробнее, используя сведения ежегодных «форм № ПС» о надзорной и контрольной деятельности по надзору за подъемными сооружениями Дальневосточного управления Ростехнадзора за пять лет – с 2011 по 2015 г.г.

Под надзором Дальневосточного управления Ростехнадзора находится 2260 предприятий, эксплуатирующих опасные производственные объекты, лифты, эскалаторы, платформы для инвалидов, на которых эксплуатируются 21424 технических устройств, из них 8497 грузоподъёмных кранов (39,7%) [10]. Число грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы, на территории ДФО в 2014 году составило 64,8%. Замена грузоподъёмных кранов идёт медленно. За отчетный период было поставлено на учет 2641 техническое устройство, снято с учета 2281 техническое устройство.

Основная часть организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты с применением подъёмных сооружений, представляет собой малые предприятия с наличием 1-3 единиц поднадзорной техники, используемой для собственных нужд, реже для предоставления услуг в виде погрузочно-разгрузочных работ или производства строительно-монтажных работ малого объёма.

Проанализируем структуру регионального парка по типам грузоподъёмных кранов и динамику изменения во времени структуры парков основных типов грузоподъёмных кранов, составляющих региональный парк. Для примера рассмотрим структуру регионального парка по основным типам грузоподъёмных кранов, зарегистрированных эксплуатируемых на территории, подконтрольной Дальневосточному управлению Ростехнадзора (рис.3).

Анализ данных, приведённых на рис.3, показывает, что тенденции, характерные для России в целом, характерны и для её регионов, например Дальневосточного федерального округа. В структуре регионального парка грузоподъемных кранов, состоящих на учете в ДВ Управлении Ростехнадзора, также отмечается преобладание в общем парке кранов стрелового типа. Интересно, что в общем парке заметно выделяется доля автомобильных кранов, составляющая третью часть от общего количества кранов. Доля стреловых кранов всех типов составляет 35,0 % (рис.3), а вместе с кранами-манипуляторами – практически половину регионального парка грузоподъемных кранов, что совпадает с данными, характерными для парка грузоподъемных кранов России. Подтверждаются общероссийские дан-

ные, говорящие о значительном содержании грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы.

Парк подъемных сооружений интенсивно заполняется иностранной техникой, в том числе бывшей в эксплуатации. Так, по типам кранов, представленным на рис.3, краны иностранного производства составляют в процентном отношении около 24%, а среди кранов-манипуляторов количество импортной техники превышает отечественную более, чем в два раза.

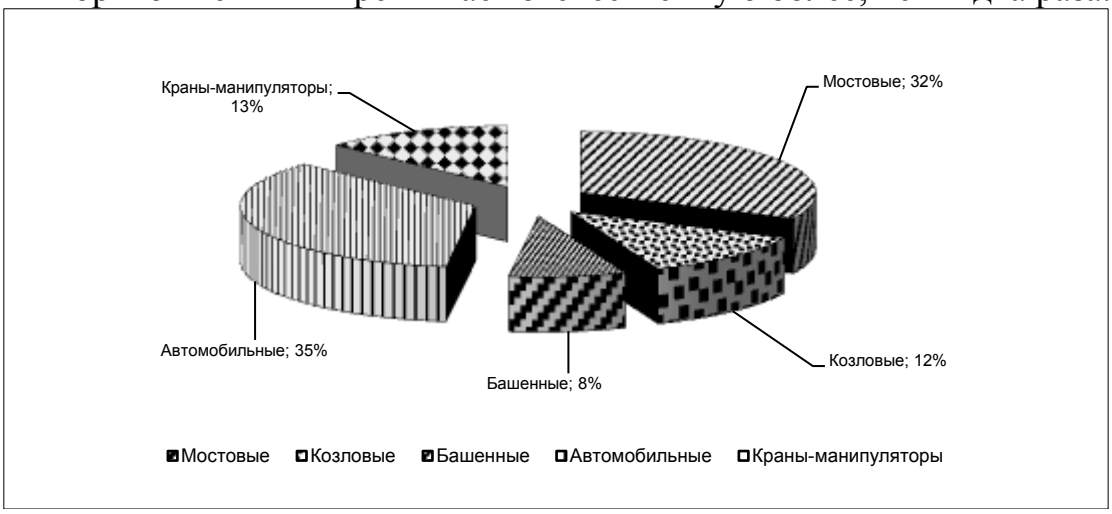


Рис. 3. Структура регионального парка по основным типам грузоподъёмных кранов (на территории, подконтрольной Дальневосточному управлению Ростехнадзора)

Отметим несколько характерных для регионального парка тенденций, выявленных при статистическом исследовании, проведенном по нескольким основным видам грузоподъёмных кранов.

Так, например, для регионального парка характерно существенное увеличение количества кранов-манипуляторов (рис.4), вытеснивших и занявших нишу автомобильных кранов грузоподъёмностью до 12-14 т, причём в парке кранов-манипуляторов преобладают технические устройства импортного производства.

Ещё одной характерной особенностью является увеличение более чем в два раза числа железнодорожных кранов (рис.5) в связи с передачей технических устройств, ранее зарегистрированных в ОАО «РЖД», под надзор Ростехнадзора.

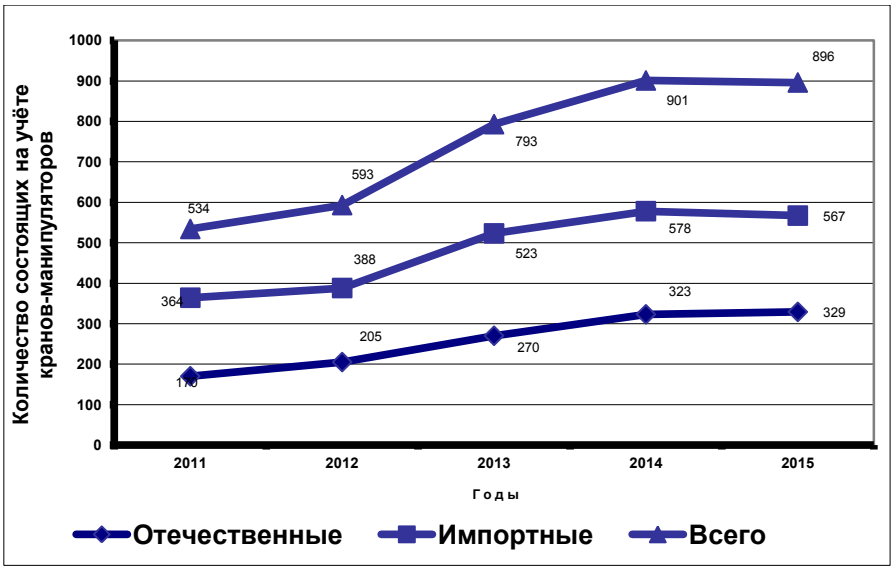


Рис. 4. Динамика развития регионального парка кранов-манипуляторов

Рис.5. Динамика развития регионального парка железнодорожных кранов

Рис.6. Динамика развития регионального парка кранов-трубоукладчиков

Характерной тенденцией является изменение (отрицательная динамика) парка кранов-трубоукладчиков, что связано с сокращением объёмов работ по строительству нефте- и газопроводов, проходящих по территориям региона.

Проанализируем структуру территориального парка и динамику изменения во времени структуры парков отдельных типов грузоподъёмных кранов, для чего рассмотрим результаты мониторинга территориального парка грузоподъёмных кранов по двум субъектам РФ в составе ДФО – Хабаровского края и Еврейской автономной области – за период с 2006 по 2014 г.г. (рис.7).

Количество подъёмных сооружений по годам имеет общую тенденцию к уменьшению при выраженном сокращении в их составе числа грузоподъёмных кранов. За указанный период была выявлена тенденция к уменьшению общего количества единиц грузоподъёмных кранов и их отдельных типов. Из тех видов, которые показали отрицательную динамику, лидером являются пневмоколёсные, гусеничные, а также башенные краны.

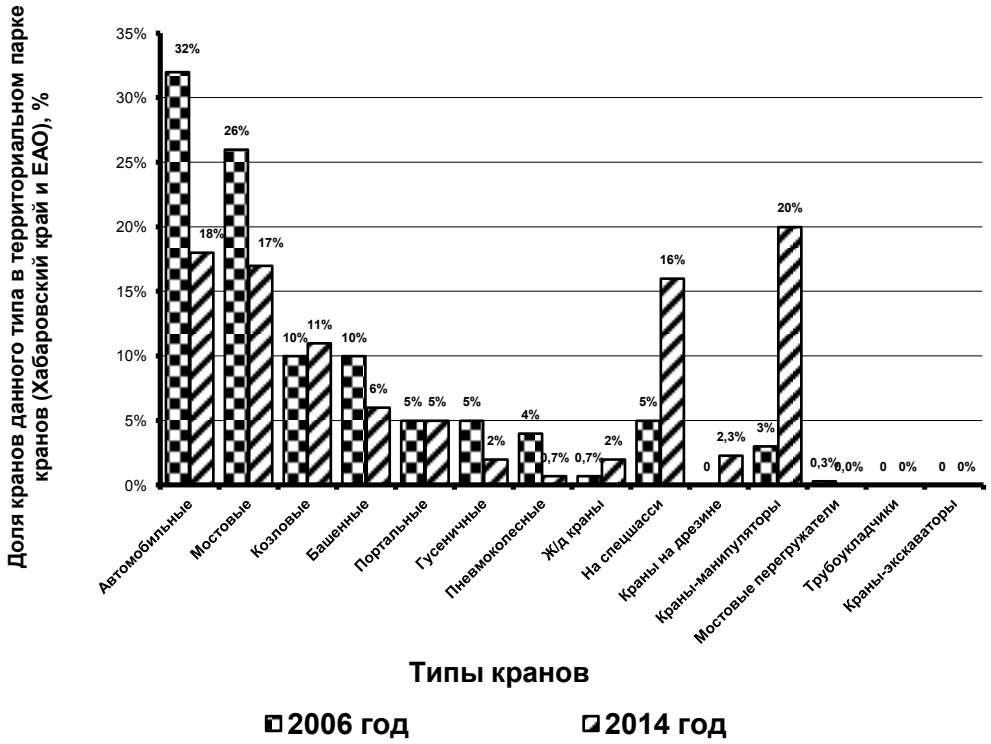


Рис.7. Структура территориального парка грузоподъёмных кранов (на примере парка, эксплуатируемого на территории Хабаровского края и Еврейской автономной области, подконтрольных Дальневосточному управлению Ростехнадзора)

Промышленное производство, обеспечивая жизнедеятельность государства и общества, одновременно является источником потенциальной опасности. От состояния промышленной безопасности опасных производственных объектов (далее – промышленной безопасности), их противоаварийной устойчивости зависит не только надежное обеспечение общества и государства всеми видами ресурсов и продукции, но и непосредственно жизнь и здоровье граждан, поддержание нормальных условий для жизнедеятельности, сохранение окружающей среды.

Рассмотренные в данной работе вопросы состояния региональной и территориальной систем промышленной безопасности, направленных на снижение уровня травматизма и аварийности, и в частности на предотвращение крупных аварий, является актуальной научной проблемой, требующей дальнейшего освещения с использованием методов математической статистики - при анализе аварийности и травматизма на предприятиях угольной промышленности, системного анализа и теории организационных систем - при анализе истории развития и прогнозировании направлений совершенствования систем управления промышленной безопасностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тенденции и перспективы рынка грузоподъемных кранов России / Недельский В.О., Волыхин К.Ф. // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2004. – № 6. – С. 14-16.
2. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году / Колл. авт. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 410 с.
3. Бурлуцкий В.С., Позынич К.П., Позынич Е.К. Производственный травматизм и аварийность при эксплуатации грузоподъёмных кранов. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. 14 -15 июня 2012 года.– СПб.: – Изд-во Политехн. ун-та, 2012, 846 с.: ил. С. 212-221.
4. Постановление коллегии Госгортехнадзора России от 05.02.2001 № 1 «Об итогах работы Госгортехнадзора России в 2000 г. и задачах на 2001 г.» // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 2. – С.3-8.
5. Аварии с подъёмными кранами в России и грузоподъемными механизмами в 2009 году [Электронный ресурс] // Федеральный портал ProTown.ru :Электрон. текстовые дан.– Режим доступа: http://www.protown.ru/information/hide/7907.html, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (Дата обращения: 26.03.2012).
6. Каминский Л.С. Повышение безопасности эксплуатации стреловых кранов на основе регистрации и анализа их рабочих параметров: Дисс. ... канд. техн. наук – Новочеркасск, 2001. – 159 с.

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 апреля 2016 г. № 559-р План мероприятий ("ДОРОЖНАЯ КАРТА") по совершенствованию контрольно-надзорной деятельности в Российской Федерации на 2016-2017 годы
8. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2012 году / Колл. авт. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 399 с.
9. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2013 году / Колл. авт. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 406 с.
10. Годовой отчёт о деятельности Дальневосточного управления Ростехнадзора в 2014 году / колл. Авт. – Хабаровск.: – Дальневосточное управление Ростехнадзора, 2014. – 196 с.

V. Burlutskiy[1], C. Pozynich[2], E. Pozynich[3]

THE PARK OF CRANES IN RUSSIA: FEDERAL, REGIONAL AND TERRITORIAL COMPONENTS

[1]St. Petersburg Polytechnical University Peter the Great, Russia;
[2]Pacific National University, Russia;
[3]Far Eastern State Transport University, Russia

Abstract

Problems of industrial safety of hazardous production facilities related to the ongoing aging process and high degree of depreciation of basic production assets of equipment and technical devices used at hazardous production facilities, the slow pace of reconstruction of outdated production facilities and untimely replacement of equipment, controls and automation to new samples that meet the requirements and standards of industrial safety. In this work, we analyze quantitative and qualitative change of the Park of cranes on Federal (in Russia), regional (in General, for example, the territory controlled by the far East Department of Rostekhnadzor) and regional level (by example of Khabarovsk territory and the Jewish Autonomous region under control of the far Eastern Department of Rostechnadzor).

Key words: lifting facilities, a Park of cranes, the dynamics of changes, accidents, injuries, Rostekhnadzor, data analysis

REFERENCES

[1] Trends and prospects of market of cranes Russia / Nedelsky V. O., K. F. Volykhin // Elevating constructions. A special technique. 2004. No 6. Pp. 14-16.

[2] Annual report on the activities of the Federal service for ecological, technological and nuclear supervision in 2014 / Call. auth. M.: ZAO NTC PB, 2015. 410 p.
[3] The Burlutskiy B. S., Pozynich K. P., E. K. Pozynich Occupational injuries and accidents in the operation of cranes. The modern mechanical engineering. Science and education: proceedings of the 2nd International scientific-practical conference. 14 -15 June 2012.– SPb. Publishing house of the Polytechnic. un-ta, 2012, Pp. 212-221.
[4] The resolution of the Board of Gosgortechnadzor of Russia dated 05.02.2001 № 1 "About results of work of Gosgortekhnadzor of Russia in 2000 and tasks for 2001" // Safety in industry. 2001. No. 2. Pp. 3-8.
[5] Accidents with cranes in Russia and lifting mechanisms in 2009 [Electronic resource] // the Federal portal ProTown.ru :Electron. text Dan. – Available at: http://www.protown.ru/information/hide/7907.html free. – The ingestion. screen. – Lang. Rus. (Accessed 26.03.2012).[6]. Kaminsky, L. S. improving the safe operation of jib cranes on the basis of registration and analysis of working parameters: Diss. ... candidate. tech. Sciences – Novocherkassk, 2001. 159 p.
[6] The order of the Government of the Russian Federation from April 1, 2016 No. 559-R action Plan ("roadmap") for improving control and Supervisory activity in the Russian Federation for 2016 – 2017
[7] Annual report on the activities of the Federal service for ecological, technological and nuclear supervision in 2012 / Call. auth. Moscow. ZAO NTC PB, 2013. 399 p.
[8] Annual report on the activities of the Federal service for ecological, technological and nuclear supervision in 2013 / Call. auth. Moscow. ZAO NTC PB, 2014. 406 p.
[9] Annual report on the activities of the far Eastern Department of Rostechnadzor in 2014 / call. Auth. – Khabarovsk. Far Eastern Department of Rostechnadzor, 2014. 196 p.
[10] RD 10-112-96 Guidelines for examination of lifting machines with expired service life. Part 1. General.

УДК 625.032; DOI 10.1872/MMF-2016-73

К.В. Елисеев

КОЛЕСНАЯ ПАРА И РЕЛЬСОВЫЙ ПУТЬ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ТОЧЕК КОНТАКТА

Елисеев Кирилл Валентинович, ассистент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7770, E-mail: kir.eliseev@gmail.com

Аннотация

Для определения параметров взаимодействия колеса и рельса во время движения подвижного состава используются системы, включающие в себя измерительные колесные пары и алгоритмы обработки измеряемых величин. Предложен метод восстановления координат точек контакта по измеряемым деформациям. Приведены некоторые результаты его применения.

Ключевые слова: Механика деформируемого твердого тела, измерение деформаций, моделирование, контактные силы, координаты контакта, псевдообратная матрица, железные дороги

Введение

Колёсные пары относятся к ходовым частям и являются одним из основных элементов вагона, они определяют движение по рельсовому пути, через них передаются все нагрузки, действующие между подвижным составом и путем.

Экспериментальное определение координат контакта также как и контактных сил позволяет дать оценку качеству применяемого оборудования, состояния пути. Результаты могут быть использованы при проектировании нового подвижного состава.

Варианты взаимного положения для номинальных размеров колес и рельсов

Параметры взаимодействия колесо - рельс зависят от принятой конфигурации профиля колеса и рельса, их номинальных размеров, рисунки 1, 2.

Профиль поверхности катания по ГОСТ 10791-2011 [10], рисунок 1, соответствует профилю головки рельса. Начиная от гребня, поверхность катания колеса делается конической с уклоном 1:20, который соответствует подуклонке рельсов. При движении по прямому участку

пути конусная поверхность катания колесных пар сохраняет среднее положение колесных пар относительно оси пути, препятствуя отклонению от этого положения.

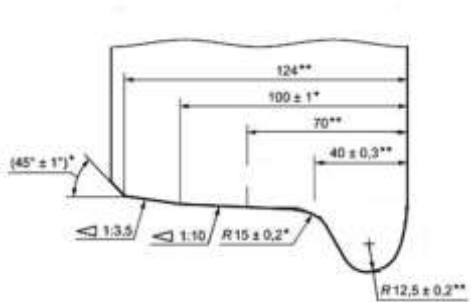


Рис. 1. Поверхность катания по ГОСТ 10791-2011

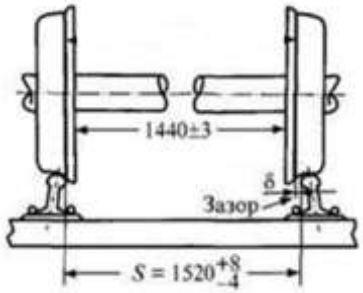


Рис. 2. Размеры колесной пары и ширина рельсовой колеи

Если одно колесо катится по рельсу меньшим кругом, а другое колесо этой же оси большим кругом, то последнее колесо будет опережать первое. Возникает виляющее движение колесной пары. Как только колесная пара выведена по каким-либо причинам из среднего положения, она стремится вновь занять его.

Во время движения колесо и рельс могут принимать различные взаимные положения кроме номинального, рисунок 3.

Рис. 3. Варианты взаимного расположения колеса и головки рельса

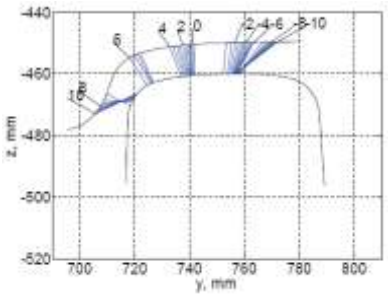


Рис. 4. Точки контакта при смещении колеса

Может возникать однозонный и двухзонный контакт. Под зоной следует понимать некоторую ограниченную односвязную область, на которой происходит контакт.

Имеется большое количество работ, посвященных исследованию так называемого геометрического контакта – контакта геометрических кривых сечений без учета деформирования соответствующих тел [4]. На рисунке 4 представлены варианты точек контакта для различных взаимных смещений колеса и рельса.

Основные сведения об измерительной системе

Измерительная система состоит из колесной пары с установленными тензометричекими датчиками деформаций, измерительной аппаратуры с

ограниченным числом каналов (64), калибровочного стенда [3], алгоритма вычислений сил и координат точек контакта [1, 2, 5]. По измеренным деформациям необходимо восстановить контактные силы и координаты точек контакта.

Дальнейшее рассмотрение проводится для неподвижной колесной пары. Для учета вращения применяется аппроксимация деформаций на окружностях с использованием интерполяционных сплайнов и здесь не рассматривается

Модель колесной пары на рельсах.

Для разработки алгоритма вычислений необходимо построить математическую модель отдельной колесной пары, включающую взаимодействие колес с рельсами.

Построена конечно-элементная модель в системе ANSYS [9], включающая колесную пару и фрагменты рельсов, рисунок 5.

Со стороны вагона, на подшипник, расположенный у колеса 1, действуют силы F_{x1}, F_{z1} и момент M_{x1}; аналогичные нагрузки действуют на подшипник, расположенный у колеса 2. Вектор-столбец приложенных сил обозначим $F=\left[F_1,\ldots,F_m\right]^T$. В подшипниках запрещены перемещения колесной пары вдоль пути.

Между колесами и рельсами имеется контактное взаимодействие с заданным коэффициентом трения. В результате в месте контакта колеса 1 и рельса возникают силы реакции R_{x1}, R_{y1}, R_{z1} и в месте контакта колеса 2 и рельса — силы R_{x2}, R_{y2}, R_{z2}, которые образуют столбец $R=\left[R_1,\ldots,R_p\right]^T$.

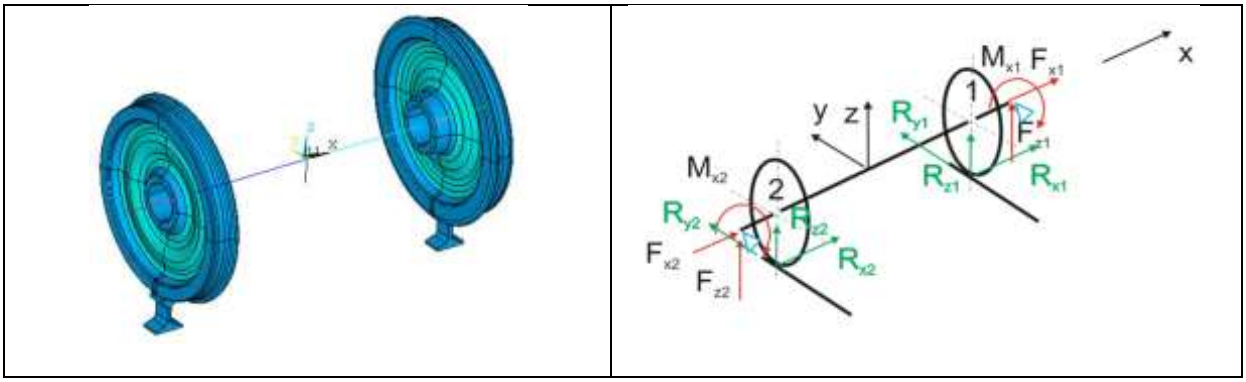


Рис. 5. Модель колесной пары, схема крепления и нагружения.

Деформации дисков колес, измеряемые в заданных точках, образуют вектор-столбец $\varepsilon=\left[\varepsilon_1,\ldots,\varepsilon_n\right]^T$, состоящий из 64 элементов.

Процедура восстановления сил состоит в следующем. Вначале проводится базовый расчет для заданного значения вертикальной силы F_0 в подшипниках, для заданного взаимного расположения колес и рельсов, в результате можно получить деформации ε_0 и силы в контакте R_0.

Далее проводится серия расчетов, в которых одна из сил получает малое приращение ΔF_i. Считая связь приращений сил и деформаций линейной, можно получить соотношение

$$\Delta\varepsilon = A\Delta F \tag{1}$$

Поскольку количество измерений деформаций больше числа приложенных сил, для получения обратной зависимости можно построить «псевдорешение», которое дает вектор-столбец ΔF, минимизирующий евклидову норму ошибки $\|A\Delta F - \Delta\varepsilon\|$ [7].

Вторая система линейных алгебраических уравнений связывает малые приращения сил, действующих в местах контакта колес и рельсов, с малыми приращениями приложенных сил

$$\Delta R = B\Delta F \tag{2}$$

Силы, действующие в местах контакта колес и рельсов $\tilde{R}$ во время эксперимента, находятся по измеряемым деформациям $\tilde{\varepsilon}$ по формуле

$$\tilde{R} = R_0 + \Delta R = R_0 + B\left(A^T A\right)^{-1} A^T\left(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_0\right). \tag{3}$$

Были проведены серии численных экспериментов, подтвердившие работоспособность предложенного алгоритма. Для выбранной конфигурации модели удается восстановить силы реакции по измеряемым деформациям, а также значение угла поворота колесной пары.

Предложенный алгоритм восстановления сил основывается на предположении о линейности связи сил и деформаций. Для проверки этого проведен расчет с постепенным нагружением колесной пары вертикальными силами в диапазоне 30-300кН. Оказалось, что деформации и силы в контакте растут нелинейно.

Первое объяснение этому – задача включает контактное взаимодействие, а значит является нелинейной. Можно вспомнить самую известную контактную задачу – задачу Герца [8]. В ней зависимость между сближением тел h и контактной силой F дается соотношением $F \sim h^{3/2}$.

Одновременно следует отметить, что в рамках одной задачи возможны как нелинейные связи между ее параметрами, так и линейные. В данном случае нам важная связь между силами в контакте и деформациями вдали от контактной зоны, и она должна быть линейной. Она же линейна и в задаче Герца.

Дальнейшее изучение результатов показало, что при увеличении прижимающей силы сдвигается область контакта, рисунок 6. Это приходит из-за изменений контактных площадок, изгиба колес и рельсов.

а б

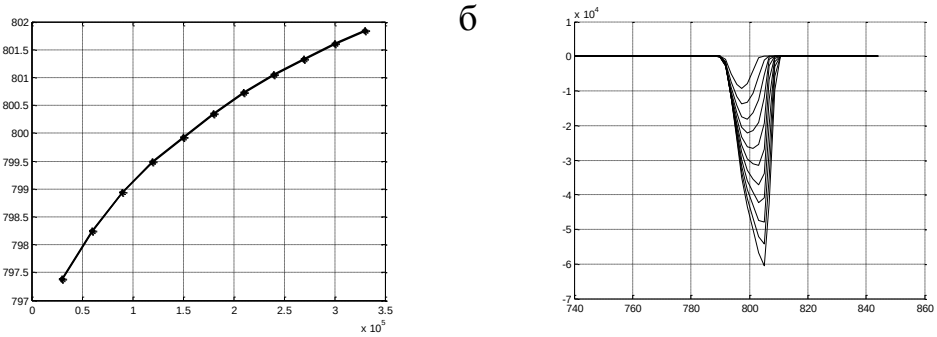


Рис. 6. Изменение координат контакта (а) и распределения вертикальных узловых сил (б) при увеличении прижимающей силы

Предложенный алгоритм показал в целом свою работоспособность, но при следующих ограничениях:

- затруднительно включить в расчет координаты точек контакта;
- полученные результаты зависят от конфигурации модели, коэффициента трения в контакте, параметров фрагмента рельса;
- решение задачи о нагружении предложенной модели при наличии трения не является единственным.

Модель с приложенными сосредоточенными силами

Для создания модифицированного алгоритма предложена вторая модель колесной пары. Принимается, что контактная площадка является относительно небольшой, вместо контактного взаимодействия с распределенными нормальными и касательными контактными давлениями введем тройку сил для каждой контактной области.

Рассмотрим отдельную колесную пару, рисунок 7. В точках установки подшипников заданы:

- жесткости на перемещения вдоль пути, повороты вокруг вертикальной оси по параметрам промежуточной скобы между тележкой и парой;
- перемещения $u_{xi} = 0$ и $u_{zi} = 0$, повороты $\theta_{xi} = 0$.

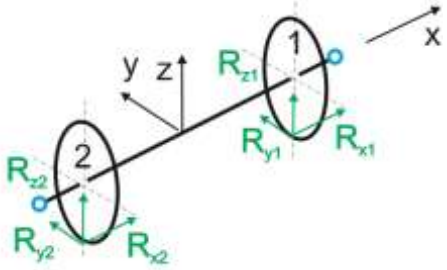


Рис. 7. Модель колесной пары без контакта с рельсами

Проведя серию экспериментов, задавая одну из компонент сил или смещение точки контакта, можно получить систему линейных

алгебраических уравнений, которые связывают измеряемые деформации и приложенные силы $\varepsilon = AR$

Здесь R вектор-столбец сил, действующих в местах контакта колес и рельсов и координат точек контакта x_i, $R = \left[R_{x1}, R_{y1}, R_{z1}, R_{x2}, R_{y2}, R_{z2}, x_1, x_2 \right]^T$. Также как и в предыдущей модели, при восстановлении сил по измеренным деформациям возникает «псевдорешение».

$$R = C\varepsilon, \text{ где } C = \left(A^T A \right)^{-1} A^T. \quad (4)$$

На этой модели проведено исследование влияния координат точек контакта на измеряемые деформации и коэффициенты матриц A и C при фиксированных значениях контактных сил, но разных их комбинаций.

Оказалось, что деформации меняются практически линейно, небольшие отклонения от линейного закона появляются при переходе на реборду (расстояние до центра пути 750-780мм).

При анализе элементов матрицы A для одного колеса выделяются 2 группы столбцов. Элементы столбцов 1-3 (они соответствуют силам) меняются практически линейно, при этом элементы столбца 1 меняются незначительно. Элементы столбца 4, соответствующие координатам точек контакта, меняются существенно нелинейно при приближении контакта к реборде, рисунок 8.

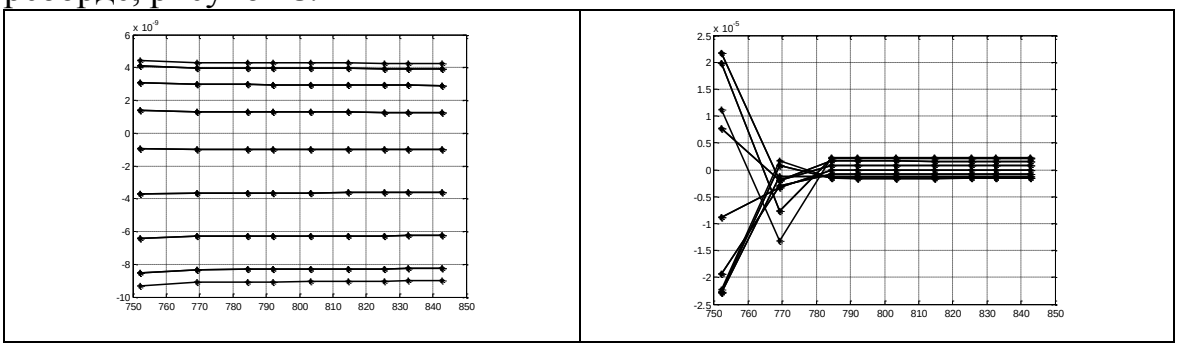


Рис. 8. Изменение элементов матрицы A при изменении координат точек контакта. Элементы столбца 1 и столбца 4. Расстояния относительно оси пути.

Алгоритм восстановления сил и координат

Алгоритм расчета сил и координат точек контакта состоит в следующем.

Имеются матрицы C, полученные для различных базовых вариантов расположения контакта (до 14 вариантов). Могут быть использованы как матрицы, полученные на численной модели, так и с использованием калибровочного стенда [3]. Имеется набор измерений деформаций для 32 тензометрических датчиков на колесе.

В первой модификации алгоритма восстанавливаются и силы и координаты точек контакта для всех имеющихся вариантов матриц C. Проводится анализ полученных координат, из всех вариантов выбирается

тот, где полученные координаты близки к базовым координатам контакта варианта. В таблице 1 приведен пример такого расчета.

В тесте силы со стороны рельса приложены в точках с координатами ±814.5 мм. Среди вариантов следует выбрать варианты 6 или 12 – полученные координаты близки к базовым. Значения восстановленных сил близки к заданным. В данном примере и два оставшихся варианта дают близкие значения координат и сравнительно небольшие ошибки для сил.

Таблица 1 Результаты восстановления сил и координат контакта.

Вариант точки		точное	На базе невязки	1	6	12	17
Базовые точки контакта, мм	x1 x2			842.8 -842.8	825.5 -825.5	803.2 -803.2	784.4 -784.4
Силы (реакции) 1.0e+005 Н	Rx1 Ry1 Rz1 Rx2 Ry2 Rz2	0.0000 0.0000 1.4500 0.0000 -0.0000 1.3500	0.0000 0.0000 1.4499 0.0000 0.0000 1.3499	-0.0005 0.0000 1.4538 0.0004 0.0000 1.3533	0.0000 0.0000 1.4505 0.0000 0.0000 1.3505	0.0000 0.0000 1.4501 0.0000 0.0000 1.3501	0.0001 0.0000 1.4494 0.0001 0.0000 1.3494
Точки контакта, мм	x1 x2	814.5 -814.5	814.6 -814.5	812.3 -814.3	813.7 -814.5	815.4 -814.5	816.8 -814.5
$\|A_k R_k - \varepsilon\|$.			1.6e-08	1.9e-06	2.4e-07	1.3e-07	8.6e-07

Во второй модификации алгоритма восстанавливаются только силы, используются матрицы C с исключенными строками, соответствующими координатам контакта. Для всех вариантов рассматривается норма невязки величины $\|A_k R_k - \varepsilon\|$ для каждого колеса, строится интерполяционный кубический сплайн [6], рисунок 9.

Координату точки минимума на сплайне будем считать оценкой координаты точки, в которой приложены силы на колесе. Далее строятся интерполяционные сплайны для всех коэффициентов матрицы C, строится матрица для полученной точки контакта и она используется для восстановления сил и координат. Пример результатов приведен в таблице 1 в столбце 4.

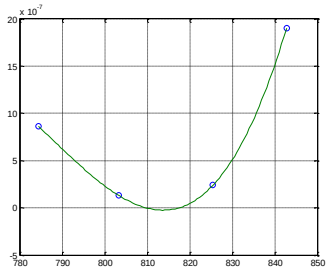


Рис. 9. Интерполяционный сплайн для невязки $\|A_{1k} R_{1k} - \varepsilon_1\|$.

Проверка метода на первой модели. Случай однозонного контакта

Алгоритмы были проверены в серии численных экспериментов. Моделью служит первоначальная модель колесной пары на рельсах. Для

проверки алгоритма в модель вносится принудительное смещение одного из рельсов для смещения контактной зоны. Точка контакта в численной модели определяется из условия для момента $M_y = 0$.

При относительно небольших смещениях рельса контакт остается однозонным. Обе модификации алгоритма дают близкие результаты с малыми ошибками определения координат до 2мм.

Проверка метода на первой модели. Случай двухзонного контакта

При смещении рельса на 10мм возникает двухзонный контакт. Типичное распределение узловых сил в области контакта приведено на рисунке. В этом примере имеется две контактные площадки с координатами 754мм (на реборде) и 785мм. Вторая модификация алгоритма дает хорошие оценки контактных сил и координату контакта 782мм.

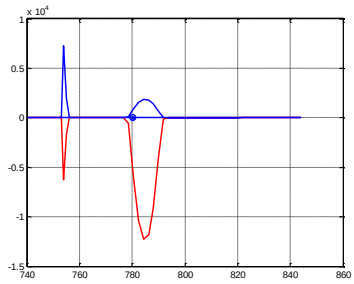


Рис. 10 Распределение узловых сил. Синий цвет - боковых, красный-вертикальных

Анализ проведенных тестов показал, что в случае двухзонных контактов, алгоритм дает параметры некоторого эквивалентного однозонного контакта: хорошую оценку суммарных сил, и координату эквивалентной контактной точки.

Можно привести следующую балочную аналогию. Рассмотрим плоскую задачу с двумя балками, конфигурация которых повторяет сечение колеса в месте соединения диска и обода, рисунок 12.

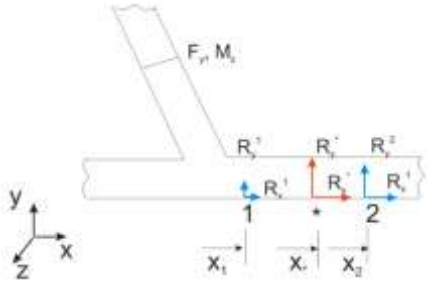


Рис. 12 Балочная аналогия для связи однозонного и двухзонного контактов

В точках 1 и 2 действуют контактные силы. В сечении наклонной балки измеряются продольные деформации, которые определяются силами и изгибающим моментом в сечении.

Для того, чтобы пару контактных точек 1 и 2 можно было заменить одной (*), должны быть равны соответствующие силы и момент в сечении. Наконец, если потребовать произвольность сечения, то можно для координаты новой точки получить соотношение

$$x^* = \frac{R_y^1 x_1 + R_y^2 x_2}{R_y^1 + R_y^2} \tag{5}$$

В рассмотренном выше примере получено значение 782.7мм, что близко к расчетному.

Заключение

Рассмотрен алгоритм определения координат точек контакта колеса и рельса. Проведенные численные тесты показали, что с его помощью можно получить координаты с погрешностью порядка 2мм в случае однозонного контакта. Для случая двухзонного контакта возможно получение координаты точки эквивалентного однозонного контакта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев К.В., Исполов Ю.Г., Орлова А.М., Определение сил, возникающих при контакте колесной пары с рельсами // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2013. – № 4-1(183) – С. 262-270.
2. Елисеев К.В. Современные методы определения сил в контакте колесной пары и рельсов // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 867 – 876.
3. Елисеев К., Мигров А., Орлова А., Стенд градуировки измерительных колесных пар // Transport Problems 2012: Материалы конференции, Silesian University of Technology Faculty of Transport – 2012.– С. 474-479
4. Shevtsov I.Y. Wheel/Rail Interface Optimization. Delft University of Technology, The Netherlands 2008
5. Ronasi H., Nielsen J. Inverse identification of wheel–rail contact forces based on observation of wheel disc strains: an evaluation of three numerical algorithms // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility – 2013.– Vol. 51, No. 1 – P. 74–90
6. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций М.: Наука, 1980
7. Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. перев. с англ. М.: Наука, 1977
8. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика Теория упругости 4-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 248 с. (т. VII)
9. ANSYS Release 13 user guide, 2010.
10. ГОСТ 10791-2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия М.: Стандартинформ, 2011

K.V.Eliseev

Wheelset and railway. Contact points coordinates determining

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Systems that contain instrumented wheelsets and algorithms of measurements evaluations are used to obtain parameters of contact between wheels and railway while car is moving. The new method of evaluations of contact points coordinates based on measured strains is presented.
Key words: Structural mechanics, strain measurement, inverse problem, simulation, contact forces, contact coordinates, railway technology

REFERENCES

[1] Eliseev K. V., Ispolov I. G., Orlova A. M. Contact forces between wheelset and rails determining// St. Petersburg State Polytechnical University Journal -2013. Vol. 4-1(183). Pp. 262-270. (rus)
[2] Eliseev K. V. Modern methods of contact forces between wheelset and rails determining // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 20-21, 2013
[3] Eliseev K., Migrov A., Orlova A. Design of test-rig for the calibration of instrumented wheelsets (rus) // Transport Problems 2012, Silesian University of Technology Faculty of Transport – 2012.– p. 474-479 (rus)
[4] I.Y. Shevtsov Wheel/Rail Interface Optimisation. Delft University of Technology, The Netherlands 2008
[5] Ronasi H., Nielsen J. Inverse identification of wheel–rail contact forces based on observation of wheel disc strains: an evaluation of three numerical algorithms // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility 2013. Vol. 51, No. 1 Pp. 74–90
[6] Zavialov J.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. Spline functions methods Moscow. Science, 1980. (rus)
[7] Albert A. Regression and the Moor-Penrose pseudoinverse. Academic press, 1972
[8] Landau L., Lifshitz E. Theoretical Physics. Theory of elasticity. Moscow. Science, 1987. (rus).
[9] ANSYS Release 13 user guide, 2010.
[10] GOST 10791-2011 Solid-rolled wheels. Technical requirements. Moscow. Standardinform, 2011. (rus).

УДК: 621.0:519.873; DOI 10.1872/MMF-2016-74

М.В. Заморёнов[1], М.Ю.Ларин[2], В.Я. Копп[3]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПУТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОБСЛУЖИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО – НАКОПИТЕЛЬ».

[1]Заморёнов Михаил Вадимович**,** к.т.н., доцент
Севастопольский государственный университет
Россия, г. Севастополь
E-mail: zamoryonoff@gmail.com.

[2]Ларин Михаил Юрьевич**,** младший научный сотрудник
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, г. Санкт-Петербург
E-mail: lay9991@mail.ru.

[3]Копп Вадим Яковлевич**,** д.т.н., профессор
Севастопольский государственный университет
Россия, г. Севастополь
E-mail: v_kopp@mail.ru.

Аннотация

В статье представлен метод путей. Приводится пример моделирования системы «обслуживающее устройство – накопитель» методом путей. Доказывается его правильность, путем сравнения результатов моделирования системы «обслуживающее устройство – накопитель» методом путей и методом, основанном на решении уравнений марковского восстановления.

Ключевые слова: полумарковская система, метод путей, повторные попадания, функция распределения, время пребывания.

В настоящее время аппарат полумарковских систем (ПМ) является мощным средством моделирования стохастических объектов [1-6], позволяющим учесть последействие в случайных процессах. Однако, при необходимости определения функций распределения (ФР) системы получить точное решение не удается, так как для решения этой задачи используются уравнения марковского восстановления (УМВ), представляющие собой систему уравнений Вольтера второго рода с полустохастическим ядром [1, 2]. Эти уравнения решаются, как правило, методом последовательных приближений [7, 8], а получить их точное решение крайне затруднительно. Поэтому практически не разработан аппарат точного определения ФР времени пребывания системы в подмножестве состояний.

Отметим, что термин «путь» в названии метода заимствован из теории графов [9, 10, 11].

Рассмотрим использование метода путей для моделирования широко распространенной в автоматизированном производстве структуры «обслуживающее устройство – накопитель» [6, 12, 13, 14]. В данной статье приводится ПМ модель такой системы, построенная с использованием УМВ.

Целью статьи является получение точного решения для ФР времени пребывания системы в заданном подмножестве состояний (например, в подмножестве работоспособных состояний).

В основе модели лежит случайный процесс с непрерывными состояниями и непрерывным временем, который, в дальнейшем, преобразуется в случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем на основании алгоритма фазового укрупнения [2].

Метод путей состоит из следующих этапов:

Этап 1. Определяются ФР времен пребывания в состояниях, вероятности переходов и стационарное распределение ВЦМ для полумарковской системы с непрерывными состояниями.

Этап 2. Переход от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями $S_i \in M_+$. При этом определяются ФР F_i времен пребывания системы в новых дискретных состояниях, вероятности перехода P_{ij} из этих состояний в другие состояния (переходные вероятности) удельные частоты ρ_i попадания в состояния (стационарное распределение ВЦМ) и стационарные вероятности пребывания в состояниях (стационарное распределение ПМ процесса). Процедура проводится известными методами моделирования ПМ систем.

Этап 3. Выделение всех возможных путей перехода системы из подмножества M_+ в подмножество M_- (или наоборот). Причем, каждое состояние системы входит в один или несколько путей сразу.

Этап 4. На основании формулы полной вероятности [15] и вероятностей переходов ВЦМ определяются ФР времен пребывания системы в каждом из путей, а также вероятности P_k^T каждого из путей.

Этап 5. Находим ФР времени пребывания в M_+ вне зависимости от начального состояния, которая определяется, как взвешенная сумма (смесь) ФР каждого из путей. Коэффициентами смеси служат найденные на предыдущем этапе вероятности P_k^T реализации путей.

Рассмотрим эту структуру (рис. 1) с учетом отказов обслуживающего устройства (ОУ) и накопителя (Н).

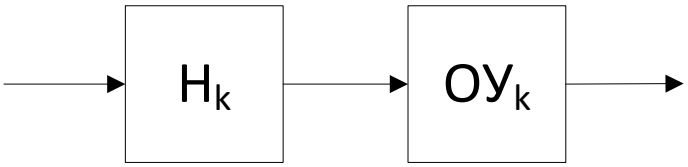


Рис. 1 – Структура Н-ОУ, работающая на прием продукции

Пусть известны ФР $F_{01}(t)$ и $F_{10}(t)$ случайных величин ξ_1 и η_1, которыми являются время наработки на отказ и восстановления ОУ соответственно, а также ФР $F_{03}(t)$ и $F_{30}(t)$ случайных величин ξ_3 и η_3, являющихся временами наработки на отказ и восстановления накопителя. Кроме этого, известна ФР $F_{12}(t)$ случайной величины, ξ_2 являющейся временем резерва. Введены допущения: вероятностью одновременного отказа ОУ и Н пренебрегаем ввиду малой вероятности этого события; ФР $F_{01}(t)$ и $F_{03}(t)$ считаются распределенными экспоненциально. Правомерность последнего допущения обоснована в [13]. Необходимо определить ФР времен наработки на отказ и восстановления участка в целом, то есть эквивалентно заменить его простейшим элементом, имеющим два факторных состояния.

Граф состояний системы представлен на рис. 2.

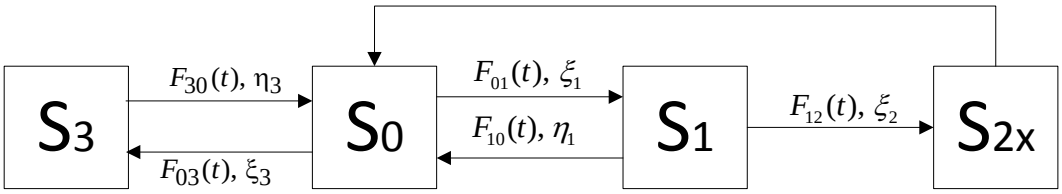


Рис. 2 – исходный граф состояний системы

Состояния системы.

S_0 – ОУ исправна, накопитель исправен, временной задел в накопителе ξ_2, состояние работоспособное;

S_1 – ОУ отказала, накопитель исправен, временной задел в накопителе ξ_2, состояние работоспособное;

S_{2x} – ОУ в отказе, накопитель исправен, резерв времени израсходован, поскольку запас продукции в накопителе исчерпан ($\xi_2=0$), состояние не работоспособное;

S_3 – ОУ исправна, накопитель отказал, состояние не работоспособное.

Времена пребывания в состояниях S_0, S_1, S_{2x} и S_3 определим из выражений:

$$\theta_0 = (\xi_1 \wedge \xi_3);\ \theta_1 = (\eta_1 \wedge \xi_2);\ \theta_{2x} = x;\ \theta_3 = \eta_2,$$

где $\wedge$ – знак, обозначающий минимум случайных величин.

Тогда ФР времен пребывания в состояниях имеют вид:

- для состояния S_0: $\overline{F}_0(t) = \overline{F}_{01}(t) \cdot \overline{F}_{03}(t)$
- для состояния S_1: $\overline{F}_1(t) = \overline{F}_{10}(t) \cdot \overline{F}_{12}(t)$
- для состояния S_{2x}: $F_{2x}(t) = 1_x(t)$, где $1_x(t) = \begin{cases} 0, t < x; \\ 1, t \geq x. \end{cases}$
- для состояния S3: $F_3(t) = F_{30}(t)$.

Стационарное распределение ВЦМ и вероятности перехода для дискретной системы, а также ФР времени пребывания системы в дискретном состоянии S_2 [12, 13]:

$$P_0^1\{\xi_1 < \xi_3\} = \int_0^\infty f_{01}(z)\overline{F}_{03}(z)dz;\ P_0^3\{\xi_1 > \xi_3\} = \int_0^\infty \overline{F}_{01}(t)\, f_{03}(t)dt;$$

$$P_1^0 = \int_0^\infty f_{10}(t)\overline{F}_{12}(t)dt;\ P_1^2 = \int_0^\infty \overline{F}_{10}(x)\, f_{12}(t)dt;\ P_2^0 = 1;\ P_3^0 = 1.$$

$$\begin{cases} \rho_0 = \dfrac{1}{2 + \int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty f_{12}(t)\overline{F}_{10}(t)dt}; \\ \rho_1 = \dfrac{\int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz}{2 + \int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty f_{12}(t)\overline{F}_{10}(t)dt}; \\ \rho_2 = \dfrac{\int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty f_{12}(t)\overline{F}_{10}(t)dt}{2 + \int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty f_{12}(t)\overline{F}_{10}(t)dt}; \\ \rho_3 = \dfrac{\int_0^\infty \overline{F}_{01}(z)\, f_{03}(z)dz}{2 + \int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty f_{12}(t)\overline{F}_{10}(t)dt}. \end{cases}$$

$$F_2(t) = 1 - \frac{\int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty \overline{F}_{10}(t+y)\, f_{12}(y)dy}{\int_0^\infty F_{01}(z)\, f_{03}(z)dz \int_0^\infty \overline{F}_{10}(y)\, f_{12}(y)dy}.$$

Граф такой системы имеет вид (рис. 3):

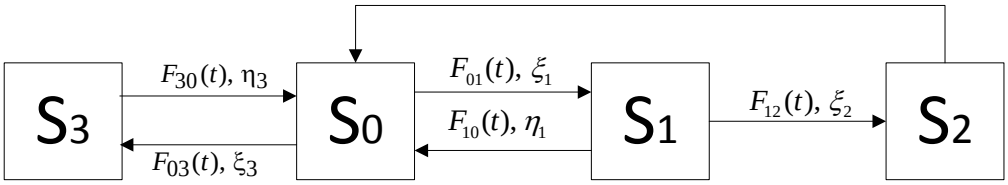


Рис. 3 – граф состояний дискретной системы

Выделим все возможные пути перехода системы из множества M_+ в подмножество M_-.

$$W_0 = \{S_0\},\ W_1^2 = \{S_0S_1\},\ W_1^3 = \{S_0S_1S_0\},\ W_2^2 = \{S_0S_1S_0S_1\},\ W_2^3 = \{S_0S_1S_0S_1S_0\}...$$

Остальные пути образовываются при повторном попадании системы в состояния S_1 и S_0.

Введем гипотезы реализации каждого из путей:

H_0 – при попадании в подмножество M_+ система не попадает в состояние S_1;

H_1^2 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 один раз и выходит в S_2.

H_1^3 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 один раз и выходит в S_3.

H_2^2 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 два раза и выходит в S_2.

H_2^3 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 два раза и выходит в S_3.

H_3^2 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 три раза и выходит в S_2.

H_3^3 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 три раза и выходит в S_3.

H_k^2 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 k раз и выходит в S_2.

H_k^3 – при попадании в подмножество M_+ система попадает в состояние S_1 k раз и выходит в S_3.

Тогда вероятности реализации каждого из путей будут равны:

$$P(H_0) = P_{03};$$

$$P(H_1^2) = P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^0;\ P(H_1^3) = P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^0;$$

$$P(H_2^2) = P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^1;\ P(H_2^3) = P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^1;$$

$$P(H_3^2) = P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^2;\ P(H_3^3) = P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^2;$$

$$P(H_k^2) = P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^{k-1};\ P(H_k^3) = P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^{k-1}.$$

Нетрудно убедиться, что:

$$P(H_0)+\sum_{i=1}^{\infty}\left(P\left(H_i^2\right)+P\left(H_i^3\right)\right)=1.$$

Определим условные вероятности события A – «время пребывания системы во множестве состояний пути меньше t» для каждой гипотезы. Заметим, что время пребывания $\alpha_{\Sigma i}$ системы в каждой i-й траектории при n попаданиях в S_0 и m попаданиях в S_1 равно сумме n независимых случайных величин α_0 – времен пребывания в состоянии S_0 и m независимых случайных величин α_1 – времен пребывания в состоянии S_1, ФР $F_{\Sigma i}$ которой имеет вид:

$$F_{\Sigma i}=F_0(t)^{(*)n}*F_1(t)^{(*)m}.$$

Тогда

$$P(A|H_0)=F_0(t);$$
$$P\left(A|H_1^2\right)=F_1(t)*F_0(t);\ P\left(A|H_1^3\right)=F_1(t)*F_0(t)^{(*)2};$$
$$P\left(A|H_2^2\right)=F_1(t)^{(*)2}*F_0(t)^{(*)2};\ P\left(A|H_2^3\right)=F_1(t)^{(*)2}*F_0(t)^{(*)3};$$
$$P\left(A|H_3^2\right)=F_1(t)^{(*)3}*F_0(t)^{(*)3};\ P\left(A|H_3^3\right)=F_1(t)^{(*)3}*F_0(t)^{(*)4};$$
$$P\left(A|H_k^2\right)=F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k};\ P\left(A|H_k^3\right)=F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k+1}.$$

где * – знак операции свертки, *(k) – знак операции свертки k-го порядка.

Тогда функция распределения $F_{rez}(t)$ времени пребывания системы в подмножестве M_+ имеет вид:

$$F_{rez}(t)=P_{03}F_0(t)+P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^0F_1(t)*F_0(t)+P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^1F_1(t)^{(*)2}*F_0(t)^{(*)2}+$$
$$+P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^2F_1(t)^{(*)3}*F_0(t)^{(*)k3}+...+P_{01}P_{12}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k}....+$$
$$+P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^0F_1(t)*F_0(t)^2+P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^1F_1(t)^2*F_0(t)^3+$$
$$+P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^2F_1(t)^3*F_0(t)^4+...+P_{01}P_{10}P_{03}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k+1}...=$$
$$=P_{03}F_0(t)+P_{01}P_{12}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k}+P_{01}P_{10}P_{03}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(t)^{(*)k}*F_0(t)^{(*)k+1},$$

где * – знак операции свертки, *(k) – знак операции свертки k-го порядка.

На основании преобразований Лапласа переходим в комплексную область:

$$F_{rez}(s)=P_{03}F_0(s)+P_{01}P_{12}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(s)^kF_0(s)^k+P_{01}P_{10}P_{03}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(s)^kF_0(s)^{k+1}.$$

Выражения $P_{01}P_{12}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(s)^kF_0(s)^k$ и $P_{01}P_{10}P_{03}\sum_1^{\infty}(P_{01}P_{10})^{(k-1)}F_1(s)^kF_0(s)^{k+1}$ представляют собой сумму двух бесконечных сходящихся рядов, которые в пределе дают нам следующее выражение:

$$F_{rez}(s)=\frac{P_{01}P_{12}F_1(s)F_0(s)}{1-P_{01}P_{10}F_1(s)F_0(s)}+\frac{P_{03}F_0(s)}{1-P_{01}P_{10}F_1(s)F_0(s)}.$$

Искомую функцию распределения получаем, произведя переход из области изображений в область оригиналов.

Во всех случаях при других структурах, имеющих произвольное число состояний и переходов, ряды будут получаться сходящимися, представляющими собой геометрическую прогрессию, поэтому предложенный подход можно использовать в общем случае.

Рассмотрим пример моделирования такой системы приведенным методом путей и сравним результаты моделирования с классическим методом, основанным на решении УМВ [13].

Исходными данными для моделирования служат ФР $F_{01}(t)$, $F_{03}(t)$, $F_{10}(t)$, $F_{30}(t)$ и $F_{12}(t)$; они распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_{01}; λ_{03}; γ_1, γ_2; μ_1, μ_2; υ_1, υ_2 соответственно; причем

$$f_{01}(t)=\lambda_{01}e^{-\lambda_{01}t},$$

где $\lambda_{01} = 0{,}250$ ч$^{-1}$;

$$f_{03}(t)=\lambda_{03}e^{-\lambda_{03}t},$$

где $\lambda_{03} = 0{,}0625$ ч$^{-1}$;

$$f_{10}(t)=\frac{\mu_1\mu_2(e^{-\mu_1 t}-e^{-\mu_2 t})}{\mu_2-\mu_1},$$

где $\mu_1 = 6{,}66667$ ч$^{-1}$, $\mu_2 = 20{,}000$ ч$^{-1}$.

$$f_{30}(t)=\frac{\gamma_1\gamma_2(e^{-\gamma_1 t}-e^{-\gamma_2 t})}{\gamma_2-\gamma_1},$$

где $\gamma_1 = 2{,}66667$ ч$^{-1}$, $\gamma_2 = 8{,}000$ ч$^{-1}$.

$$f_{12}(t)=\frac{\upsilon_1\upsilon_2(e^{-\upsilon_1 t}-e^{-\upsilon_2 t})}{\upsilon_2-\upsilon_1},$$

где $\upsilon_1 = 1{,}1$ ч$^{-1}$, $\upsilon_2 = 10{,}9$ ч$^{-1}$.

Необходимо определить ФР F_Σ времени пребывания системы в подмножестве M_+ работоспособных состояний.

В работах [12, 13] приведено решение для ФР времени пребывания системы в подмножестве M_+, полученной на основании метода, использующего уравнения марковского восстановления:

$$\varphi_0(t)=\Phi(t)+\int_0^t h(t-x)\Phi(x)dx, \qquad (1)$$

где

$$h(x)=\sum_{n=1}^{\infty}[(f_{01}\overline{F}_{03})*(f_{10}\overline{F}_{12})]^{(*)n}(x); \qquad (2)$$

$*$ – знак операции свертки;

$$\Phi(t) = \int_0^t \overline{F}_{10}(y)\, f_{12}(y)dy \int_0^{t-y} f_{01}(x)\overline{F}_{03}(x)dx + \int_0^t \overline{F}_{01}(x)\, f_{03}(x)dx\,.$$

На рис. 4 приведены функция распределения, полученная в данной статье (кривая 1), а также ФР, полученные на основании известного метода, использующего интегральные уравнения марковского восстановления. Как видно из графика, в зависимости от количества членов ряда (кривые 2, 3, 4), эти решения стремятся к полученному методом путей точному решению.

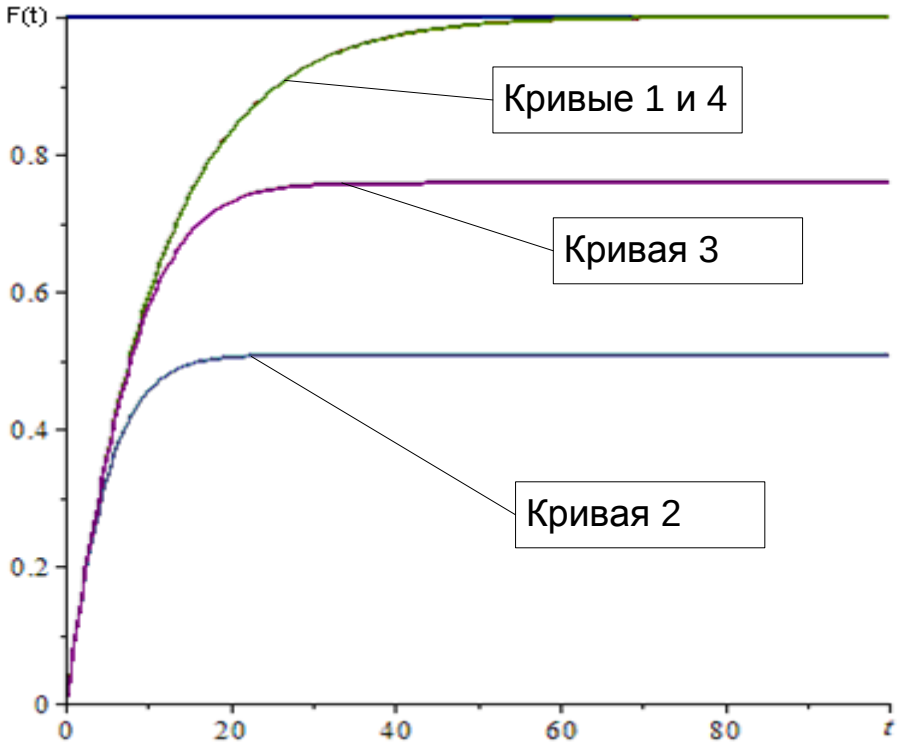


Рис. 4 - Вид функций распределения (кривая 1 – $F_{\Sigma}(t)$, кривая 2 – $\varphi_0(t)$ при 1-й свертке, кривая 3 – $\varphi_0(t)$ при 3-х свертках, кривая 4 – $\varphi_0(t)$ при 20 свертках)

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции и математического ожидания ФР, известной из литературы [12]:

Математическое ожидание и дисперсия полученной нами функции распределения составляют:

$$m_{\Sigma} = 11.217\ ч\,,\ \mathrm{d}_{\Sigma} = 124.618\ ч^2$$

тогда как определяемые с помощью выражения (1) при 20 итерациях в выражении (2):

$$m_{\varphi} = 11.168\ ч\,,\ \mathrm{d}_{\varphi} = 121.350\ ч^2\,.$$

Полученная относительная погрешность результатов составила по математическому ожиданию 0,4%, а по дисперсии – 2,6%, что показывает

правильность предложенного метода путей, предназначенного для определения ФР времени пребывания системы в подмножестве состояний. В дальнейших исследованиях планируется применение метода для моделирования систем контроля и технического обслуживания в информационных и производственных системах.

Исследования выполнены при финансовой поддержке министерства образования и науки российской федерации по базовой части государственного задания №2014/702 проект № 3858 и при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-01-05840.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наук. думка, 1982. 236 с.
2. Королюк В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наук. думка, 1989. 208 с.
3. Obzherin Yu.E., Boyko E.G. Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier, Academic Press, 2015. 214 p.
4. Peschansky A.I. Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.
5. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Моделирование автоматизированных линий. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. 240 с.
6. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. 284 с.
7. Михлин С.Г. Интегральные уравнения и их приложения к некоторым проблемам механики, математической физики и техники. М.: Гостехиздат, 1949. 380 с.
8. Забрейко П.П., Кошелев А.И., Красносельский М.А., Михлин С.Г., Раковщик Л.С., Стеценко В.Я. Интегральные уравнения. Изд-во «Наука», Гл. ред. физико-математической лит-ры, М.: 1968, 448 стр.
9. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 272 с.
10. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1988. – 480 с.: ил.
11. Евстигнеев В.А. Применение теории графов в программировании./ Под ред. А.П. Ершова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 352 с.
12. Копп В.Я., Карташов А.Л., Заморёнов М.В., Клюкин В.Ю.. Полумарковская модель структуры технологическая ячейка –

накопитель. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2016. № 1(237). С. 16 - 28.
13. Копп В.Я., Карташов А.Л., Заморенов М.В., Карташов Л.Е.. Использование нейронных сетей при анализе функионирования технической структуры с временным резервированием. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. Ч. 1 Тула: Изд-во ТулГУ, 2015, С. 67-80
14. Копп В.Я., Заморенов М.В., Обжерин Ю.Е., Филипович О.В. Методы моделирования полумарковских систем. Адаптивні системи автоматичного управління: Міжвідомчий науково-технічний збірник. Дніпропетровськ, 2015. Вип. №1(26). С. 208-221
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Учеб. для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.

M.V.Zamoryonov[1], M.Yu.Larin[2], V.Ya.Kopp[1]

USE OF THE ROUTES METHOD FOR MODELLING OF THE SYSTEM "SERVICE FACILITY - STORAGE DEVICE"

[1]Sevastopol State University
[2]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article presents the routes method. An example of modelling of the system "service facility - storage device" using the routes method is described. It is proved to be correct by comparing the modelling/simulation results of the system "service facility - storage device" by using the routes method and the method based on the Markov renewal equations solution.

Key words: semi-Markov system, routes method, repeated enterings, distribution function, stay period.

REFERENCES

[1] V.S. Korolyuk, A.F. Turbin, Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem [The Markov renewal processes in the system reliability problems], Kiev, Naukova Dumka, 1982.
[2] V.S. Korolyuk, Stokhasticheskiye modeli system [Stochastic models of systems], Ed. A.F. Turbin, Kiev, Naukova Dumka, 1989.
[3] Yu.E. Obzherin, E.G. Boyko, Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures, Elsevier, Academic press, USA, 2015.
[4] A.I. Peschansky, Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input, Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013.

[5] V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, A.I. Peschanskiy, Modelirovaniye avtomatizirovannykh liniy [Modeling of the automated lines], Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2006.
[6] V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin A.I. Peschanskiy, Stokhasticheskiye modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniyem [Stochastic models of automated manufacturing systems with time reservation], Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2000.
[7] S.G. Mikhlin, Integralnyye uravneniya i ikh prilozheniya k nekotorym problemam mekhaniki, matematicheskoy fiziki i tekhniki [The integral equations and their application to some problems of mechanics, mathematical physics and engineering], Moscow, Gostekhizdat, 1949.
[8] Zabreyko P.P., Koshelev A.I., Krasnoselskiy M.A., Mikhlin S.G., Rakovshchik L.S., Stetsenko V.Ya. Integral Equations. Publishing house "Nauka", Ch. Ed. of physico-mathematical literature, M.: 1968, 448 p.
[9] Yablonskiy S.V., Introduction to discrete mathematics. - M .: Nauka. Main edition of Physical and mathematical literature, 1979. 272 p.
[10] Kuznetsov O.P., Adelson-Velskiy G.M., Discrete mathematics for an engineer. - 2-nd ed., Revised and extended. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 480 p .: silt.
[11] Evstigneev V.A., Application of graph theory in programming. / Ed. Yershov A.P. - M .: Nauka. Main edition of Physical and Mathematical Literature, 1985. - 352 p.
[12] Kopp V.Ya., Kartashov A.L., Zamoryonov M.V., Klyukin V.Y. Semi-Markov model of structure technological cell - storage device. Scientific and technical statements of St.PbGPU. Physico-mathematical sciences. 2016. № 1 (237). Pp. 16 - 28.
[13] Kopp V.Ya., Kartashov A.L., Zamoryonov M.V., Kartashov L.E. The use of neural networks in the functional analysis of the technical structure with the temporary redundancy. Izvestiya TulSU. Technical sciences. Vol. 12: 2 pm, Part 1 Tula: Tula State Universityedition, 2015, pp. 67-80
[14] Kopp V.Ya., Zamoryonov M.V., Obzherin Yu.E., Filipovich O.V. Methods Semi-Markov systems modeling. Adaptive Systems of Automatic Control: Interdepartmental scientific and technical collection. Dnipropetrovsk, 2015. Vol. №1 (26). pp. 208-221
[15] E.S. Venttsel , Teoriya veroyatnostey [The theory of chances], 6-th ed. Moscow, Vysshaya shkola, 1999.

УДК 62-236.58; DOI 10.1872/MMF-2016-75

А. А. Лобачев

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА СИЛОВОЙ ВЕРХНИЙ ПРИВОД В СОСТАВЕ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

Александр Александрович Лобачев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: lobachev.pti@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены динамические нагрузки на силовой верхний привод буровой установки, рассмотрен процесс силообразования на породоразрушающем инструменте (ПРИ), зависимость параметров бурения от глубины. Необходимо провести апроксимацию импульса от одного оборота инструмента и в дальнейшем заменить периодическую компоненту типовой последовательностью импульсов или гармоникой.

Ключевые слова: силовой верхний привод, буровая установка, динамическая нагрузка, импульс, гармоника.

Вступление. Буровая установка для бурения глубоких скважин является сложным механизмом, который состоит из нескольких главных узлов, включающих в себя систему механизма подъема-опускания (СПО), привода ротора и насоса прокачки промывочной жидкости (НППЖ). Данные сборочные единицы взаимосвязаны друг с другом и вместе составляют систему, функции и основные параметры которой различаются.

За последнее время на рынке появилось несколько видов буровых установок для бурения глубоких скважин, которые представляют из себя компоновку основных конструктивных элементов и энергетических систем в новом исполнении. Основное отличие конструкторского нововведения — это смещение роторной части из статического положения на столе бурового мастера в конструкцию силового вертлюга. Новая машина получила название силового верхнего привода (СВП). На выходе был образован новый энергетический контур, включивший в себя привод буровой колонны (СВП) и ПРИ. Такой вид компоновки БУ кардинально поменял характер динамических процессов бурения, о чем свидетельствуют первые опыты применения БУ с СВП [6], [7], [10].

Разработка СВП изначально велась за рубежом для бурения на шельфе и на воде. После достижения определенного прогресса новую

технологию перенесли на сушу. С ее помощью процесс строительства наклонно-направленных скважин сильно упрощается.

Разработки СВП отечественного производства ведутся в АО «Промтехинвест» в том числе и совместно с ФГАОУ ВО «СПбПУ» (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0054). При этом выполняются исследовательские работы, связанные с оптимизацией конструкции и режимов работы системы верхнего привода.

Уровень используемой мощности привода СВП можно определить усредненными значениями и переменными составляющими сил сопротивления, возникающих на валу, которые зависят от величины и характера внешней нагрузки на рабочем органе [4], [5], [8], [12]. Реактивные силовые воздействия на привод СВП определяются условиями работы колонны и ПРИ. Кроме того, на них оказывают влияние режимы работы механизма СПО и НППЖ. К этим факторам влияния относятся также переменные по глубине свойства породы, инерционные массы буровой колонны и действующие на неё силы. В работе [1] рассмотрена модель внешней нагрузки на СВП, параметры которой устанавливаются на основе анализа физической сущности явлений, происходящих в процессе бурения. С одной стороны - это природа возникновения нагрузки на ПРИ. С другой – поведение самой колонны от воздействия на неё различных флуктуаций в процессе бурения. Суммируясь, эти нагрузки создают некоторую совокупность суммарного воздействия на привод СВП. Поэтому нагрузки на рабочем органе СВП удобно отображать случайной функцией времени, пути и скорости [3], [9], [11].

При исследовании динамики двигателя СВП, расчетную нагрузку следует определять в соответствие со следующей зависимостью: $\sum f_{2p} \approx \overline{P_l} \sin 2\pi \bar{t}$, где $\overline{P_l}$ принимают из графика зависимости низшей амплитуды от глубины бурения.

Таким образом, суммирование нагрузок на роторе приводит к получению некоторой средней и периодической, центрированной относительно неё нагрузки. Этой методикой можно воспользоваться при обработке экспериментальных данных.

При этом параметры периодически составляющей нагрузки изменяются с изменением глубины бурения. Поэтому для анализа нагрузок, связанных с изменением их характера по глубине, целесообразно выполнять по горизонтам (разделив глубину бурения на конечное число горизонтов по типу породы) обосновав приемлемую аппроксимацию одиночных импульсов. После чего заменить результирующую периодическую компоненту типовой последовательностью импульсов для удобства последующих динамических расчетов.

Для решения первой задачи ООО «Промтехинвест» совместно с Сургутнефтегеофизика трест ОАО «Сургутнефтегаз» выполнили записи

момента на роторе СВП по буровым: БУ4000/250ЭЧК БМ2 с СВЭП – 320 и БУ3900/225 ЭЧК БМ2 с ПВЭГ – 250.

Существо обработки сводилось к следующему. Разделив глубину бурения на конечное число горизонтов, каждый из которых соответствовал определенному типу породы по буримости. Далее, по каждому горизонту подбирались близкие по профилю импульсы нагрузок за один оборот ротора, усреднялись по количеству импульсов и ординаты наносились в относительных единицах на график, как показано на рис. 1.

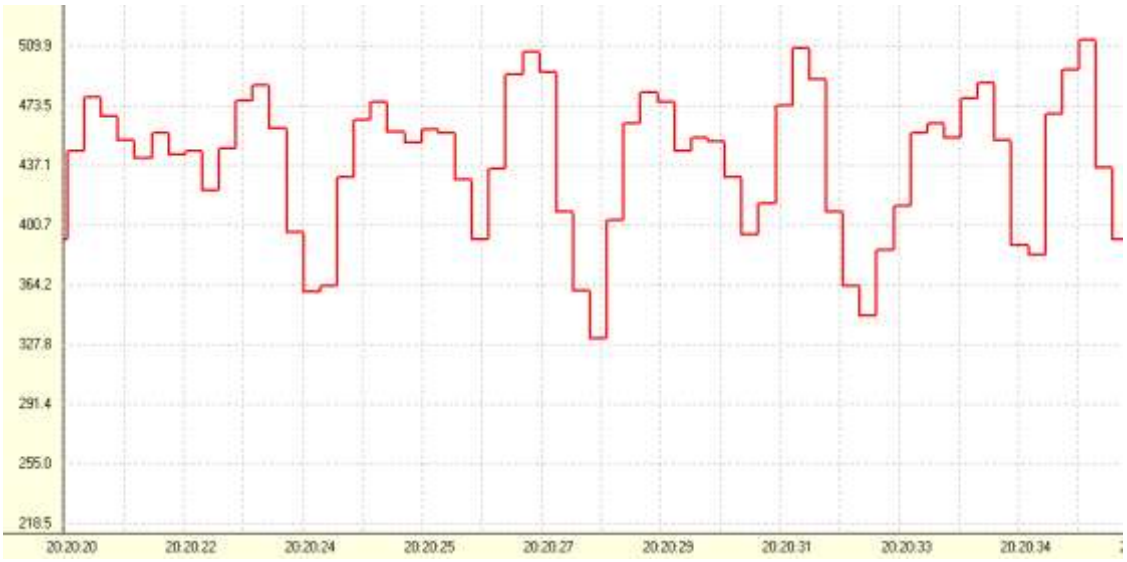


Рисунок 1 – Диаграмма процесса бурения

Там же представлены некоторые характерные аппроксимации импульсов с гладкой поверхностью кривых в виде синусоиды, сочленения двух парабол и др. Импульсы, имеющие гладкую поверхность в последующем анализе рассматриваются в виде аппроксимаций результатов эксперимента. Степень близости реального импульса и его гладкой аппроксимации можно оценить с помощью следующего критерия:

$$\lambda = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(P_k - P_k')^2, \quad (1)$$

Где P_k и P_k' - амплитуды первых N гармоник соответствующих гладкому и обобщенному по результатов эксперимента импульсам.

Для определения параметров этой аппроксимации (1) принимаются следующие условия: площади под экспериментальной кривой и её аппроксимацией равны между собой; длина основания импульса равна длине линейной или временной мере, точки сочленения по максимуму соответствуют их нулевым производным.

Проводится анализ экспериментальных данных СВП, полученных при нагружении привода.

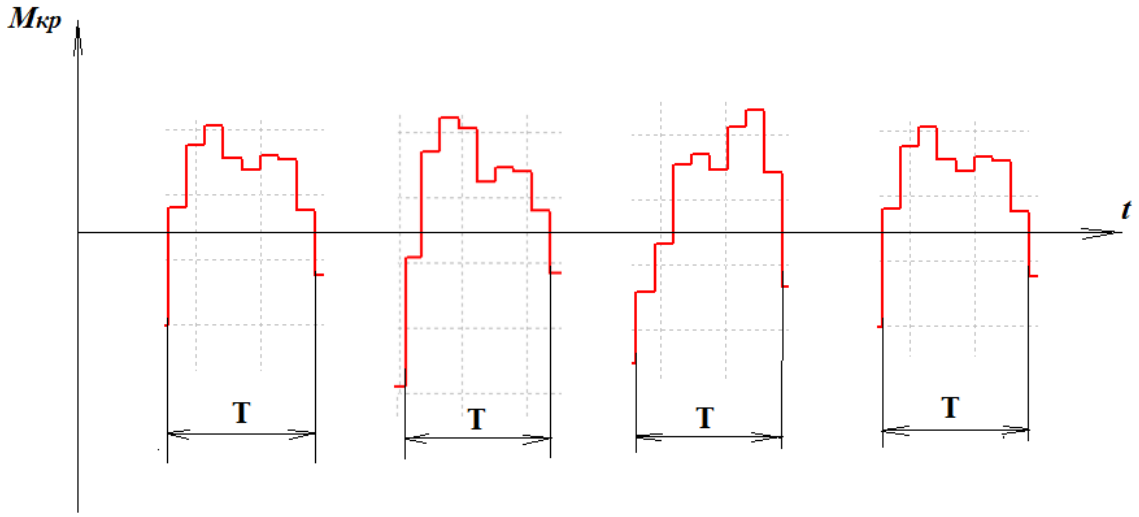


Рисунок 2 – Примеры кратковременных всплесков

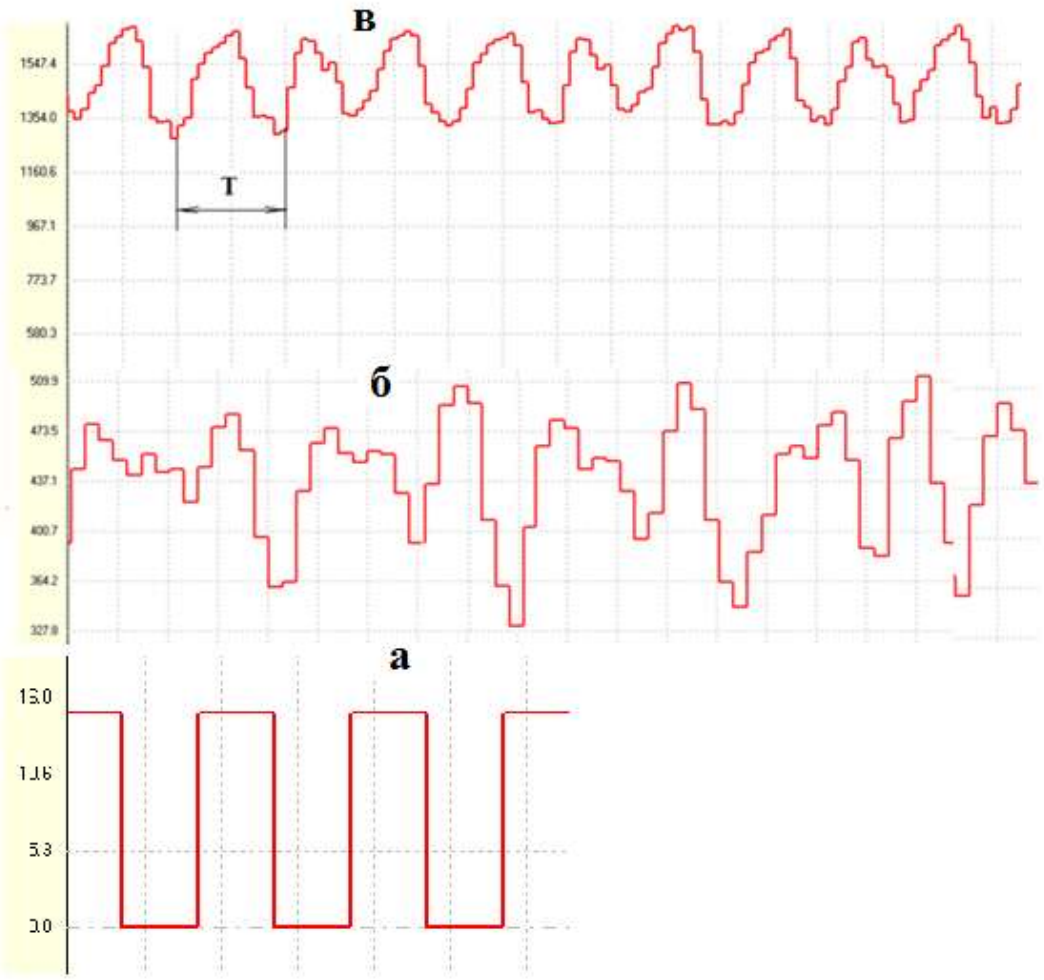
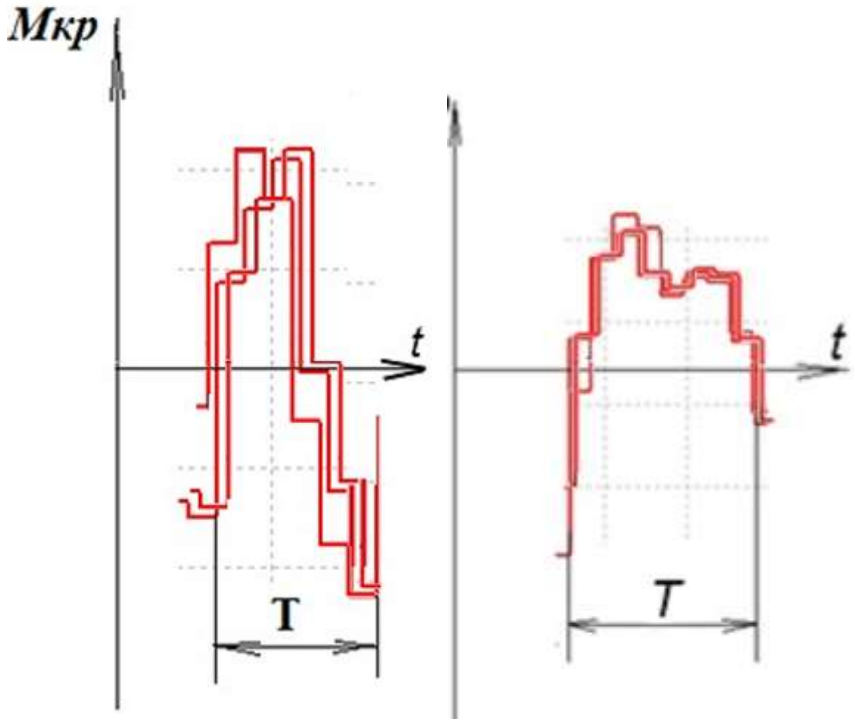
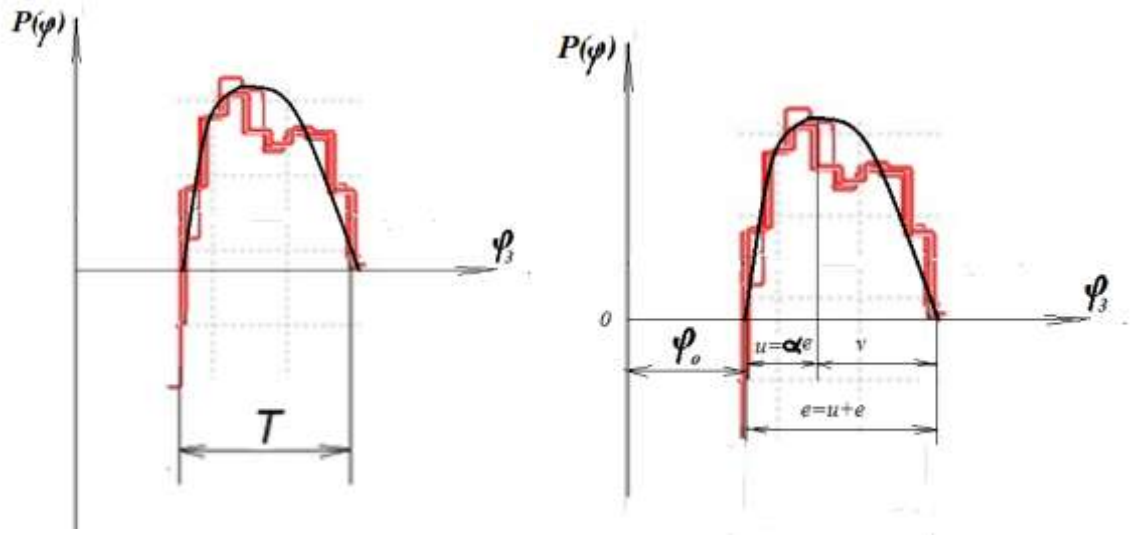


Рисунок 3 - Изменение характера колебаний момента на роторе по глубине бурения для СВП типа ПВЭГ – 250: а – начало бурения;
б – середина бурения; в – в конце бурения.



а б

Рисунок 5 – Наложенные друг на друга единичные флуктуации



а б

Рисунок 6 – Процесс перехода к гладкому типу импульса

Из рис.6 видно, что лучшее приближение к реальности имеет гладкий импульс, форма которого образуется сочленением двух парабол. Аналитически такой импульс описывается следующим образом:

$\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0 + u$ $\quad P(\varphi) = a\varphi^2 + b\varphi + c;$ (2.1)

$\varphi_0 + u \leq \varphi \leq \varphi_0 + l$ $\quad$ $P(\varphi) = a_1 \varphi^2 + b_1 \varphi + c_1;$ $\quad$ (2.2)

Для получения параметров аппроксимации описываемой выражениями (2.2) необходимо знать расположение точки сочленения двух парабол, характеризуемой коэффициентом v=u/l_3. Для этого значение параметра v варьировались, а степень близости реального импульса и его гладкой аппроксимации оценивалось выражением (2.1), что позволяет оценить долевое участие в общем балансе составляющих нагрузки, имеющих разную природу возникновения.

Структуру формирования нагрузки на рабочем органе СВП как показано на рис.1. Согласно этой структуре входное возмущение $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$, суммируясь с сигналом обратной связи $f_h(t)$ поступает на вход механической системы обладающей некоторыми передаточными свойствами W_{v1} и W_{v2}

Рисунок 7 - Общая структура формирования нагрузки на рабочем органе СВП.

Пройдя через эту систему, возмущение $f_\Sigma(t) = f(t) + f_h(t)$ преобразуется в выходные сигналы $\bar{v}_x(t)$ и $\bar{v}_p(t)$, которые в свою очередь проходят через структурный элемент с передаточными свойствами W_h, преобразуясь в выходной сигнал $f_h(t)$, поступающий на вход сумматора. Полагая усилие $f_\Sigma(t)$ искомым, структуру его формирования изобразим ка показано на рис. 7.

Для описания передаточной функции W_f этой структуры решим совместно систему алгебраических отображающих уравнений следующего вида:

$$F(S) = F_1(S) + F_2(S),$$

$$\bar{V}_p(S) = W_p(S)\, F_\Sigma(S),$$

$$\bar{V}_x(S) = W_x(S)\, F_\Sigma(S), \qquad (3)$$

$$F_\Sigma(S) = F(S) + F_h(S),$$

$$F_h(S) = F_f(S)[\bar{V}_p(S) - \bar{V}_x(S)].$$

В результате решения получим выражение передаточной функции W_f механической системы СВП как некоторого звена формирования нагрузки на рабочем органе:

$$W_{\sum}(S) = 1/1+ W_f(S)[W_p(S) – W_x(S)] \quad (4)$$

В соответствие с видом зависимостей (3), (4) имеем:

$$F_{\sum}(S) = F_{\sum 1}(S) + F_{\sum 2}(S), \quad (5)$$

где $F_{\sum 1}(S) = W_{\sum}(S)\, F_1(S)$ и $F_{\sum 2}(S) = W_{\sum}(S)\, F_2(S)$.

Теперь для описания расчетной нагрузки и определения параметров её модели необходимо сначала найти выражения внешних возмущений $\sum f_1$ и $\sum f_2$, а затем – передаточные функции $W_{\sum}(S)$, $W_p(S)$, $W_x(S)$, $W_h(h)$, характеризующих передаточные свойства механической системы СВП. При этом $W_p(S)$ – передаточная функция ветви привода рабочего органа как звена формирования скорости резания $\bar{V}_p$ породы инструментом; $W_x(S)$ – то же привода механизма подачи (СПО) при формировании скорости подачи - $\bar{V}_x$; W_f –передаточная функция рабочего органа как звена формирования дополнительного усилия на рабочем органе из-за колебаний толщины стружки.

Выражение (4) можно упростить без ощутимого ущерба, если принять $W_{\sum}(S) = 1$. Это упрощение возможно при условии $W_p(S) \cong W_x(S)$. Однако, если $W_p(S) > W_x(S)$, то $| W_{\sum}(S) | < 1$ и принятие такого упрощающего допущения, как $W_{\sum}(S) = 1$ идет в запас расчета. В этом случае механическая система СВП может исследоваться и рассчитываться на основе разомкнутой модели.

Условие $W_p(S) > W_x(S)$, следует положить в основу параметрического и структурного синтеза ветвей динамической системы БУ.

Перейдем к анализу существующих представлений, касающихся возмущений $\sum f_1$ и $\sum f_2$. Многочисленными исследованиями процессов резания грунтов, горных пород различными машинами установлена целесообразность представления грунтового массива как некоторого пространства корреляции.

В пределах этого пространства любая случайная функция, представляющая реализацию процесса изменения прочности грунта, породы, в целом зависит от неслучайного параметра – координат точек пространства, образуя так называемое случайное однородное поле.

Заключение. Рассматривая процесс силообразования на ПРИ можно допустить, что за один оборот инструмента суммирование всех флуктуаций на рабочем органе приводит к получению на приводе ротора некоторой средней и периодической центрированной относительно неё нагрузки. При этом параметры периодически составляющей нагрузки изменяются при изменении глубины бурения. Поэтому вытекают два

взаимозависимых вывода. Первый – для дальнейшего расчета необходимо определить апроксимацию импульса одного оборота инструмента на заданном горизонте бурения. Затем для удобства выполнения последующих динамических расчетов периодическую компоненту следует заменить типовой последовательностью импульсов или гармоникой.

Для этого необходимо подвергнуть обработке результаты экспериментов (реального процесса бурения) на одном горизонте в пределах глубины 0< L<500 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ащеулов, А.В., Шестопалов, А.А. Особенности работы буровых установок с системой верхнего привода // ISSN 0023-1126. ХИМИЧЕСКОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ. № 2. стр. 2015. 14-17.
2. Ащеулов, А. В., Анализ динамической нагруженности силового верхнего привода буровых установок [Текст] / А. В. Ащеулов, А. А. Шестопалов, А. А. Лобачев // Химическое и нефтегазовое машиностроение : Москва, . – № 3/2016. – С. 12-15.
3. Абезгауз, В.Д. Режущие органы машин фрезерного типа для разработки горных пород и грунтов. – М. : Машиностроение, 1965. – 280 с
4. Алимов, О. Д. Механизм разрушения горных пород при вращательном бурении твердосплавным инструментом / О. Д. Алимов, Л.Т. Дворников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск : Наука, 1972. № 6. – С. 82-89.
5. Басарыгин, Ю. М. Бурение нефтяных и газовых скважин : учеб. для вузов / Ю. М Басарыгин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 632 с.
6. Башмур, К. А. Оптимальные параметры системы верхнего привода при бурении на обсадной колонне / К. А. Башмур, Э. А. Петровский : журн. Бурение & Нефть, 2014. – № 1. – С.38-40.
7. Башмур, К. А. Динамика системы верхнего привода буровой установки: журн. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – СПб. : изд-во Лань, 2013. – № 5. – С. 4-7.
8. Добронравов, С. С. Исследование взаимодействия рабочего органа роторного траншейного экскаватора с грунтом: дис. … на соис. ученой степени канд. техн. наук. – М., 1974. – 169 с.
9. Карнаухов, Н. Н. Приводы траншейных экскаваторов / Н. Н. Карнаухов, А. И. Тархов. – М. : Недра, 1999. – 381 с.
10. Миниханов, Р. Ф. Повышение эффективности буровой установки с верхним приводом . дис. … на соис. ученой степени. канд. техн. наук. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГГУ, 2008. – 158 с.

11. Файнзильбер, М. Л. Рациональное управление режимом нагрузки землеройных машин непрерывного действия как средство повышения производительности : дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1974. – 24 с.
12. Юртаев, В. Г. Динамика буровых установок. – М.: Недра, 1987.-155 с.

A.A. Lobachev

ANALYSIS OF DYNAMIC LOADS ON POWER TOP DRIVE AS A PART OF DRILLING RIG

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper discusses the dynamic loads on the Power top drive of the drilling rig, considered the power arising process of the rock cutting tools, the dependence between parameters and the drilling depth. It is necessary to carry out the approximation of the fluctuation from one instrument turnover and to replace the periodic component of a typical sequence of pulses or harmonic in the future.

Key words: Power top drive, drill rig, dynamic load, pulse, harmonic.

REFERENCES

[1] Asheulov, A.V., Shestopalov, A.A. Features of work of the rig with top drive // ISSN 0023-1126. CHEMICAL AND PETROLEUM ENGINEERING. № 2. Pp. 2015. 14-17.
[2] Asheulov, A.V., Analysis of dynamic loading of the power top drive of drilling rigs [Text] / A. V. Asheulov, A. A. Shestopalov, A. A. Lobachev // CHEMICAL AND PETROLEUM ENGINEERING. Moscow, № 3/2016. Pp. 12-15.
[3] Abezgauz, V.D. Cutting machine milling type bodies for the development of rock and soil. Moscow. Machine building, 1965. 280 p
[4] Alimov, O. D. The mechanism of destruction of rocks at rotary drilling with carbide tool / O. D. Alimov, L.T. Dvornikov // Physical and technical problems of mining operations. – Novosibirsk: Science, 1972. № 6. Pp. 82-89.
[5] Basarygin, U. M. Drilling of oil and gas wells: studing for higher education. U. M Basarygin, A. I. Bulatov, U. M. Proselkov – M. : Ltd « Nedra-Biznestsentr », 2002. 632 p.
[6] Bashmur, K. A. Optimal parameters of the top drive system for drilling with casing / K. A. Bashmur, E. A. Petrovsky: magazine Oil & Drilling, 2014. – № 1. Pp.38-40.

[7] Bashmur, K. A. Dynamics of top drive drilling rig system: magazine Equipment and technologies for oil and gas complex. – SPb. : publishing outfit Lan, 2013. № 5. Pp. 4-7.
[8] Dobronravov, S. S. Working body interaction studies of the rotary trencher ground: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 1974. – 169 p.
[9] Karnaukhov, N. N. The drives of a trencher / N. N. Karnaukhov, A. I. Tarhov. Moscow. Nedra, 1999. – 381 p.
[10] Minnikhanov, R. F. Improving the efficiency of the rig with a top drive . dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Ekaterinburg : Ural State Mining University, 2008. – 158 p.
[11] Fajnzylber, M. L. Rational management of the load mode continuous earth-moving machinery as a means of increasing productivity : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Leningrad. 1974. – 24 p.
[12] Yurtaev, V. G. Dynamics of the drill rig. Moscow. Nedra, 1987. 155 p.

УДК 621.874; DOI 10.1872/MMF-2016-76

К. П. Манжула[1], А.В.Наумов[2]

ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ СТЕНОК КОРОБЧАТЫХ БАЛОК НА МЕСТНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

[1]Константин Павлович Манжула, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: conpaman@gmail.com.

[2]Александр Владимирович Наумов, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: skisk8fmx@gmail.com

Аннотация

В работе проведен анализ по обеспечению местной устойчивости коробчатой балки с криволинейными стенками. Определено, что критическая сила местной устойчивости у балки с криволинейными стенками выше, чем у обычной. Значение критической силы растет с увеличение радиуса кривизны стенки.

Ключевые слова: коробчатая балка с прямолинейными стенками, коробчатая балка с криволинейными стенками, местная устойчивость, метод конечных элементов.

На данный момент самым частым решением для ездовых балок большинства мостовых конструкций, кранов пролетного типа являются коробчатые балки с прямолинейными стенками. Элементы таких балок являются технологичными по условиям изготовления и сборки, осуществляемой, как правило, при помощи сварки. Обычно пояса балок делают толще стенок [1] из условия оптимизации по массе. При больших пролетах определяющим критерием обеспечения несущей способности становится не прочность $\sigma \le [\sigma]$, а жесткость $f/L \le [f/L]$, что заставляет увеличивать высоту сечения балки при относительно невысоких номинальных напряжениях. Высокие стенки часто не обеспечивают местную устойчивость в сжатой зоне. Поэтому их разделяют продольными (цифра 3 на рис. 1) и поперечными ребрами, а также диафрагмами (цифра 4 на рис. 1). Это мало увеличивает массу, но более

значительно увеличивает трудоемкость и себестоимость изготовления балок, а также при тяжелых режимах циклического нагружения снижает их сопротивление усталости. Последнее обстоятельство требует принятия конструктивно-технологических мер повышения выносливости или снижения номинальных напряжений в сечении увеличением толщины стенки [2].

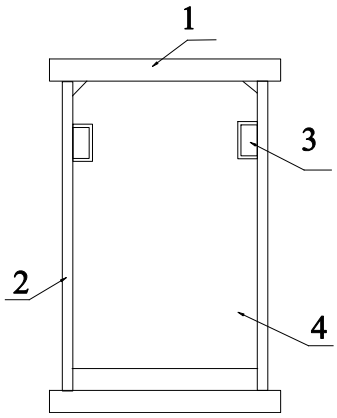


Рис. 1. Балка коробчатого сечения: 1 – пояс, 2 – стенка, 3 – поперечное ребро, 4 – диафрагма.

Одним из способов сокращения количества дополнительных элементов в коробчатых балках является использование криволинейных или многогранных стенок [3]. Такое конструкторское решение позволяет сократить количество диафрагм и продольных ребер, вводимых для обеспечения местной устойчивости. Данный способ не является новым, но в настоящее время он также не является широко распространенным по причине не проработанности технологии изготовления и отсутствия методов расчета местной устойчивости стенок. Известен ряд патентов [4, 5, 6], полученных на балки с криволинейными стенками (Рис. 2).

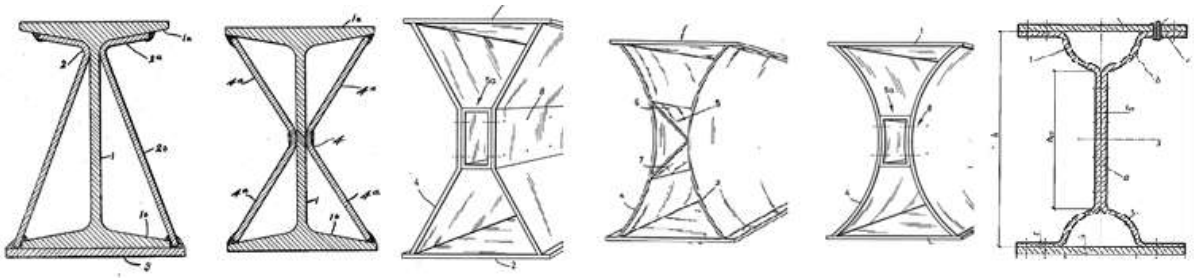


Рис. 2 Типы балок с криволинейными стенками

Балки с криволинейными стенками, так же как и обычные коробчатые балки, рассчитываются на местную устойчивость по трем расчетным схемам в зависимости от места приложения нагрузки: нагрузка по центру балки, нагрузка на концах балки, нагрузка на расстоянии ¼ длинны балки.

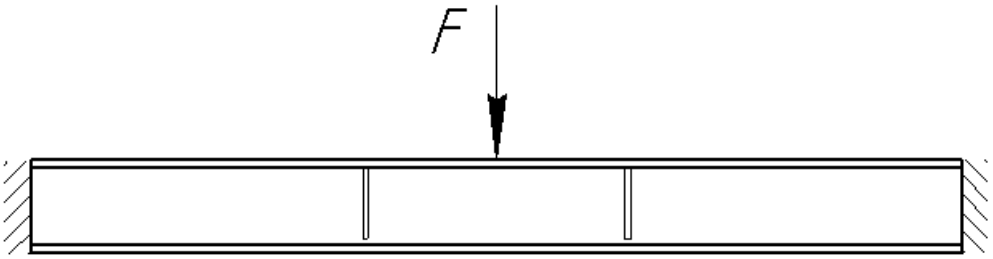


Рис. 3. Расчетная схема балки на местную устойчивость

В настоящей работе был проведен анализ устойчивости стенок балки при приложении нагрузки по центру (Рис. 3). Центральная пластина испытывает сжатие в верхней части от поперечного изгиба. Касательные напряжения малы, поэтому ими можно пренебречь.

Условие устойчивости пластины по напряжениям у верхнего пояса имеет вид $\sigma_{сж} \le \sigma_{кр}/n = [\sigma_{кр}]$, где $\sigma_{сж}$ - максимальное сжимающее напряжение в пластине, $\sigma_{кр}$ - критическое напряжение устойчивости, n – коэффициент запаса устойчивости. Критическое напряжение находится по формуле $\sigma_{кр} = k_s K_{so}(t/d)^2$, где k_s - коэффициент устойчивости, отражающий влияние условий закрепления и распределения напряжений по ширине пластины, K_{so} - коэффициент, имеющий размерность МПа, t – толщина пластины, d – высота пластины. Длина пластины учитывается при определении k_s [7].

Данные зависимости не применимы для балок с криволинейными стенками, так как в них не учитывается кривизна стенок. Оценка местной устойчивости стенок балок производилась в среде ANSYS Workbench [8]. Для этого была разработаны модели балок с прямолинейными и криволинейными стенками. Обе модели балок имели длину L=15м, расстояние между центральными диафрагмами – 3м. Сравнение поперечных сечений приведено в Таблица 1.

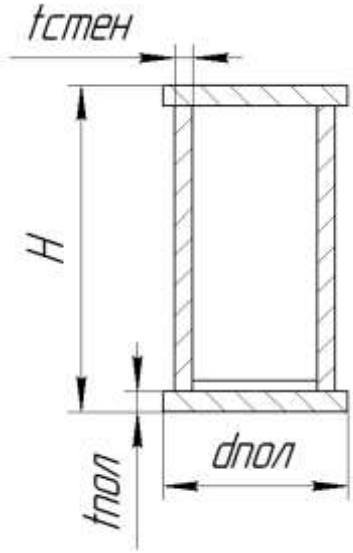
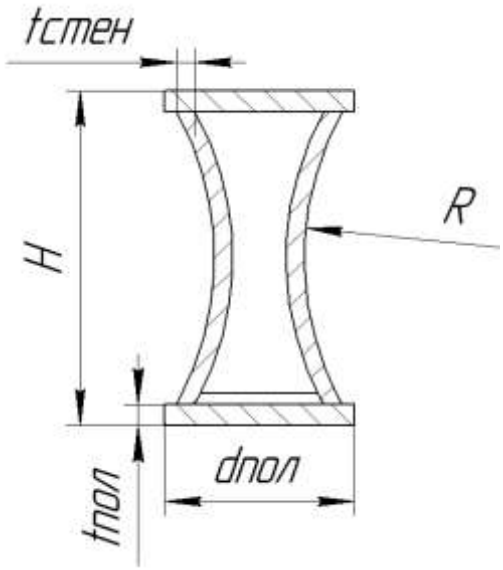
Разработанные модели балок закреплялись заделками по торцам. Нагружаемая сила была приложена по центру балки. Минимальный радиус R<1800мм криволинейной стенки выбирался из условия обеспечения не соприкосновения или пересечение стенок, что не может быть осуществлено на реальной конструкции. В качестве входного параметра выбирался радиус кривизны стенки, а выходным параметром являлась критическая сила [9].

После создания сетки элементов, минимальный размер которых составил 220 мм, были произведены расчеты на местную устойчивость. Для балки с криволинейными стенками (Рис. 4, а) значение критической силы составляет 620 кН, при радиусе кривизны 15000 мм. Потеря устойчивости, как и планировалось, происходит по центральной пластине

между двумя диафрагмами (рис.3). Значение критической силы для балки с прямолинейными стенками составило 356 кН (Рис. 4, б).

Таблица 1

Схемы сечений моделей балок

Балка с прямолинейными стенками	Балка с криволинейными стенками
	
H = 1536 мм $t_{пол}$ = 18 мм $t_{стен}$ = 6 мм $d_{пол}$ = 1000 $R_{кр}$ = ∞	H = 1536 мм $t_{пол}$ = 18 мм $t_{стен}$ = 6 мм $d_{пол}$ = 1000 $R_{кр}$ = 15000 мм...1800 мм

По полученным изолиниям определяется место потери устойчивости стенки стандартной балки. Оно находится под точкой приложения силы. В балке с криволинейными стенками место потери устойчивости сдвинуто к верхнему поясу, что характерно для балок с прямолинейными стенками, но укрепленных продольным ребром.

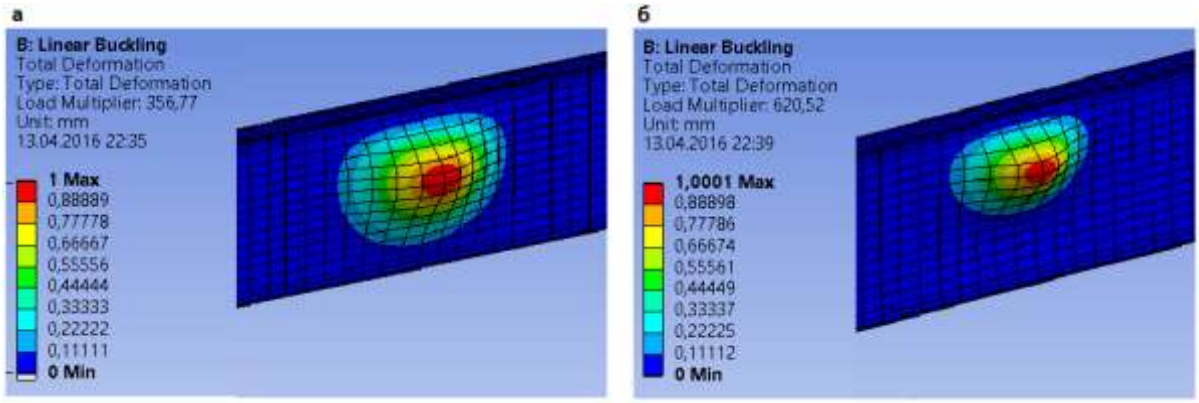


Рис. 4 эпюры перемещений при потере местной устойчивости: а – балка с прямолинейными стенками, б – балка с криволинейными стенками

Для оценки влияния радиуса кривизны стенки на значение критической нагрузки при расчете на местную устойчивость было произведено 40 расчетов балки с криволинейными стенками. В расчетных моделях радиус кривизны R изменялся с одинаковым шагом от значения 15000 мм до 1800 мм. По полученным значениям критической силы был построен график зависимости критической силы $F_{кр}$ от отношения длины центральной пластины к радиусу кривизны $L_{пл}/R$ (Рис. 5).

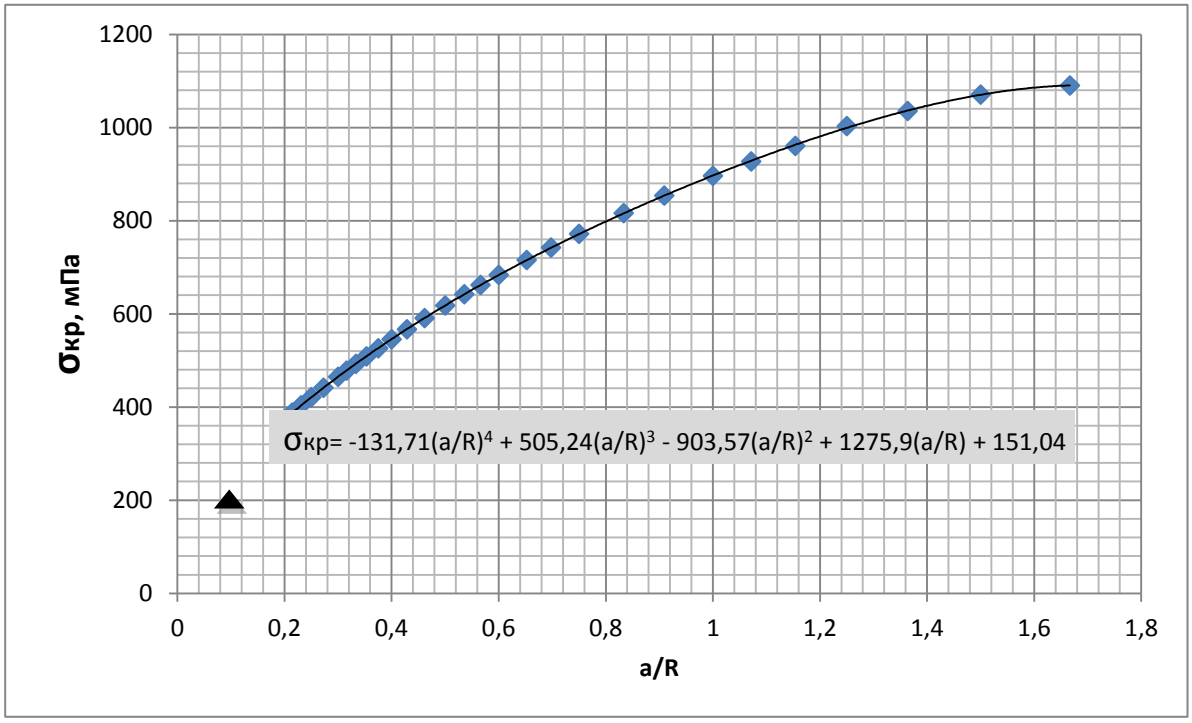


Рис. 5. График зависимости σкр=f(a/R) при H = 1536 мм, $t_{пол}$ = 18 мм, $t_{стен}$ = 6 мм, $d_{пол}$ = 1000 мм

При увеличении радиуса кривизны криволинейной балки значение критической силы потери местной устойчивости нелинейно растет. Даже при небольшой кривизне стенок местная устойчивость возрастает примерно в 2 раза по сравнению с балкой с прямолинейными стенками (точка на графике).

Была произведена аппроксимация полученной зависимости полином 4 степени. Она описывается следующим уравнением:

$$\sigma_{кр} = -131{,}71(a/R)^4 + 505{,}24(a/R)^3 - 903{,}57(a/R)^2 + 1275{,}9(a/R) + 151{,}04$$

Результаты работы показывают, что:

- криволинейные стенки в коробчатой балке обладают большей местной устойчивостью по сравнению с прямыми стенками;
- область потери устойчивости с ростом кривизны стенки смещается к верхнему поясу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов С.А., Металлические конструкции подъемно-транспортных машин, учеб. пособие. / Соколов С.А., - СПб.: Изд-во Политехника, 2005. – 423с.
2. Манжула К.П., Петинов С.В., Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках: учеб. пособие. / К.П. Манжула, С.В. Петинов. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 76с.
3. Кулькова Н.Н. Особенности напряженно-деформированного состояния элементов крановой коробчатой балки при расчете стенок в закритической области. Тр ВНИИПТмаш, 1981.
4. Пат. 1989834 США. Method for reinforcement beams / G. Watson опубл. 5.02.1935
5. Пат ЕР 0293789 А1 Германия. Als Kastentrager ausgebildeter Krantrager / Richar Aust опубл. 10.10.2001
6. Пат 2478557, Россия. Подкрановая балка / Белый Александр Григорьевич опубл. 1.06.2011
7. Тимошенко С.П., Устойчивость стержней, пластин и болочек, учеб. Пособие. / С.П. Тимошенко, - Москва: Изд-во Наука 1971. – 124с.
8. Басов К.А., Справочник по ANSYS, учеб. пособие. / Басов К.А., - Москва.: Изд-во ДМК-ПРОСС, 2005.
9. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, О.В. Грановский Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: учеб. Пособие. / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. –Москва.: Изд-во Наука, 1976.

K.P.Manzhula[1], A.V.Naumov[2]

INFLUENCE OF FLECTIONS' RADIUS TO LOCAL REGIDITY OF BOX-SHAPED BEAMS

all: St.Petersburg Polytechnic University of Peter the Greatest, Russia.

Abstract

In this article analysis of local rigidity box-shaped beams was done. It is defined that local rigidity critical force of beams with non-linear walls is bigger than critical force of standard box-shaped beams. Value of critical force is increasing with gain of flections' radius.

Key words: local rigidity, box-shaped beam with linear walls, box-shaped beam with non-linear walls, finite element method, ANSIS

REFERENCES

[1] Sokolov S.A., Metal structures of lifting and transportable machines, Saint-Petersburg 2005. – 423p.

[2] Manzhula K.P., Petinov S.V., Strength and durability of metal structures, Saint-Petersburg SPBGTU, 2001. 76p.

[3] Kulkova N.N., Stress-strain behavior aspects of crans beams. VNIIPTmash,1981.
[4] Patent. 1989834 USA. Method for reinforcement beams / G. Watson published. 5.02.1935
[5] Patent EP 0293789 A1 Germany. Als Kastentrager ausgebildeter Krantrager / Richar Aust published. 10.10.2001
[6] Patent 2478557, Russia. Travaling beam / Alexander Belyi, published 1.06.2011
[7] Timoshenko S.P., Rigidity of sticks, plates, and shapes, Moscow, Sciences, 1971. 124 p.
[8] Basov K.A., Guide of ANSYS, Moscow. DMK-PROSS, 2005.
[9] Adler U.P, Markov E.V., Granovskiy O.V. Planning of experiments Moscow, Sciences, 1976.

УДК 621.431; DOI 10.1872/MMF-2016-77

Д. А. Масленников[1], О.Г. Гайдарь[2]

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ ТОПЛИВА В БЕНЗИНОВЫХ ДВС С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ

[1]Дмитрий Александрович Масленников, Ph.D.
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: maslennikov_donntu@mail.ru

[2]Олег Георгиевич Гайдарь, к.т.н., доцент
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: gog2000@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы применимости CFD моделирования для исследования распыления топлива в системах бензиновых двигателей внутреннего сгорания с непосредственным впрыском топлива. Представлены результаты CFD моделирования и произведено сравнение с экспериментальными данными. Проверка результатов моделирования проводилась на основе экспериментальных исследований, проведенных на стенде, снабженном камерой для высокоскоростной съемки и цифрового анализа изображений. Процедура верификации принимает во внимание влияние давления в цилиндре двигателя на скорость распространения топлива.

Ключевые слова: впрыск топлива, CFD моделирование, оптические исследования, ДВС

Введение

Методы компьютерного моделирования процессов сгорания и смесеобразования в ДВС, являются важным инструментом, предопределяющим развитие этой отрасли техники. Их использование позволяет в значительной степени сократить и оптимизировать процесс исследования. Существуют множество программ компьютерного моделирования, которые возможно применить для исследования процессов распыления и сгорания топлива в ДВС [2, 3, 4, 5]. Остановимся на пакете

программного обеспечения CFD моделирования (Computational fluid dynamics), который позволяет моделировать химические и физические процессы в двигателях внутреннего сгорания [1].

Параметры струи топлива являются определяющими в аспекте процесса создания горючей смеси, особенно при использовании бензиновых пьезоэлектрических форсунок. Главным преимуществом таких горелок является возможность получения многократного впрыска топлива при относительно коротких временных промежутках между последующими впрысками [6, 7]. Были поставлены задачи определить сравнительные показатели и на их основании выполнить оценку процесса распыления топлива, выявить влияния параметров впрыска топлива (давление впрыска и время открытия форсунки) на выбранные параметры струи топлива, собрать экспериментальные данные для выявления функциональных зависимостей между этими параметрами и процессом распыления топлива. Моделирование процесса распыления позволяет наблюдать изменение элементов системы-модели, проводить эксперименты, изменяя отдельные параметры модели впрыска и распыления топлива.

Применим метода оптико-геометрических исследований и цифрового анализа получаемых изображений распыления топлива для верификации компьютерной модели процесса распыления топлива.

Основы компьютерной модели

Исследования распыления топлива охватывают многофазовые явления и требуют одновременного решения уравнений для жидкой и газовой фазы. Модель процесса распыления топлива основана на подмоделях, которые в значительной степени влияют на качество моделирования процесса впрыска топлива. Используемая модель состоит из следующих подмоделей:

- турбулентной модели распада капель топлива,
- модель испарения топлива,
- модель распада капель.

Из анализа литературы [8, 9] можно выделить следующие подмодели распыления топлива:

- турбулентная модель распада капель топлива - стохастическая модель,
- модель испарения топлива - модель Дуковича,
- модель распада капель – KHRT (модель поверхностных волн Кельвина-Гельмгольца (KH) и распределение Рэлея-Тейлора (RT)).

Таким образом, модель распыления топлива учитывает движение и распад капель топлива, влияние на этот процесс внешних сил. При

использовании модели KHRT, предполагается, что инжектор образует коническую струю.

Приведенные выше модели были использованы для моделирования распыления топлива в бензиновом ДВС с непосредственным впрыском в камеру сгорания. Результаты моделирования процесс распыления топлива после 0,7 мс от момента начала открытия форсунки при $P_{впр}$ = 20 MPa – давление топлива, $P_{цил}$ = 1,5 MPa – давление в цилиндре двигателя показаны на рис. 1.

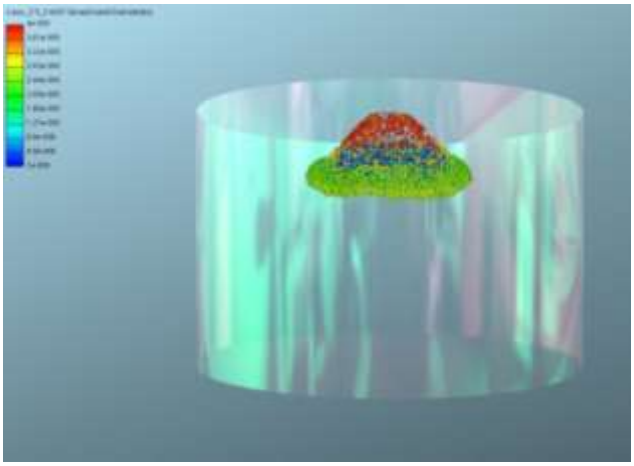


Рис. 1. Распыленное топливо после 0,7 мс от момента начала открытия форсунки (цвет показывает распределение диаметра капель)

Описать процесс распыления топлива можно при помощи трехмерной поверхности с постоянным коэффициентом избытка воздуха (рис. 2.).

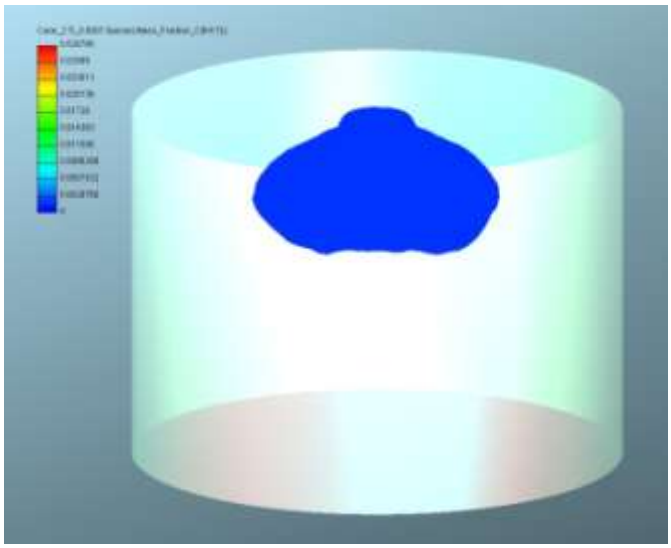


Рис. 2. Трехмерная поверхность с постоянным коэффициентом избытка воздуха ($P_{впр}$ = 20 MPa, $P_{цил}$ = 1,5 MPa)

После завершения впрыска, распределение топлива в камере сгорания не равномерное, это показано на рис 3. Можно выделить области с различным λ - коэффициентом избытка воздуха топливно-воздушной смеси.

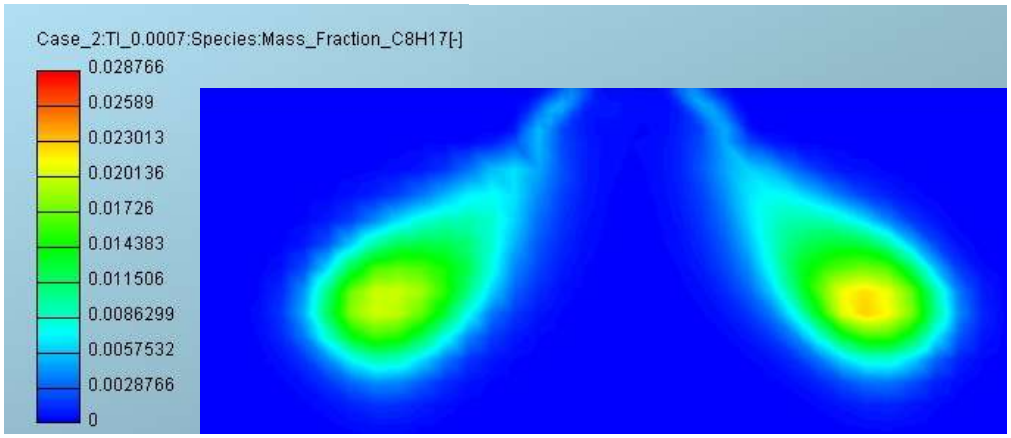


Рис. 3. Массовая доля топлива в цилиндре двигателя
($P_{впр}$ = 20 MPa, $P_{цил}$ = 1,5 MPa)

Методология экспериментальных исследований

Для верификации компьютерной модели использовался стенд для исследования распыления топлива (рис. 4). В стенде использован топливный насос высокого давления (ТНВД), применяемый в системах непосредственного впрыска бензиновых двигателей с максимальным давлением до 25 МПа. Пьезоэлектрическая форсунка установлена в измерительной камере, в которой возможно изменять давление воздуха в пределах 0-4,0 МПа. Расположение инжектора позволяет наблюдать процесс распыление топлива.

В эксперименте [10] применена камера для высокоскоростной съемки (до 250 000 кадров/с). Скорость записи снижена до 10000 кадров в секунду (разрешение по времени 100 мсек). Высокоскоростная съемка проводилась в спектральном диапазоне 380-800 нм.

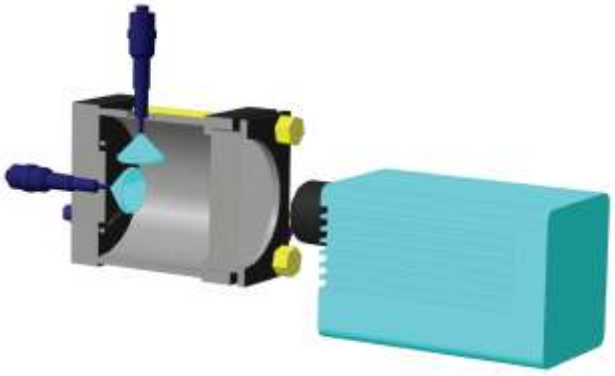


Рис. 4. Стенд для исследования распыления топлива

Экспериментальные исследования проводились для давления впрыска топлива: 20 и 5 МПа (табл. 1). Выбраны придельные значения, для современных систем непосредственного впрыска бензина. Тем не менее, они определяют следующий этап развития этих систем.

Таблица 1

Параметры исследования распыления топлива

№	Давление топлива $P_{впр}$ [MPa]	Противодавление в цилиндре $P_{цил}$ [MPa]	Код эксперимента
1	5	1,5	HPI-50-15
2	20	1,5	HPI -200-15

Проверка достоверности компьютерной модели распыления топлива

Соответствие компьютерной модели распыления топлива экспериментальным исследованиями проведена с целью выявления расхождений между результатами экспериментальных исследований и моделирования.

Компьютерная модель позволяют прогнозировать процессы, происходящие в тестовой системе (реальной или проектируемой) при некоторых допущениях. Проведенные исследования позволили оценить соответствие компьютерной модели и реального процесса: Результаты для сравнительного анализа сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение результатов эксперимента и компьютерной модели

	Давление топлива $P_{впр}$ = 20 MPa, противодавление $P_{цил}$ = 1,5 MPa					
	Время [мс]					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Эксперимент						
Моделирование (капли топлива)						
Трехмерная поверхность						

Оценка достоверности компьютерной модели основана на сравнении соответствия (с точки зрения принятого критерия) конкретных характеристик, полученных на основании результатов экспериментальных

исследований и моделирования (в ходе экспериментов, проведенных с теми же параметрами) [11] и сведены на графике (рис. 5).

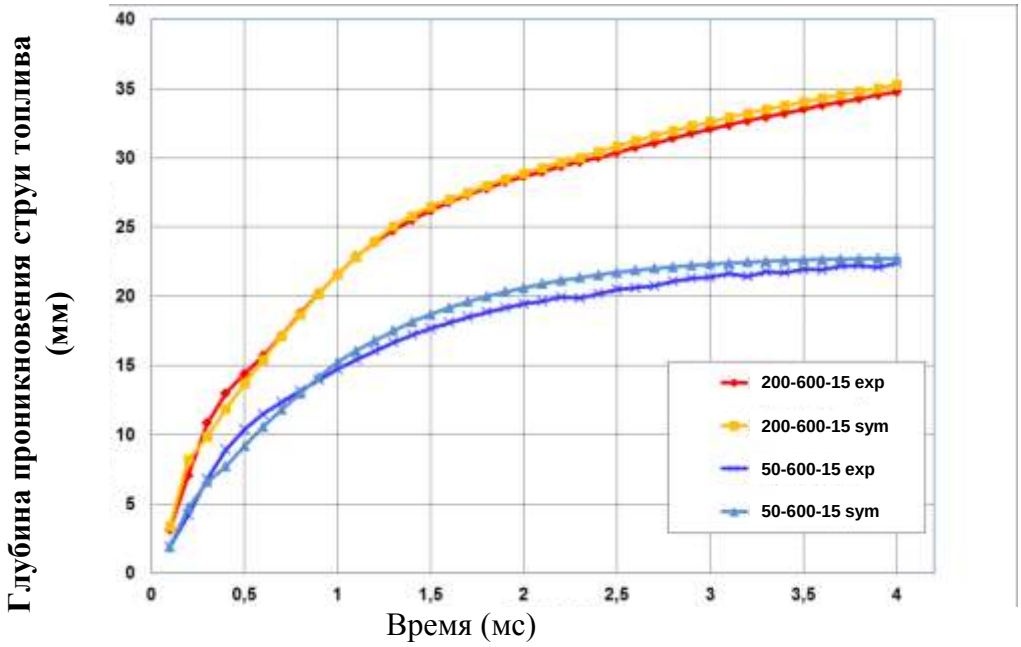


Рис. 5. Оценка достоверности компьютерной модели

На основе параметров, определенных в ходе эксперимента и моделирования, было установлено, что глубина проникновения струи топлива, полученная в ходе моделирования больше по сравнению с экспериментальными результатами. Это связано со сложностью наблюдения оптическими методами (эксперимент) капель малого диаметра. Максимальный разница данных полученных в ходе исследования менее 5% для давления впрыска 5 МПа и противодавления в цилиндре двигателя 1,5 МПа и времени после начала впрыска 2 мс. Повышение давления впрыска уменьшает разницу между результатами моделирования и экспериментальными исследованиями. При давлении впрыска 5 МПа и после 0,8 мс от начала впрыска существует четкое увеличение разницы между результатами моделирования и экспериментальных исследований глубины проникновения струи топлива.

Расчетное значение скорости проникновения струи топлива показано на рис. 6. Очевидно, что увеличение противодавления в цилиндре двигателя в значительной степени влияет на снижение скорости струи распыленного топлива. Через 0,2 мс существует четкое снижение скорости струи топлива. После завершения впрыска изменения скорости проникновения топлива в цилиндре двигателя незначительны [11].

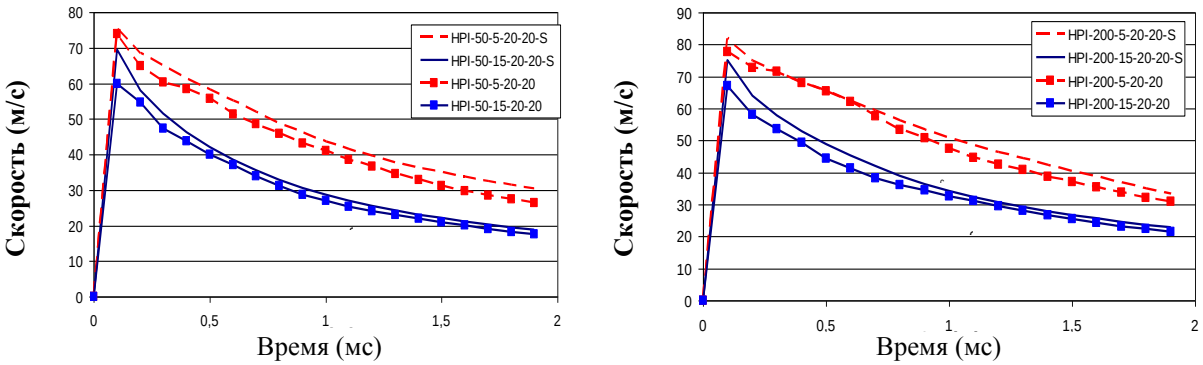


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования
и экспериментальных исследований влияния противодавления
и давления впрыска на скорость распространения струи топлива
($P_{впр}$ = 5; 20 MPa; $t_{впр}$ = 0.5 мс ; $P_{цил}$ = 0,5; 1,5 MPa)

Сравнительный анализ показал полную адекватность компьютерной модели процесса распыления топлива в бензиновых ДВС и не критичность принятых допущений при моделировании.

Выводы

На основе экспериментальных исследований и моделирования распыления топлива, было установлено, что:

1. Моделирование процесса распыления топлива позволяет определить параметры струи распылённого топлива при условии, что должным образом отражены входные параметры и геометрия распылителя форсунки двигателя.

2. Глубина проникновения струи топлива, полученная в процессе моделирования больше. Это связано со сложностью регистрации оптическими методами капель малого диаметра.

3. Во время первой фазы распыления топлива (до 0,7 мс от начала впрыска) не выявили существенных различий полученных результатов двумя методами.

4. Противодавление в цилиндре двигателя гораздо сильнее влияет на глубину проникновения струи топлива, чем давление впрыска топлива.

5. Максимальное значение скорости фронта распылённого топлива определены в начальной фазе впрыска около 80 м/с. При увеличении противодавления на 1 МПа максимальное значение скорости уменьшилась приблизительно на 15%. Более высокое давление впрыска увеличивает максимальную скорости струи топлива на 6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. AVL FIRE ver. 2009, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2009.
2. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Модифицированная математическая модель цикла поршневого двигателя // Современное машиностроение: наука и образование. Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 1308 с.
3. Хижняк А.В. Визуализация процесса горения в замкнутом пространстве // Современное машиностроение: наука и образование. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 1205 с.
4. Iyer C.O., Han Z., Yi J.: CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combus-tion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.
5. Kim S.-J., Kim Y.-N., Lee J.-H.: Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine, SAE Technical Paper 2008-01-0142.
6. Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.
7. Schwarz Ch., Schünemann E., Durst B., Fischer J., Witt A.: Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System, SAE Technical Paper 2008-01-1265.
8. Rawski F., Szpica D.: Symulacyjne metody badań układów dolotowych tłokowych silników spalinowych. PM 2005 zeszyt 2/2005.
9. AVL FIRE руководство пользователя, https://www.avl.com/-/avl-fire-1
10. Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., Kaźmierowski J.: The assessment of the of the usefulness of a Rapid Compression Machine in optical research on the injection and combustion processes of liquid fuels. Combustion Engines, 2010-SS4-401, 2010.
11. D. Maslennikov: Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 s. : il. ; 30 cm + 2 recenzje. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2012 DrOIN 1457
12. Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Symulacyjna metoda analizy rozpylenia paliwa ciekłego z wykorzystaniem wtryskiwaczy piezoelektrycznych. TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, Zakopane, 2010.

D. A. Maslennikov, O. G. Gaidar

THE COMPUTER SIMULATION OF FUEL ATOMIZATION IN THE GASOLINE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH DIRECT INJECTION

all: Donetsk National Technical University

Abstract

The paper presents an attempt to apply a simulation method in the investigations into liquid fuel atomization generated from piezoelectric gasoline injectors used in modern high-pressure injection systems. Individual stages of the simulation research have been discussed and an experimental verification of the method has been carried out. The results of the simulation and experimental research of the injection of liquid fuel have been presented in the form of influence of air backpressure on the fuel spray atomization and fuel propagation.

Key words: fuel injection, simulation method, optical research.

REFERENCES

[1] AVL FIRE ver. 2009, ICE Physics&Chemistry. AVL Graz 2009.
[2] Gavrilov A.A., Gots A.N.: The modified mathematical model cycle piston engine // Modern machinery: Science and Education: Materials of the 4th International Scientific-practical conference - SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2014. - 1308 p.
[3] Khiznyak A.V.: Visualization of process of combustion in selfcontained space. // Modern machinery: Science and Education: Materials of the 3th International Scientific-practical conference - SPb: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2013-1205 p.
[4] Iyer C.O., Han Z., Yi J.: CFD Modeling of a Vortex Induced Stratification Combus-tion (VISC) System, SAE Technical Paper 2004-01-0550.
[5] Kim S.-J., Kim Y.-N., Lee J.-H.: Analysis of the In-Cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-Guided GDI Engine, SAE Technical Paper 2008-01-0142.
[6] Lohfink C., Baecker H., Tichy M.: Experimental Investigation on Catalyst-Heating Strategies and Potential of GDI Combustion Systems, SAE Technical Paper 2008-01-2517.
[7] Schwarz Ch., Schünemann E., Durst B., Fischer J., Witt A.: Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System, SAE Technical Paper 2008-01-1265.
[8] Rawski F., Szpica D.: Symulacyjne metody badań układów dolotowych tłokowych silników spalinowych. PM 2005 zeszyt 2/2005.
[9] AVL FIRE – руководство пользователя, https://www.avl.com/-/avl-fire-1
[10] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D., Kaźmierowski J.: The assessment of the of the usefulness of a Rapid Compression Machine in optical research on the injection and combustion processes of liquid fuels. Combustion Engines, 2010-SS4-401, 2010.
[11] D. Maslennikov: Badawcza identyfikacja właściwości systemu spalania z bezpośrednim wtryskiem paliwa i zapłonem iskrowym. 149 p. 30 cm + 2 recenzje. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, 2012 DrOIN 1457
[12] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: Symulacyjna metoda analizy rozpylenia paliwa ciekłego z wykorzystaniem wtryskiwaczy piezoelektrycznych. TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, Zakopane, 2010.

УДК 625.7/8.002 ; DOI 10.1872/MMF-2016-78

Д.В. Мусияко[1], Р. А. Хабибуллин[2], В.С. Пешков[3], А.Я. Башкарёв[4]

ВИБРАЦИОННЫЙ УПЛОТНИТЕЛЬ - ПЛАНИРОВЩИК

[1]Дмитрий Валентинович Мусияко, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: musiyako@gmail.com.

[2]Рузиль Арсенович Хабибуллин, студент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ruz1k.53@mail.ru.

[3]Вадим Сергеевич Пешков, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: yapesha@gmail.com.

[4]Альберт Яковлевич Башкарёв, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: bashkarev@spbstu.ru.

Аннотация

В данной работе обоснована возможность совмещения процессов вибрационного планирования и уплотнения дорожных материалов. Предложена конструктивная схема механизма, реализующая новую технологию. Создана математическая модель, с помощью которой описывается динамика процессов.

Ключевые слова: вибрационное перемещение, уплотнение, планирование.

Введение

Процесс создания дорожных покрытий включает в себя две основные операции: равномерное распределение асфальтобетонной смеси и последующее её уплотнение. Эти операции на дорогах выполняют асфальтоукладчики и дорожные катки различных конструкций |10|.

Значительно в меньшей степени механизированы работы, выполняемые в стеснённых условиях на небольших по размеру площадях, таких как тротуары, пешеходные дорожки, внутриквартальные проезды и просто ремонт дорожных покрытий, который стал большой проблемой всех городов. До настоящего времени при выполнении таких работ асфальтобетонная смесь раскладывается вручную, что не обеспечивает равномерной толщины, а следовательно равномерного давления и плотности при уплотнении материала, которое обычно выполняется компактными вибрационными уплотнителями, например виброплитами. |2, 8, 9|.

В данной работе предлагается оснастить вибрационный уплотнитель небольшим отвалом, что даёт возможность совместить процессы равномерного распределения и уплотнения применяемого материала.

Расширение сфер применения вибрационной техники сдерживается недостаточной изученностью динамики процессов её работы. При всей кажущейся простоте принципа вибрационного передвижения его описание является достаточно сложной математической задачей из области нелинейных колебаний, что обусловлено присутствием сил сухого трения и чередованием фаз скольжения по опорной поверхности и отрыва от неё. |1,3,4|.

В данной работе находится условия, при которых возможно совмещение в одном механизме функций вибротолкателя и виброуплотнителя.

Динамика вибрационного уплотнителя-планировщика

В 2013 году Башкаревым А.Я., Мусияко Д.В. и Пешковым В.С. |11| были опубликованы работы, в которых предлагается создавать поверхностный уплотнитель в виде комбинации шарнирно соединенных плиты и вальца, расположенного за плитой и выполняющего роль его задней кромки (рис.1).

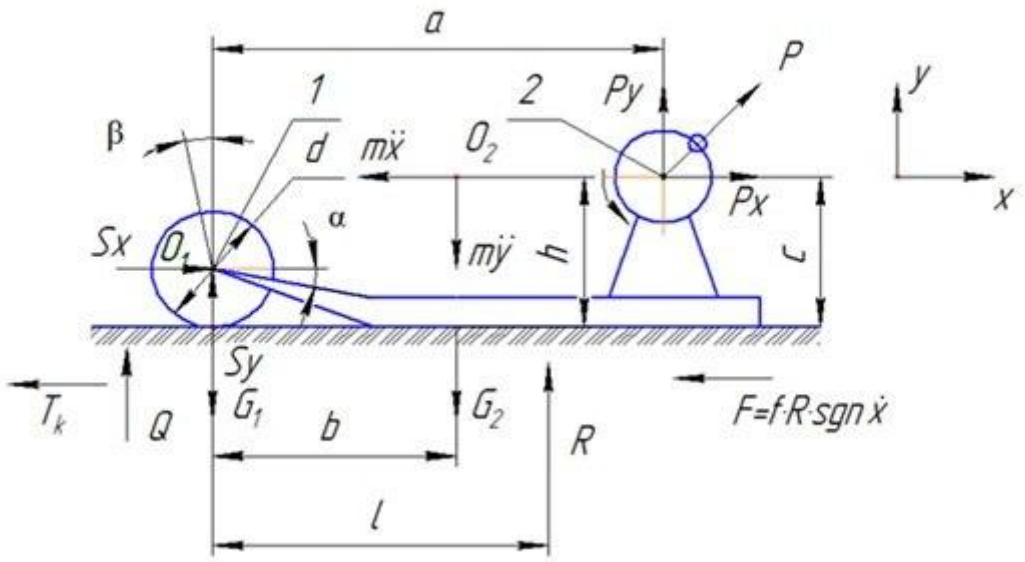


Рис. 1. Схема сил, действующих на комбинированный вибрационный уплотнитель.

Здесь: G_1 – вес вальца; G_2 – вес вибрирующей рамы с вибратором; O_1 – центр вальца; O_2 – центр инерции вибратора; S_x и S_y – реакции в точке крепления оси вальца к раме; Q – реакция под вальцом со стороны опорной поверхности; T_k – сила сопротивления перекатыванию вальца; α – угол отклонения рамы относительно оси вальца; β – угол поворота вальца; f – коэффициент трения скольжения, P – возбуждающая сила вибратора.

На основе представленной выше схемы, предлагается математическая модель вибрационного уплотнителя-планировщика (рис.2).

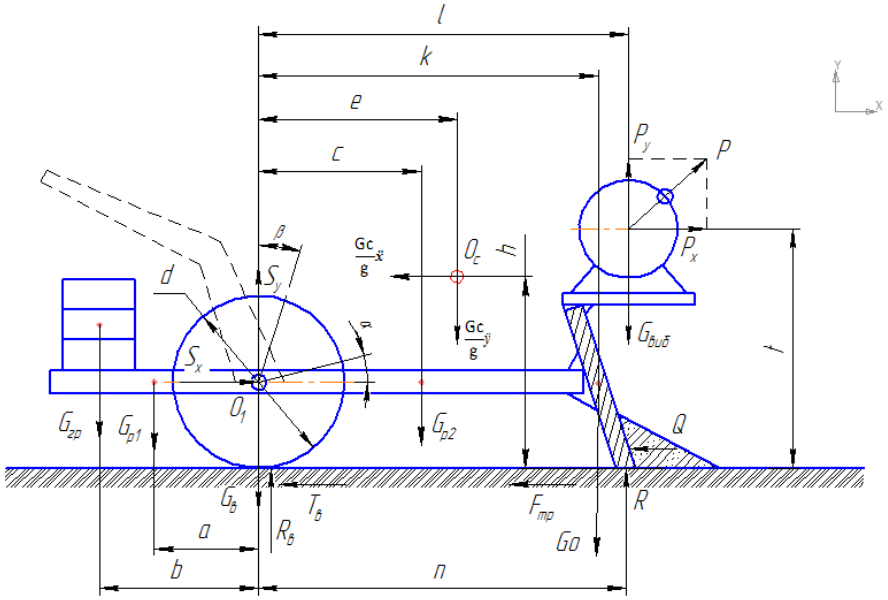


Рис. 2. Схема сил, действующих на предлагаемый вибрационный уплотнитель-планировщик.

Здесь: $G_{гр}$ – вес дополнительного груза; G_{p1},G_{p2} – вес левой и правой части рамы соответственно; $G_в$ – вес вальца; G_o – вес отвала; $G_{виб}$ – вес вибратора; G_c – вес системы; $T_в$ – сила сопротивления качению вальца; $R_в$ – реакция под вальцом со стороны опорной поверхности; S_x, S_y – реакции в точке крепления оси вальца к раме; $F_{тр}$ – сила трения; α – угол отклонения рамы относительно оси вальца; β – угол поворота вальца; f – коэффициент трения скольжения; P – возбуждающая сила вибратора; R – реакция под отвалом со стороны опорной поверхности; Q – реакция со стороны перемещаемого объекта; O_1 – центр вальца; O_c – центр инерции системы отвал-вибратор-груз-рама; a,b,c,d,e,h,k,l,n,t – геометрические размеры.

Делается предположение, что за счёт упругости сдвигаемого материала имеет место его постоянный контакт с отвалом.

Для определения направления сил трения и сопротивления качению введём функцию sgnẋ:

$$F_{тр} = Rf \cdot sgn\dot{x};$$

$$T_в = R_в\mu \cdot sgn\dot{x};$$

Так как вибрационное перемещение уплотнителя-планировщика представляет собой возвратно-поступательное движение, то реакция со стороны перемещаемого объекта появляется только при движении уплотнителя-планировщика вперёд |5, 6, 7, 13|. Запишем его в виде:

$$Q = \frac{Qsgn\dot{x} + Q}{2}$$

На валец со стороны рамы действуют те же силы S_x и S_y , но с обратным знаком.

Напишем уравнения равновесия сил для вальца, соблюдая указанные на рис. 2 направления сил:

$$\begin{cases} \frac{G_в}{g}\ddot{x} = S_x - R_в\mu \cdot sgn\dot{x}, & (1) \\ \frac{G_в}{g}\ddot{y_1} = S_y + R_в - G_в, & (2) \\ J_к\ddot{\beta} = R_в\mu \cdot sgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2}. & (3) \end{cases}$$

Здесь $J_в -$ момент инерции вальца относительно собственной оси.

Из рис. 2 видно, что:

$$sin\beta \approx \beta = \frac{x}{d/_2},$$

т.к. sin предельно малого угла равен самому углу.

$$\ddot{\beta} = \frac{2\ddot{x}}{d}$$

Выражение (3) запишем в следующем виде:

$$J_{\text{в}}\frac{2\ddot{x}}{d} = R_{\text{в}}\mu \cdot \frac{d}{2} \cdot sgn\dot{x}. \quad (4)$$

Напишем уравнения равновесия сил, действующих на систему отвал-вибратор-груз-рама, соблюдая указанные на рис. 2 направления сил:

$$\begin{cases} \frac{G_C}{g}\ddot{x} = P_x - S_x - Rf \cdot sgn\dot{x} - Q, \quad (5) \\ \frac{G_C}{g}\ddot{y}_2 = P_y + R - S_y - G_C, \quad (6) \\ J_C\ddot{\alpha} = P_y l - P_x\left(t - \frac{d}{2}\right) - G_{\text{виб}} l - G_{\text{о}} k + Rn - Q\frac{d}{2} - Rf \cdot sgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2} + \\ \quad + \frac{G_C}{g}\ddot{x}\left(h - \frac{d}{2}\right) - \frac{G_C}{g}\ddot{y}_2 e - G_{\text{р2}} c + G_{\text{гр}} b + G_{\text{р1}} a. \quad (7) \end{cases}$$

Здесь G_C – вес системы отвал-вибратор-груз-рама:

$$G_C = G_o + G_{виб} + G_{гр} + G_{р1} + G_{р2}.$$

J_C – момент инерции системы отвал-вибратор-груз-рама:

$$J_C = J_o + J_{виб} + J_{гр} + J_{р1} + J_{р2}.$$

Из рис. 2 видно, что:

$$sin\alpha \approx \alpha = \frac{y_2}{e}$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{\ddot{y}_2}{e}$$

Нас интересует режим работы вибрационного уплотнителя-планировщика, когда валец не отрывается от опорной поверхности, т.е.: $y_1 = const = 0 \Rightarrow \ddot{y}_1 = 0$. В таком режиме механизм удерживается от смещения на уклоне и валец выполняет функцию виброуплотнителя |12|.

Тогда из выражения (2) следует:

$$S_y = G_{\text{в}} - R_{\text{в}}. \quad (8)$$

Выражение (6) с учётом выражения (8) можно записать в виде:

$$\frac{G_C}{g}\ddot{y}_2 = P_y + R - G_{\text{в}} + R_{\text{в}} - G_C. \quad (9)$$

После сложения правых и левых частей выражений (1) и (5) и упрощения, получим выражение:

$$\ddot{x} = \frac{(P_x - Rf \cdot sgn\dot{x} - Q - R_{\text{в}}\mu \cdot sgn\dot{x})g}{G_{\text{в}} + G_C}. \quad (10)$$

Подставим выражение (8) в выражение (6). В результате получаем:

$$\ddot{\alpha} = \frac{(P_y + R - G_{\text{в}} + R_{\text{в}} - G_C)g}{G_C e}. \quad (11)$$

Из уравнений (9), (10) и (11) в (12):

$$\frac{J_C g}{G_C e}\left(P_y + R - G_{\text{в}} + R_{\text{в}} - G_C\right)$$

$$= P_y l - P_x\left(t - \frac{d}{2}\right) - G_{\text{виб}} l - G_{\text{о}} k + Rn - Q\frac{d}{2} - Rf \cdot sgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2} +$$

$$+\frac{G_C}{G_{\text{в}} + G_C}\left(P_x - Rf \cdot sgn\dot{x} - Q - R_{\text{в}}\mu \cdot sgn\dot{x}\right) \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right) - \left(P_y + R - G_{\text{в}} + R_{\text{в}} - G_C\right)e -$$

$$-G_{\text{р2}} c + G_{\text{гр}} b + G_{\text{р1}} a. \qquad (12)$$

Выполним преобразования выражения (12), разложив вес системы G_C на составляющие и перенеся множители с Q в одну часть:

$$Q\left[\frac{d}{2} + \frac{G_C}{G_{\text{в}}+G_C} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right] = P_y\left(l - e - \frac{J_C g}{G_C e}\right) - P_x\left[t - \frac{d}{2} - \frac{G_C}{G_{\text{в}}+G_C}\left(h - \frac{d}{2}\right)\right] -$$

$$G_{\text{виб}}\left(l - e - \frac{J_C g}{G_C e}\right) - G_{\text{о}}\left(k - e - \frac{J_C g}{G_C e}\right) + R\left[n - fsgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2} - \frac{G_C}{G_{\text{в}}+G_C}\left(h - \frac{d}{2}\right)fsgn\dot{x} - e -\right.$$

$$\left.\frac{J_C g}{G_C e}\right] + +G_{\text{гр}}\left(e + b + \frac{J_C g}{G_C e}\right) + G_{\text{р1}}\left(e + a + \frac{J_C g}{G_C e}\right) + G_{\text{р2}}\left(e - c + \frac{J_C g}{G_C e}\right) + G_{\text{в}}\left(e + \frac{J_C g}{G_C e}\right) -$$

$$R_{\text{в}}\left[e + + \frac{J_C g}{G_C e} + \frac{G_C}{G_{\text{в}}+G_C}\left(h - \frac{d}{2}\right)\mu \cdot sgn\dot{x}\right]. \qquad (13)$$

$$Q = \frac{P_y\left(l - e - \frac{q}{e}\right) - P_x\left[t - \frac{d}{2} - G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right)\right] - G_{\text{виб}}\left(l - e - \frac{q}{e}\right) - G_{\text{о}}\left(k - e - \frac{q}{e}\right)}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]} +$$

$$+\frac{R\left[n - fsgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2} - G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right)fsgn\dot{x} - e - \frac{q}{e}\right] + G_{гр}\left(e + b + \frac{q}{e}\right)}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]} +$$

$$+\frac{G_{\text{р1}}\left(e + a + \frac{q}{e}\right) + G_{\text{р2}}\left(e - c + \frac{q}{e}\right) + G_{\text{в}}\left(e + \frac{q}{e}\right) - R_{\text{в}}\left[e + \frac{q}{e} + G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right)\mu \cdot sgn\dot{x}\right]}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]}, \qquad (14)$$

где $q = \frac{J_C g}{G_C}$, $G_{\text{отн}} = \frac{G_C}{G_{\text{в}}+G_C}$.

Нас интересует максимальное усилие Q_{max}, которое достигается при условии:

$$P_x = P,\ P_y = 0.$$

Тогда выражение (14) принимет вид:

$$Q_{max} = \frac{P\left[t + \frac{d}{2} + G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right)\right] - G_{\text{виб}}(l - \xi) - G_{\text{о}}(k - \xi)}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]} +$$

$$+ \frac{R\left[n - fsgn\dot{x} \cdot \frac{d}{2} - G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right) fsgn\dot{x} - \xi\right] + G_{гр}(\xi + b) + G_{\text{р1}}(\xi + a)}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]} +$$

$$+ \frac{G_{\text{р2}}(\xi - c) + G_{\text{к}}\xi - R_{\text{в}}\left[\xi + G_{\text{отн}}\left(h - \frac{d}{2}\right)\mu \cdot sgn\dot{x}\right]}{\left[\frac{d}{2} + G_{\text{отн}} \cdot \left(h - \frac{d}{2}\right)\right]}, \qquad (15)$$

где $\xi = e + \frac{q}{e}$.

Рассмотрим режим, когда большую часть времени опорная часть отвала уплотнителя-планировщика находится в воздухе, т.е. не опирается на уплотняемую поверхность. Следовательно, R=0.

Если выполнить конструкцию так, что $h = \frac{d}{2}$, т.е. центр инерции системы отвал-вибратор-груз-рама будет расположен на высоте оси вальца, то выражение (15) примет вид:

$$Q_{max} = \frac{P\left(t + \frac{d}{2}\right) - G_{\text{виб}}(l - \xi) - G_{\text{о}}(k - \xi)}{\frac{d}{2}} +$$

$$+ \frac{G_{гр}(\xi + b) + G_{\text{р1}}(\xi + a) + G_{\text{р2}}(\xi - c) + G_{\text{в}}\xi - R_{\text{в}}\xi}{\frac{d}{2}}. \qquad (16)$$

Основные выводы

1. Теоретически обоснована возможность создания вибрационного самоходного планировщика для работы с малосвязными дисперсными материалами.
2. Разработана методика расчета геометрических параметров и соотношения возбуждающей силы вибратора и массы планировщика, при которых возникает эффект его самостоятельного передвижения.
3. Впервые предложена конструкция механизма для одновременного планирования и уплотнения таких строительных материалов, как грунты, щебень и бетоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Вибрационное перемещение. М.: Физматлит. 1994. 400с.

2. Варганов С.А., Андреев Г.С. Машины для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов, М.: Машиностроение. 1981, 420 с.
3. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. М.: Изд-во Госстройиздат, 1959.
4. Кузьмичев В.А. Основы проектирования вибрационного оборудования. Лань, 2014, 208 с.
5. Хархута Н.Я. Машины для уплотения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973, 176 с.
6. Баркан Д.Д., Шехтер О.Я. Теория поверхностного уплотнения грунта. НИИ Оснований и подземных сооружений, 1961, сб.№51.
7. Савельев С.В., Лашко А.Г. Расширение возможностей эффективного уплотнения строительных материалов. Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии 2009, Вып. 3(13). с.18-21.
8. Носов С.В. Пути повышения эффективности уплотнения асфальтобетонных смесей и грунтов в дорожном строительстве на современном этапе. Известия вузов. Строительство. 2013, №6, с. 91-96.
9. Маслов А.Г., Пономарь В.М., Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве, Киев: Будивельник, 1985, 128 с.
10. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М.: Высшая школа. 1977, 255 с.
11. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», 2013, СПбГПУ.
12. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Компоновка самоходных вибрационных уплотнителей. Научно-технические ведомости СПбГПУ, СПб, 2015, №4 (231).
13. Benaroya H., Nagurka Mark L. (2010) Mechanical vibration: analysis, uncertainities and control, 3rd edn. CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Raton.

D.V. Musiiako, R.A. Khabibullin, V.S. Peshkov, A.Y. Bashkarev

VIBRATIONAL COMPACTOR-SPREADER

all: Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

In this article the possibility to combine processes of spreading and vibrational compaction of road materials was considered. As a result, a structural diagram of the mechanism showing the implementation of the new technology was offered. A mathematical model which describes the dynamic of the processes was created.

Key words: vibrational movement, compaction, spreading.

REFERENCES

[1] Blekhman I.I. Vibratsionnoye peremeshcheniye. [Vibrational motion]. Moscow: Fizmatlit, 1994. 400 p. (rus)

[2] Varganov S.A., Andreyev G.S. Mashiny dlya uplotneniya gruntov i dorozhno-stroitelnykh materialov. [Machines for ground and road building materials compaction]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. 420 p. (rus)

[3] Barkan D.D. Vibrometod v stroitelstve. [Vibrational method in construction activities]. Moscow; Gosstroyizdat Publ., 1959. (rus)

[4] Kuzmichev V.A. Osnovy proyektirovaniya vibratsionnogo oborudovaniya. [Basics of vibration equipment design]. St. Petersburg: Lan Publ., 2014. 208 p. (rus)

[5] Kharkhuta N.Ya. Mashiny dlya uploteniya gruntov. [Machines for ground compaction]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1973. 176 p. (rus)

[6] Barkan D.D., Shekhter O.Ya. Teoriya poverkhnostnogo uplotneniya grunta. [The theory of surface ground compaction]. Moscow: NII Osnovaniy i podzemnykh sooruzheniy (NIIOSP), 1961, No. 51. (rus)

[7] Savelyev S.V., Lashko A.G. Rasshireniye vozmozhnostey effektivnogo uplotneniya stroitelnykh materialov. [Capability enhancement of effective road building materials compaction]. Omsk: Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobilno-dorozhnoy akademii (SIBADI), 2009, No. 3(13), pp.18-21. (rus)

[8] Nosov S.V. Puti povysheniya effektivnosti uplotneniya asfaltobetonnykh smesey i gruntov v dorozhnom stroitelstve na sovremennom etape. [Ways to improve the efficiency of asphalt concrete mixtures and ground compaction for road construction at the present stage]. Novosibirsk: Izvestiya vuzov. Stroitelstvo, 2013, No. 6, pp. 91-96. (rus)

[9] Maslov A.G., Ponomar V.M. Vibratsionnyye mashiny i protsessy v dorozhnom stroitelstve. [Vibrating machines and processes in road building]. Kiyev: Budivelnik, 1985, 128 p. (ua)

[10] Bauman V.A., Bykhovsky I.I. Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitelstve. [Vibrating machines and processes in building]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977. 255 p. (rus)

[11] Bashkarev A.Ya., Musiiako D.V., Peshkov V.S. Vibratsionnoye peremeshcheniye poverkhnostnogo uplotnitelya. [Oscillatory motion of the plate compactor]. St.Petersburg: Materialy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie», 2013. (rus)

[12] Bashkarev A.Ya., Musiiako D.V., Rasulov R.A. V.S. Komponovka samokhodnykh vibratsionnykh uplotneniteley. [Arrangement of vibrating compactors]. St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2015, No. 4(231). (rus)

[13] Benaroya H., Nagurka Mark L. (2010) Mechanical vibration: analysis, uncertainities and control, 3rd edn. CRC Press, Taylor&Francis Group, Boca Raton. (USA)

УДК 625.655.3; DOI 10.1872/MMF-2016-79

M. Rajczyk[1], M. Kosiń[2], A. Pietrzak[3]

MEASUREMENT OF GRANITE POROSITY OF GROUND STRUCTURE WITH PROFILOMETER, FOR THE PURPOSES OF PROCESSINGS TOOLS VERIFICATION

[1]Marlena Rajczyk, Technical University of Czestochowa, Poland, д.т.н., профессор, Честоховский технический университет, Польша, Тел. +48603563663, E-mail: damian_jonczyk@wp.pl

[2]Mariusz Kosiń, Technical University of Czestochowa, Poland, инженер, Честоховский технический университет, Польша Тел. +48603563663, E-mail: damian_jonczyk@wp.pl

[3]Alina Pietrzak, Technical University of Czestochowa, Poland, инженер, Честоховский технический университет, Польша Тел. +48603563663, E-mail: damian_jonczyk@wp.pl

Abstract

In Poland there are no norms assessing the measurement instrumental aspect, which could be included in a single document, which could help to estimate mineral surfaces quality in the grinding process. This condition does not help to precise the processing of details being based only on the performer's subjective experience. The aim of this paper is to present the requirements on granite surface gorounded. Research included a granite plate with dimensions 30 x 30 cm, the original surface of which was sawn. Preparation of the various surfaces in the grinding process was carried out using an angle grinder made by CELMA of speed 1,950 rpm. The study included: wet grinding of the surface sequentially with diamond blades of a diameter of 100 mm and a abrasive grain size F54; F100; F220; F320; F400; the measurement of surface roughness Ra cut plate discs with a variable grain size; statistical analysis of test results.

Key words: porosity, profilometer, processings tools, granite.

1. Introduction

The grounded surfaces are frequently irregular in manner described as surface geometry structure. This structure is analysed in sections perpendicular to processed surface, which we call the surface profiles.

Surface porosity is expressed by actual surface irregularities, subjectively defined as measured profile deviations from the reference line on the basic length, where no form or waviness deviation is considered.

In Poland there are no norms assessing the measurement instrumental aspect, which could be included in a single document, which could help to estimate mineral surfaces quality in the grinding process. This condition does not help to precise the processing of details being based only on the performer's subjective experience.

2. The purpose of the paper

The aim of this paper is to present the requirements on granite surface gorounded, based on certain sources [1, 2, 3, 4].

The analysis results of surface roughness measurements was carried out using a profilometer Mitutoyo to the granite plate treated with grinding discs of a grain size classes F54, F100, F220, F320, F400 for the purpose of analysis of the machining tools geometry.

Therefore, it was reasonable to demonstrate the relationship between the requirements for surface ground according to data from the literature and the results obtained from measurements conducted in experimental research.

3. Scope of the study

Research included a granite plate with dimensions 30 x 30 cm, the original surface of which was sawn. Preparation of the various surfaces in the grinding process was carried out using an angle grinder made by CELMA of speed 1,950 rpm.

The study included:

1) wet grinding of the surface sequentially with diamond blades of a diameter of 100 mm and a abrasive grain size F54; F100; F220; F320; F400.

2) the measurement of surface roughness Ra cut plate discs with a variable grain size.

3) statistical analysis of test results.

4. Requirements for the ground texture surface roughness of stone slabs

In construction engineering, the stone has always been used as wall cladding, floors, architectural elements of the facade and external routes. The facing surfaces of the elements are thus subjected to a surface treatment in order to deliver the best design and operating features. Grinding treatment can be applied to all types of stone, while polishing is used only to igneous rocks [3].

The texture is grinded to reduce the surface roughness which precedes the execution of polished texture, which gives gloss surface. These processing operations allow you to get the desired smoothness and bring out the beauty of the internal structure of the stone. In addition, sanded and polished stone

surfaces are characterised by greater resistance to weather, chemical factors and easier cleaning [1, 2, 3].

Grinding may be used as a rough machining, and precise machining in order to obtain high smoothness and beneficial properties for further processing steps [3, 4].

Requirements and tests related to the evaluation of polished stone elements surface roughness descriptions are not frequently found in the literature . PN - EN 12057 - "Natural stone products. Modular plates. Requirements. "PN-EN 12058" Natural stone products. Floor slabs and stairs. Requirements. "PN - EN 1469" Natural stone products. Drywall panels. Requirements. "- are divided according to the grinding surfaces, due to the size of abrasive grains used in the treatment process (Figure 1). These standards confirm only, that the appearance of the processed surface should be uniform and consistent with the specified type of finishing shown in the reference sample [6, 7, 8, 9].

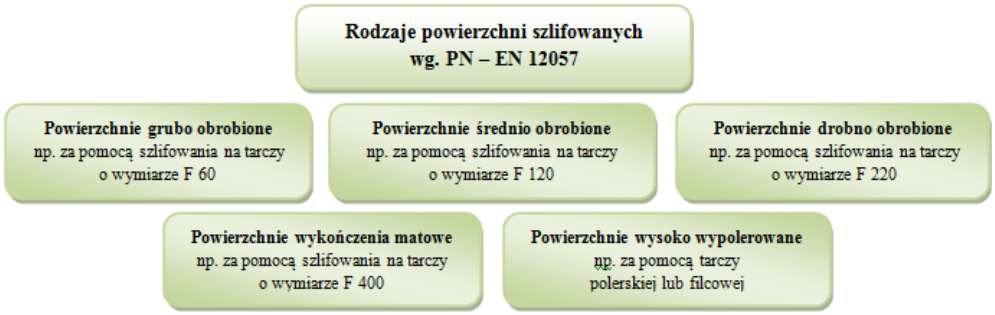


Fig. 1. Surface polished by. PN - EN 12057 -
"Natural stone products. Modular plates. Requirements. "

As it can be seen, the surface quality is not defined by the parameter of roughness but by the type of blade used with a certain amount of abrasive grains, macro-structure and experience of the craftsman.

Frequently used by the specialists in the evaluation of the surface is the norm BN 84 / 6740-02 - "Stone working. Terminology. Basic concepts, names, determination of activities and textures. " According to this standard texture ground is one with external surface characterized by a considerable degree of roughness and the presence of visible or invisible marks left by abrasive materials obtained in the process of grinding, regarding the type of surface. BN-84 / 6740-02 (Figure 2).

This standard gives roughness parameters but does not specify how to measure them and does not point exactly what parameter of roughness shoud be used to describe them. It informs us only about the depth of scratches after the processing, which are evaluated in the macroscopic study.

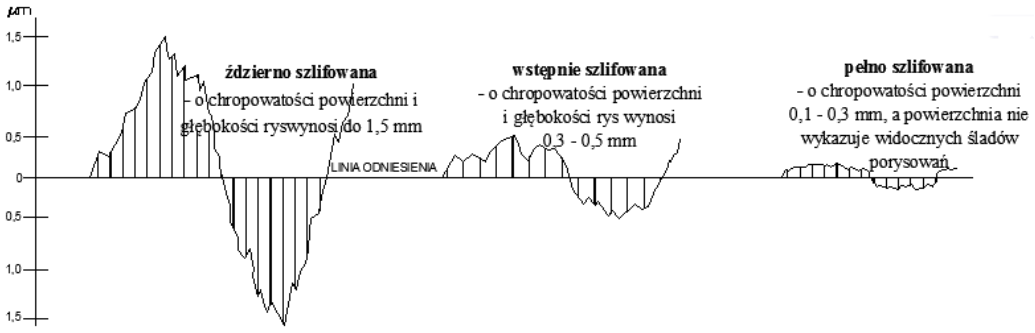


Fig. 2. Schematic representation of polished surfaces . BN - 84 / 6740-02 - "Stone working. Terminology. Basic concepts, names, determination of activities and textures. "

5. Surface roughness - general

Surface roughness is the set of inequalities of the surface of the actual object with a relatively small spacing between vertices. It is assumed that the surface roughness is constituted when the ratio of the length *S* to the height *H* satisfies the inequality $S / H < 50$. On the other hand, when the ratio S / H is contained in the ranges of $50 \leq S / H \leq 1000$, we have to deal with a wave surface. With a ratio of $S / H > 1000$ we are dealing with a deviation shape. Scheme on fig. 3 shows the conventional relation schemes.

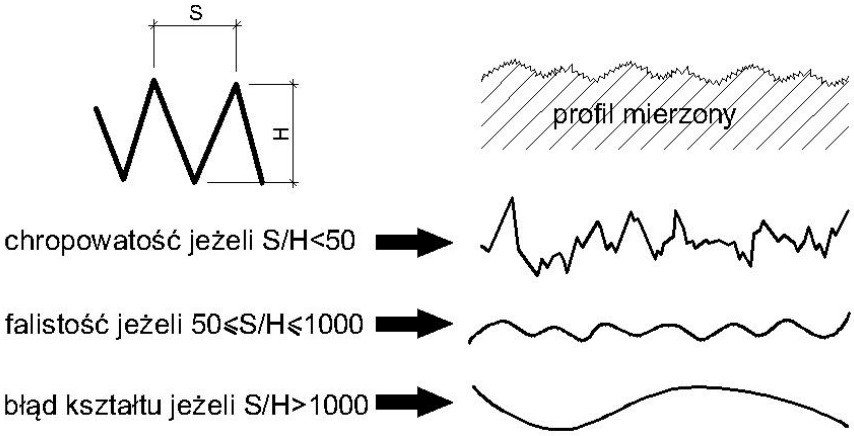


Fig. 3. Schematic representation of the types of surface irregularities [7]

The basic terms used to describe the roughness profile:

- Profile surface – the line of the plane intersection.
- Reference line – line conventionally adopted in respect of which we determine the profile parameters. This line has the profile shape and its nominal position corresponds to the overall orientation of the profile in real space.
- Elementary section – the length of lines taken to determine the inequality characterising surface roughness.
- Measuring section – the length of the section which assesses the value of roughness parameters. Measuring section may comprise one or more elementary sections.
- Average roughness profile line – reference line dividing the roughness

profile in manner making a sum of squares of the deviations from the profile line elementary section minimal.

6. General characteristics of the Surftest SJ-201P Mitutoyo - surface roughness meter

Surftest SJ-201 P was used, among others, in the doctoral thesis research on work efficiency of machining tools [3] based on the method of electronic profilometry with mechanical feed (Fig. 4). The method consists in recording the changes in needle position with known reference length of the test surface, at a constant speed. Then moves of the needle in profile peak parameters are converted into an electrical signal.

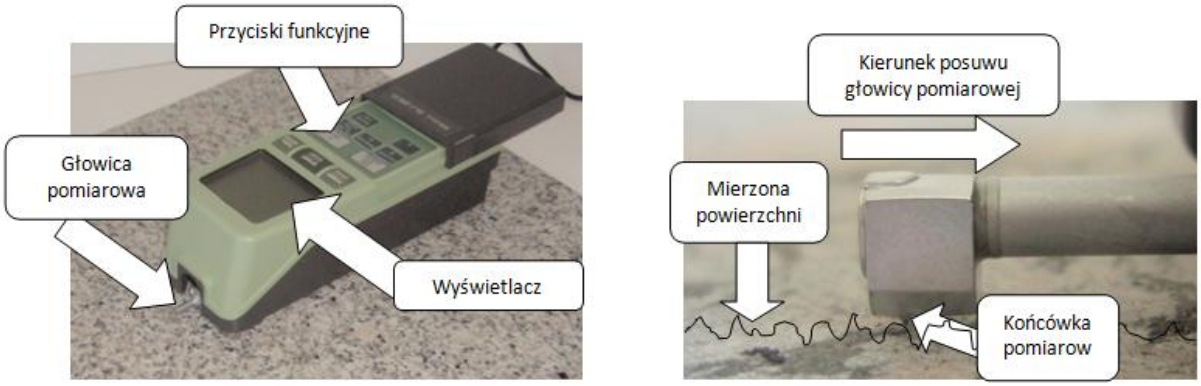


Fig. 4. The measuring device Surftest SJ-201P Mitutoyo

The speed of feed unit with the measuring tip radius 5□ *m* and pressure of 0.004 *N* in the course of the measurement is 0.25 ÷ 0.5 mm / s. Roughness measuring range is within +/- 150 □m. The length of the measurement section can be freely set within a range between 0.3 mm and 12.5 mm [10].

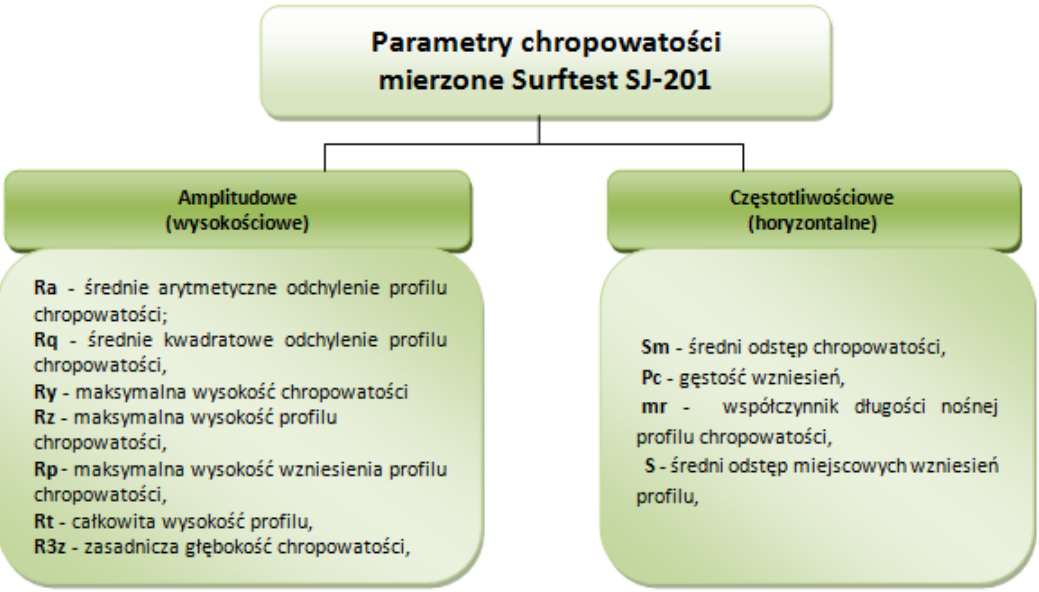


Fig. 5. The roughness parameters measured with meter Surftest SJ - 201

Diamond measuring tip sliding over to the test surface captures inequalities in the measured element, automatically calculating the value of individual roughness parameters as described in the diagram in Fig. 5.

The amplified signal can be converted to numerical values of the parameters and roughness or registered as profilogram of horizontal and vertical magnification. The contact method of measuring the roughness is the most popular nawadays and it has become the universal standard on the basis in the roughness measurement.

Inaccuracy of profilometer measurement may be affected by the following factors:

- Measuring head needle damage, inaccurate setting on the surface;
- Feed drive system – wear, pollution of bearings, rails and gears, mechanical vibration, uneven feed;
- System of amplifiers and filters – an indication outside the range of ½ - 2/3, too short measurement section;
- Head assembly – incorrect settings in relation to the measured surface, wrong electrical connections;
- The impact of environment – mechanical vibration, fluctuations in voltage.

7. Measurement of surface roughness with a profilometer Surftest SJ-201 P

In order to determine the roughness of the stone surfacet, the parameter defined as the Ra ratio (*mm*) is defined, which is the arithmetic mean of the absolute values of the profile deviations from the mean line y in the range of the elementary section (Fig.6). The measurement of roughness parameters was performed using the already mentioned meter Surftast SJ-201, which has been described in technical and range aspects. For the measurement of the overall length of the measuring section LN was set at 12.5 mm, on the assumption that it is divided into 5 elementary sections lr. The length of the elementary section was determined on the basis of normalised values given in the literature [10]. For each sample taken after 50 measurements, one location does not reflect the results for the entire test sample. The locations of measurement were selected randomly. A Ra parameter is determined by the relation given below:

$$Ra = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |y(x)| dx \qquad (1)$$

To illustrate a specific parameter from the above relationship a graphical principle for determining the ratio Ra is shown in Fig. 6.

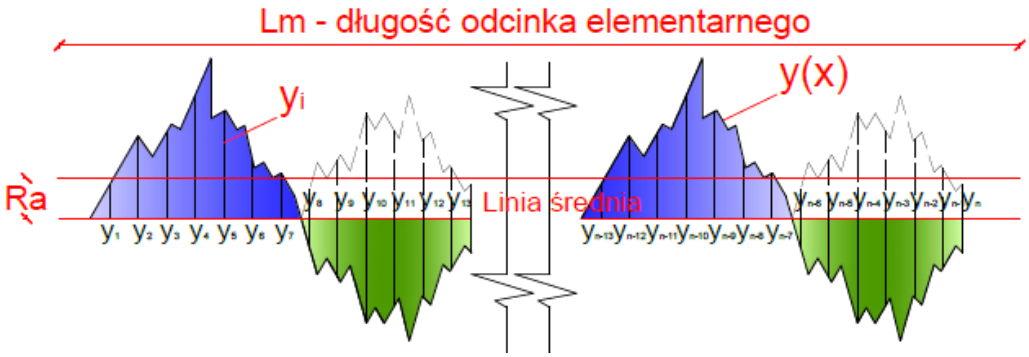


Fig. 6. Graphic interpretation of the parameter Ra.

8. Geometry of abrasive tools

Being one of the most important efficiency factors of the grinding process, the selection of the abrasive elements geometry, is accurately described in presentations of research results published in the sources of literature [1,5].

The effectiveness of the impact of the working element on the treated surface is determined by the length of a contact line describing the working tool surface in relation to the workpiece surface □S1 □S2 material and is generally expressed as a dependent function Sg of the grating geometry and the kinematics of the machining tool:

$$S_g = f(V_p, V_{or}, D); \tag{2}$$

where:

S_g – impact efficiency of the working piece in the form of a line on a workpiece surface [*m*]

V_p – forward speed of a grinding machines [*m* / *s*]

V_{or} – the grinding disc rotational speed [*r* / *s*]

D – diameter of the disc of assumed geometry [*m*].

Fig. 7 presents the impact effectiveness of the new working tool geometric design. The new form of the tool ensures an even distribution, effectivenessand impact of a work item, with a single cycle on the work surface. The efficiency of the working piece was tested and compared to the construction known from practice illustrated in Fig. 7*b*.

It is important for the optimization of processes of stone surfaces grinding to use disc working tools with determined degree of impact on geometric shape, size and arrangement of processed pieces on the surface of the disc and verify the roughness of the surface after a single toolpath on the workpiece.

9. Analysis of the results of the roughness measurement parameter Ra

Statistical analysis is the subject of mathematical statistics research dealing with methods of statistical inference on the basis of an examination of the premises known as the test. In practice, we often encounter measurement of multiple measurements. During the measurement, so large errors are obtained,

that subsequent measurements of the same size produce different results. In this case, we need to analyse the statistical series of measurements and make the appropriate conclusions as to the size measured [11]. Taking into account the assumptions set out in the roughness measurement methodology and evaluation of trace obtained after one pass specifying geometry of cutting tool using checks with the assessment of roughness, we gain valuable clues concerning the principles which determine geometry of the abrasive element embedded in the machining disc.

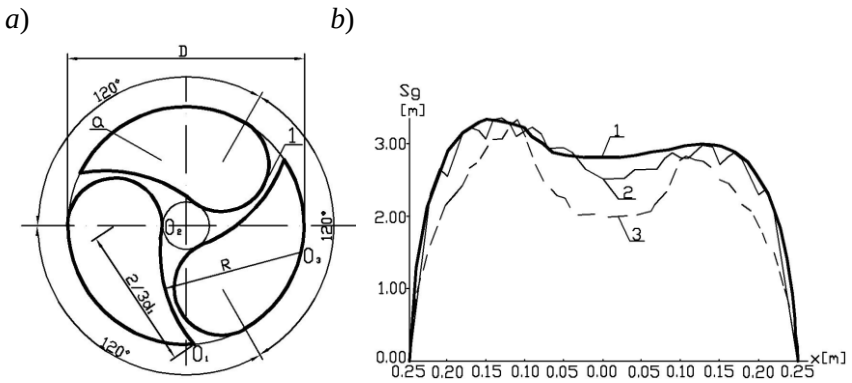


Fig. 7. a) The operating element with the new design geometric abrasive segments, b) Comparison of the a work item effect, with a single pass of the disc on the grinded surface 1-new design of the piece, 2,3-known practice solutions for the working elements.

Based on the literature [11] statistical relations were determined according to the mathematical symbols described in Table 1, which take into account the above complex problem of measurement in the research process.

Table 1. Basic statistical characteristics

Nazwa	Wzór	
Średnia arytmetyczna	$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$	(2)
Odchylenie standardowe	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$	(3)
Wariancja	$\hat{s}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$	(4)
Przedział ufności średniej (rozkład normalny)	$\bar{x} - u_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} < m < \bar{x} + u_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}}$	(5)

Symbols: x_i – the result of the ith measurement; n – number of measurements; and – the value of random variable.

Statistical analysis of experimental results were performed using the computer program Microsoft Excel.

In the statistical analysis of a series of measurement data, a range of the measured values of Ra were divided from min. to max. In this way, the measured values were calculated and the expected roughness parameter for a 95% confidence interval were determined.

Of the total number of measurements taken for the disc F54 largest dimension measured frequency was within the range 2.6 ÷ 3.4 *Pm* which gives 36% of all measurements. The lowest frequency measured came out between 5.8 ÷ 6.6 microns and gave 2% of measurements. When analysing the frequency value most awaited measurements, they were within the range of 3.4 ÷ 4.2 microns and represented 25.99% of all measurements on the treated surface of the shield dimension of the abrasive grain F54 (Table 2*a*).

For disk granulation F100, the highest measured frequency is in the range of 3.86 ÷ 4.39 .mu. m and 30% of the measurements. While 4% percent of the measurements is obtained for the lowest frequency measured within the range of 5.45 ÷ 5.98 mm. According to the analysis of the frequency, the most expected value measurements come within the range of 3.86 ÷ 4.39 microns and represent 22.52% of all measurements (Table 2*b*).

Table 2. Analysis of the frequency of a series of measurement data parameter Ra for the grinded surface sample: a) a disc with the grain size F54, b) a disc with the grain size F100, b) a disc with the grain size F220, c) a disc with the grain size F320, d) a disc with the grain size F400

a)

Lp.	przedziały	częstość mierzona w liczbie pomiarów	częstość mierzona w procentach	częstość oczekiwana w liczbie pomiarów	częstość oczekiwana w procentach
1	1,8	0	0	1,87	3,73
2	1.8-2.6	4	8	4,76	9,51
3	2.6-3.4	18	36	9,75	19,49
4	3.4-4.2	11	22	13,00	25,99
5	4.2-5.0	11	22	11,28	22,55
6	5.0-5.8	2	4	6,37	12,73
7	5.8-6.6	1	2	2,34	4,68
8	6.6-7.4	3	6	0,56	1,12
9	7,4	0	0	0,10	0,19

b)

Lp.	przedziały	częstość mierzona w liczbie pomiarów	częstość mierzona w procentach	częstość oczekiwana w liczbie pomiarów	częstość oczekiwana w procentach
1	2,27	0	0	1,77	3,55
2	2.27-2.8	7	14	3,86	7,73
3	2.8-3.33	7	14	7,77	15,55
4	3.33-3.86	10	20	11,10	22,21
5	3.86-4.39	15	30	11,26	22,52
6	4.39-4.92	4	8	8,11	16,22
7	4.92-5.45	5	10	4,15	8,29
8	5.45-5.98	2	4	1,50	3,01
9	5,98	0	0	0,47	0,94

c)

Lp.	przedziały	częstość mierzona w liczbie pomiarów	częstość mierzona w procentach	częstość oczekiwana w liczbie pomiarów	częstość oczekiwana w procentach
1	1,22	0	0	2,92	5,84
2	1.22-1.71	8	16	4,99	9,97
3	1.71-2.2	11	22	8,67	17,33
4	2.2-2.69	11	22	11,02	22,04
5	2.69-3.18	9	18	10,26	20,51
6	3.18-3.67	3	6	6,99	13,97
7	3.67-4.16	4	8	3,48	6,96
8	4.16-4.65	4	8	1,27	2,54
9	4,65	0	0	0,41	0,83

d)

Lp.	przedziały	częstość mierzona w liczbie pomiarów	częstość mierzona w procentach	częstość oczekiwana w liczbie pomiarów	częstość oczekiwana w procentach
1	0,57	0	0	4,31	8,63
2	0.57-1.09	12	24	6,41	12,82
3	1.09-1.61	14	28	9,96	19,92
4	1.61-2.13	12	24	11,25	22,50
5	2.13-2.65	4	8	9,23	18,46
6	2.65-3.17	3	6	5,50	11,00
7	3.17-3.69	0	0	2,38	4,76
8	3.69-4.21	5	10	0,75	1,50
9	4,21	0	0	0,20	0,41

e)

Lp.	przedziały	częstość mierzona w liczbie pomiarów	częstość mierzona w procentach	częstość oczekiwana w liczbie pomiarów	częstość oczekiwana w procentach
1	0,28	0	0	3,72	7,44
2	0.28-0.48	12	24	5,99	11,98
3	0.48-0.68	11	22	9,75	19,50
4	0.68-0.88	9	18	11,43	22,86
5	0.88-1.08	9	18	9,65	19,30
6	1.08-1.28	4	8	5,87	11,73
7	1.28-1.48	3	6	2,57	5,13
8	1.48-1.68	2	4	0,81	1,62
9	1,68	0	0	0,22	0,43

The measured parameter *Ra* of the treated surface of granite slabs, using a shield grit F220 shows the highest incidence measured in the range of 1.71 ÷ 2.2 microns and 2.3 ÷ 2.69 microns for a total of 44% of the measurements of the sample. The lowest frequency measured in 6% is received between 3.18 ÷ 3.67 mm. The frequency analysis shows that the most common and the least expected one is in the range of 2.2 ÷ 2.69 microns (Table 2*c*).

Measurement data for the disc with the grain size F320 show the most frequently measured roughness parameter in the third range, in the number 14 which represents 28% of all measurements. The most expected frequency for this disc is 22.5% (Table 2*d*).

The results of the greatest frequency measured for the last disc appeared in the range of 0.28 - 0.48 microns and for the expected frequency in the range of 0.68 - 0.88 microns which respectively provide the 24 and 22.86 percent of all measurements (Table 2*e*) .

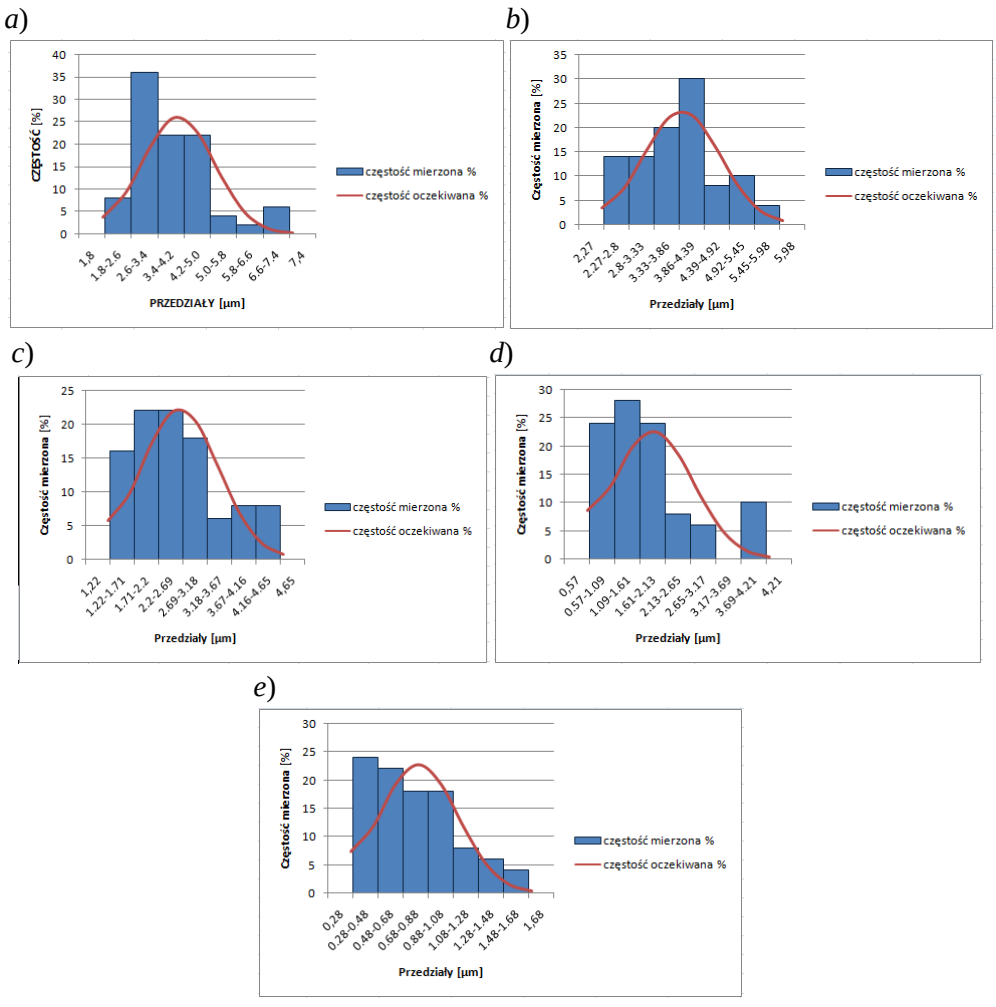


Fig. 6. Comparison of the parameter Ra of the measured frequency with theoretical distribution for the discs of the grain size: a) F54, b) F100, c) F220, d) F320, e) F400

The graph below (Fig. 6) shows visible differences between the distribution of empirical and theoretical normal distribution.

With the assumed distribution of confidence the measurement result of the parameter Ra for granulation F54 (Fig. 6*a*) will be contained in a closed interval limited to 3.6 microns ÷ 4.27 microns. This means that 95% of the result of measurement for the surface roughness Ra of the disc should be within that range.

The surface treatment with disc F100 (Fig. 6*b*) gives the results between 3.63 .mu. m and 4.13 .mu. m which shows that the parameter *R* should be in the predetermined range.

In Figure 6c you can also see the significant difference between empirical and theoretical distribution. The measurement result is between 3.63 mm ÷ 4.13 mm.

In the chart of a disc having the grain size F320 (Fig. 6*d*) at the range 3.17 mm ÷ 3.69 mm we can notice the absence of a measured value, and in the range 1.56 mm ÷ 2.06 mm measurement result contains 95% probability.

For the last disc, ie. grit F400 (Fig. 6*e*) there is a visible difference between the frequency measured and expected. The confidence interval for this disc fits within 0.68 mm ÷ 0.87 mm. Also for this disc and disc grit F220 and F320 it can be seen a significant shift of empirical distribution to the left.

9. Conclusions

Making a comparison of machined plates roughness according to the PN - EN 12057 - "Natural stone products. Modular plates. Requirements. "PN-EN 12058" Natural stone products. Floor slabs and stairs. Requirements. "PN - EN 1469" Natural stone products. Drywall panels. Requirements. "and BN 84 / 6740-02 and PN - EN 12057 and measurements made with profilometer Mitutoyo, following conclusions were made.

Surface treatment with an abrasive tool with the highest granularity, ie. F54 gives an average value of Ra 3.94 microns which in relation to the standard BN 84 / 6740-02 qualifies it as a fully polished surface.

Referring the above result parameter Ra to PN - EN 12057, the treated surface shows a variable structure geometry of roughness during the sensory evaluation. It resembles more a matte finish than the coarsely machined surface, which according to this standard should take place at the surface treatment with a disc of F60 grain size.

For the remaining granulation, ie. F100, F220, F320 and F400, the requirements set forth in the above standards also are not reflected in the uniform measurements obtained for roughness Ra. Standard BN 84 / 6740-02 refers only to a depth of scratches without specifying how they are measured and what parameter they are specified with. While the PN - EN 12057 divides the polished surfaces only on the size of grain used during the treatment, which does not refer at all to the geometry of the workpiece surface.

The provision of high-quality machined surface depends not only on the abrasive tool but also on the geometry of the work so that we can get a more uniform ground or a treatment surface. As a result of this work, we should expect to reduce the power needed to drive the blade, thereby, to reduce the energy consumption and increase productivity.

REFERENCES

[1] Rajczyk J., Kosiń M., Methodology of Analyzing a New Geometry Design of a Friction Plate Effect on the Engineered Surfaces, 3rd International Conference on Contemporary Problems in Architecture and Construction; Beijing; China; 20 November 2011 through 24 November 2011.

[2] Rajczyk J., Modelling the geometric structure of concrete work item processing, 2nd International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, ICCAHE 2013; Zhuhai; China; 27 July 2013 through 28 July 2013.

[3] Rajczyk Z., praca doktorska niepublikowana.

[4] Rajczyk J., Kosiń M.: Technological processes in natural stone processing with recommendations of processing tools evaluation, 6th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction; Ostrava; Czech Republic; 24 June 2014 through 27 June 2014.

[5] Rajczyk J., Systematic motion path of manual floats for concrete surface, 3rd International Conference on Contemporary Problems in Architecture and Construction; Beijing; China; 20 November 2011.

[6] PN - EN 12057. Wyroby z kamienia naturalnego. Płyty modułowe. Wymagania.

[7] PN –EN 12058. Wyroby z kamienia naturalnego. Płyty posadzkowe i schodowe. Wymagania.

[8] PN – EN 1469. Wyroby z kamienia naturalnego. Płyty okładzinowe. Wymagania.

[9] BN – 84/6740-02. Obróbka kamienia. Terminologia. Pojęcia podstawowe, nazwy, określenia czynności i rodzaju faktur.

[10] Instrukcja obsługi Miernik chropowatości SURFTEST SJ – 201.

[11] J. Gałązka-Friedman, K.Szlachta: Jak opracować i interpretować wyniki pomiarów. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.

УДК 625.655.3; DOI 10.1872/MMF-2016-80

J. Rajczyk[1], P. Rajczyk[2]

PROCESS COSTS RATIONALISATION – CONSTRUCTION WORKS CASE STUDY

[1]J. Rajczyk, Czestochowa University of Technology, Poland, д.т.н., профессор, Честоховский технический университет, Польша

[2]Paweł Rajczyk, Czestochowa University of Technology, Poland, студент, Честоховский технический университет, Польша

Abstract

The selection of most favourable solution meeting the task criteria is usually preceded with variant solutions. Various variants influence on useful, technical and economic properties is considered. The problem with finding the optimal solutions is related to difficulties with locating the proper measure for different solutions of the same task. Individual solutions are diversified due to their features. One of the typical features of the construction business is the production system complexity. In the construction processes, the final effect emerges out of the collection of multiple, subsequent operations. The designing and further implementation stages require joining them together in manner to have the effects achieved with smallest possible time, energy and materials investments. Engineering bill (including calculation and cost estimate) helps to optimise the structure, technology and organisation of production basing on minimum cost principle. One of the basic aspects used for rentability assessment and comparison of different variants is the complete total cost of an investment.

Key words: costs rationalization, construction works, optimization, construction cost.

Optimization is a scientific area covering the methodology of optimal activity solutions selection. The selection consists in determining an optimal solution, in terms of the predefined criteria. Whenever several criteria are considered, we deal with polyoptimisation.

The selection of most favourable solution meeting the task criteria is usually preceded with variant solutions. Various variants influence on useful, technical and economic properties is considered. The widest possible solutions collection is created, in order to meet the assumed conditions. All options are possible in the solution search phase, as project includes alternative options.

When matching out a collection of variant solutions, the designer meets the limits related to the project task. These limits narrow the solutions range.

The problem with finding the optimal solutions is related to difficulties with locating the proper measure for different solutions of the same task. Individual solutions are diversified due to their features. It is not easy to find their common denominator and compare the indicators in different units, as designing is usually a multicriterial process and optimisation includes usually more than just one value. The problem in finding an optimal solution in particular case of construction works consists in lack of uniform optimal requirements to be potentially met by project solutions. A typical approach to the problem consists in assigning importance values to individual criteria. The hierarchy of significance may be determined with subjective assessment, considering the fact, that they happen to be often contradictory. Systemic procedure for engineering solutions acc to A.D. Hall is presented in figure 1.

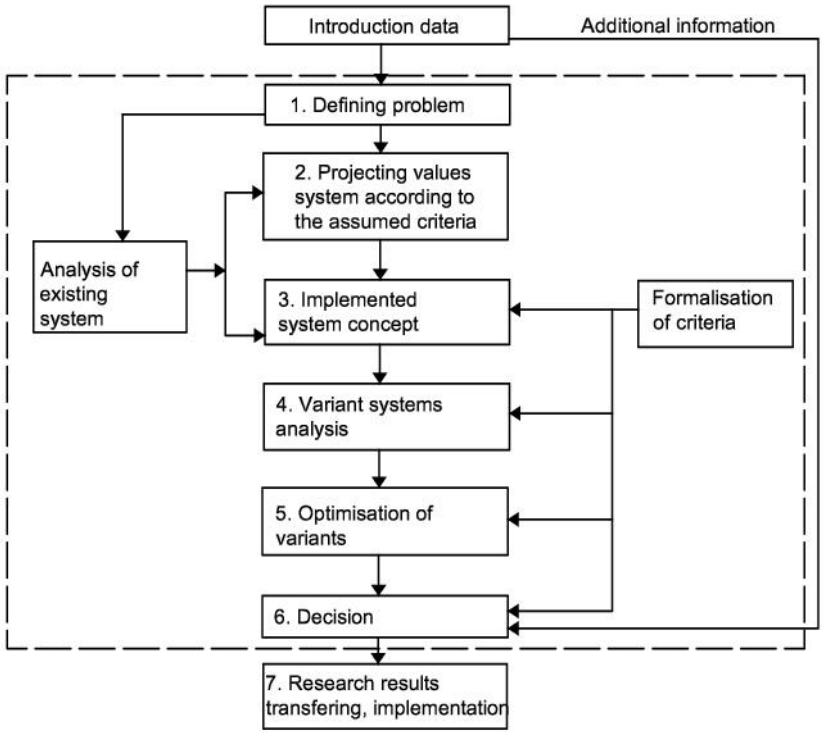


Fig. 1. Graphic model of a systemic solution procedure framework for any engineering problems. [3]

It seems, that the most relevant assessment criteria in the construction business should be: cost, time and quality. It is extremely difficult, or even

impossible to find the extreme values of these three factors simultaneously. The problem seems to be always on.

In the engineering practice, there are frequent questions asked about the multidimensional aims. For instance, a solution is searched, which could include maximum safety, optimal importance and minimum cost. We know, that such values are contradictory.

In practice, the most important (leading) criterion of optimisation is cost efficiency. Minimisation of cost is a global function, influenced by all components of the final construction effect.

As it is demonstrated by the figure 2, there is a model of technological process proving strict connection between the cost and technological process.

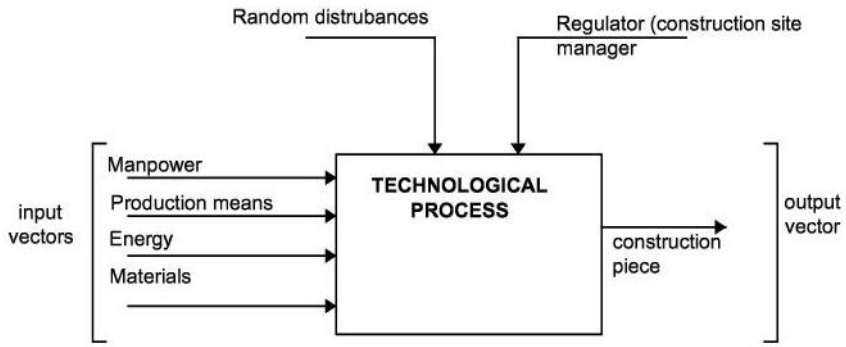


Fig. 2. Model of a technological process . [6]

Obviously, material costs in the technological process include:

- raw materials and materials,
- power consumption,
- production means (amortisation),
- manpower.

The technological model given proves that we need a solution meeting the criteria of technological balance equation:

$$V_d = f(V_e),$$

or

V_d= f[(manpower)(material)(machines)(energy)]
where V_d is output vector, and V_{eis} .is input vector.

The figure proves, that achieving maximum output vector requires:

1. optimal input vector form, achieved by proper qualitative and quantitative selection and coordination of manpower, resources and tools, with consideration of al l of their components,
2. optimal planning of the production process in all of its parameters,

3. organisation of an optimal production process regulator, which could facilitate its process and remove disturbances and blocks. [6, 7]

Engineering bill – costs estimates and calculations

One of the typical features of the construction business is the production system complexity. In the construction processes, the final effect emerges out of the collection of multiple, subsequent operations. The designing and further implementation stages require joining them together in manner to have the effects achieved with smallest possible time, energy and materials investments.

The market economy forces the consideration enterprises to assess their services under the cost efficiency criterion. As market economy and competitiveness develop, optimisation need becomes more and more vital in the construction activity. This concerns questions related to building itself, as the production organisation.

Optimisation management requires knowledge of objective measures reflecting the necessary work to be invested in its implementation. Such synthetic measure in the market economy is cost indicator. Estimating mutualcost indicators relations and production organisation results criteria belongs to the engineering bill. An engineer designing a facility should possess knowledge of cost settlements, as this gives one a power to form them right where they appear.

Engineering bill (including calculation and cost estimate) helps to optimise the structure, technology and organisation of production basing on minimum cost principle.

One of the basic aspects used for rentability assessment and comparison of different variants is the complete total cost of an investment. A document, which defines expenditures and value of the production means is called the cost etimate.

Construction cost estimate consists in determination of production methods and calculations of costs of individual works. Construction costs estimate requires consideration of local working conditions, enterprise production capacitites, production means and organisation.

Construction works assessment is based on cost estimate. The latter is a preliminary calculation, consisting in determination of quantity and value of potential and implemented manpower per facility [4]. Cost estimate works as a facility cost pattern. It helps to assess potential and implemented labour for the purposes of analysis and control of actual expenditures.

Cost estimates and related labour / production means comparisons constitute a base for:

- preparation of technology and work organisation project,
- production means consumption planning,
- construction financing programme,

- work progress and costs current control.

Cost calculations are used for measuring different production methods efficiency. They may constitute a basis for participation in public procurements and orders, which may decide on a company's survival.

The importance of cost estimates and calculations is shown by the following figure.

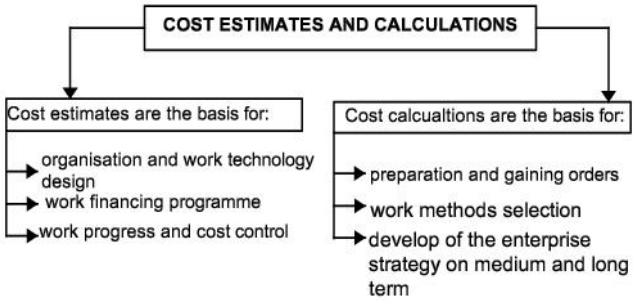


Fig. 3. Cost estimates and calculations in the construction business. [5]

In order to build up a construction production one needs to use manpower in definite period of time (both, physical and intellectual work), which also concerns the machines, devices and materials expenditures.

Each of costs responds to some task related norm. We can specify three types of expenditures:

- labour use norm,
- machine work norm,
- materials consumption norm.

Labour use norm (Np) defines the work of workers team or a single worker of average skills and regular effort required to perform a production unit of strictly defined task, in typical conditions, according to the work methodological and qualitative requirements. A unit used to measure labour use is a manhour, which is an hour of work of a single worker (m-h).

Machine work norm (Nm) means machine working time used to perform a production or service unit. This is defined in machine-hours (mch-h).

Materials consumption norm defines type and quantity of materials necessary to perform a production unit.

Quality norms are prepared by special normalisation departments in production plants, or such scientific institutions as e.g. Construction Technology Institute, or univesrities. Whenever a norm is valid just in one enterprise it is called the internal norm (ZN, or IN), whenever it proves to be useful in practice, this may be acknowledged as a branch norm (BN). Whenever a norm is confirmed as useful on a national level, it may become national (PN or NN), valid on all the state territory.

Construction works proces are estimated on the basis of cost estimates. Cost estimate derived price calculation (CK) may be simplified or complete.

Cost estimate price calculation CK acc to [2]. It is expressed by the following equation:

$$CK = R + M. + K_z + S + K_{p.} + Z + P$$

where:
K_z – materials purchasing costs,
K_p – intermediary costs,
Z – calculation profit,
P – tax (VAT).
K_p – intermediary costs – occur in the construction site and company management. They are added to the direct labour costs R and equipment costs, acc to equation:
$K_{p =} k_p$ (R+S)
k_p. – percentual indicator of intermediary costs share in an enterprise
R, M., S – direct costs: manpower, machines, equipment
The above equation helps to perform detailed CK.
R, M., S are defined as direct calculation prices
R = Si(i * nr * cr)
M. = Si(i * nm * cm)
S = Si(i * ns * cs)
where :
nr, nm, ns – unit norms,
cr, cm, cs – unit prices of R, M., S,
i – quantity of labour

Simplified method imcludes following CK equation

$$CK = Q * C_j + P.$$

where:
Q – labour units based on pre-measured works estimation,
C_j – labour unit price, including intermediary costs and profit.

According to the cost estimating guidelines of KNR, one may calculate only the value of these works, which is performed in compliance with a technology listed by KNR. Should any deviations from such technology be presumed, the executor needs to propose respective entry in cost estimate protocol. In this entry, the parties approve the post-executive cost estimate, with expenditures calculated acc to the abovementioned norms, regardless the actual works executon manner. After the works completion, the supervisory inspector may not correct the expenditures calculated acc to the protocol.

Construction works proces specification and methods of their creation

Construction business differs from other economy branches, particularly from industry in general. We do not deal here with serial production, but with individual product creation. Despite external, or use similarities in wida range normalisation and standarisation and typical projects, the costs of individual investments may considerably vary. These differences may result from diversified water conditions (which influences foundation costs), or local terrain conditions, such as: climate, access, landscape.

The buildings, unlike industrial products, have long production cycle and extremely vast range of operations necessary to create a single object. These factors and dependence on weather and climate make some of the circumstances influencing the final results impredictable. These circumstances, mostly random, may increase the costs and/or extend the work time. Construction work is related to a risk involving both, investor and executor. The abovementioned properties make the construction production very specific in its price creation.

The costs constitute a synthetic measure of all investment expenditures. They are, then, a value including all production factors necessary to perform a task in given circumstances with meeting the requirements of proper technology and organisation. Production unit sold value, expressed in pecuniary form represents price.

The price determination is based on costs. The price should include costs, assumed profit and all circumstances included in risk, fig. 4.

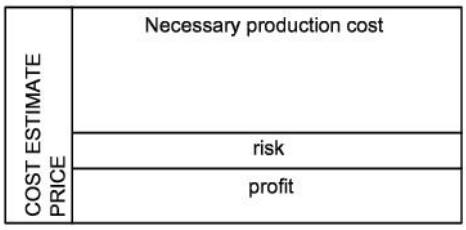


Fig. 4. Cost estimate price components [5]

One of the commonly known features of construction business is its high material consumption. Construction materials costs constitute the most often value increasing factor. Acc to Banach-Paszkiewicz [2] material costs in Polish construction business in years 1979-90 constituted around 50-60%.

Quantity of construction materials used in the construction makes the cost of the very same resistance and functionality parameters very much different. Right material selection should include usefulness and cost. First limitation is usually forced in the project, such as: work temperature, work environment etc.

The competition stimulates constant appearance of new and better materials in the market, more resistant polymers and more innovative composites. A designer strives for minimising the consumption of construction materials and to

assure structural safety according to valid norms. The design should include simplicity and functionality. The executory requirements should be simple, easy to meet in soonest time possible.

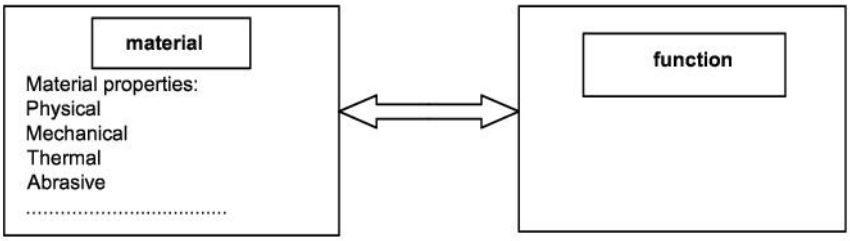


Fig. 5. Selection of material is determined with functions to be met by the product. [1]

Creation of any product requires proper investments of labour, materials and machinery.

Except the material, other cost building factors are manpower and machines. Coordination of labour and work objects is aimed at optimisation which is the main factor leading to raising competitiveness of the company products and achieving high efficiency standards. The technology optimisation process is often extended with machinery reliability issues and random disturbances. In this case it is mainly about meeting the assumed deadlines.

Construction work requires proper time for human and machine work. Efficiency and effectiveness of the construction depends mostly on technology project and organisation of works, which is an immanent part of technical design.

Construction planning and performance meets often problems with harmonisation of works with a line of technological and organisational limitations. The creation of a building complex may be subject to following factors:

- structure,
- assumed erection technology,
- mutual situation of objects,
- materials and equipment available.

The factor most vitally influencing works time efficiency with maintaining proper quality, seems to be the selection of machinery of required type and quantity. This is influenced by the following parameters:

- structure type,
- production technology,
- size and weight of the components,
- machines structure and characteristics,
- machines capacitites.

Equally important aspect influencing the production efficiency is continuity and timing of construction processes. These problems are usually related to construction site organisation issues.

Each construction enterprise has different level of organisation capacity, understood as relations between workers, machines, materials, which make the assumed results happen. Efficient functioning of an enterprise means not only resources, but also skills and their involvement in tasks achievement, which means getting maximum productivity with minimum of cost.

With small range of works on site, the direct costs (mapower, materials, equipment), may considerably rise. This is influenced by the following causes:

Manpower:

- small work area causing organisational issues,
- difficulties in selection of proper number of specialists,
- frequent changes of tasks given to the working teams.

Materials:

- necessity of warehousing,
- incomplete loading capacity used in transport.

Equipment:

- decreasing use of machinery because of lack of rentability,
- frequent rotation of equipment to/from the site.

The optimisation assumptions, based on engineering bill, cost remains a global function. However, the most rational and correctly designed structure is not always cheap. Higher costs may be reimbursed in e.g. longer life of a building, or its reliability, which decreases the expenses made on renovations.

The most simple economic criterion of industrial flooring selection is its cost. Smaller costs constitute an advantage of a given solution.

However, the creation of flooring itself, being dependent on other criteria, is too superficial to be treated as a main criterion. It does not consider such factors as durability, quality and maintenance. This makes one base the main criterion on something more compete, such as maintenance. Calculation variants, thus, need to be determined and compaired for the same quality and load bearing of the flooring.

Assuming n years of durability, the flooring costs after n years of use may be estimated according to the following pattern [8]:

$$K_n = K_b + K_b(M) + K_u + K_o$$

where:

K_n – flooring cost after n years,

K_b – construction cost,

M. – interest from capital invested in the flooring construction.

$$M = K_b(1 + i)^n$$

where:
i – discount,
K_u – current maintenance costs,
K_o – renovation costs.

Engineering bill acc to Rowiński and Jeżak should be the most popular tool of a construction engineer.

REFERENCES

[1] Ashby M.F., Dobór materiału w projektowaniu inżynierskim, WNT Warszawa 1998.
[2] Banach-Paszkiewicz H., Ekonomika inżynierska z kosztorysowaniem w budownictwie drogowym, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1998.
[3] Cyunel B., Banach-Paszkiewicz H., Organizacja i zarządzanie w drogownictwie, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1982.
[4] Jerzak M., Organizacja i ekonomika wykonawstwa budowlano-montażowego, PWN Warszawa 1990.
[5] Kowalczyk Z., Loska F., Kosztorysowanie w budownictwie, WsiP, Warszawa 1995.
[6] Lenkiewicz W., Technologia robót budowlanych, PWN, Warszawa 1985.
[7] Rajczyk J., EVTJUKOV S.A., Sizikov S.A., Organizacija kompleksno-mechanizirovannych rabot v stroitel'stve. Ucebnoe posobie, Gosudarstvennyj Architekturno-Stroitel'nyj Universitet, Sankt-Peterburg, 1999.
[8] Rolla S., Projektowanie nawierzchni. WKŁ Warszawa 1979.

УДК 621.81; DOI 10.1872/MMF-2016-81

С.А.Соколов

МОДЕЛЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ

Сергей Алексеевич Соколов, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
E-mail: sokolov-sa@rambler.ru

Аннотация

Предложена модель упругопластического деформирования элемента конструкции, содержащего концентратор напряжений. Модель позволяет наглядно представить процесс деформирования под действием нерегулярного циклического нагружения с учетом нестационарности циклических свойств материала. Модель может быть реализована в среде Mathcad. Модель предназначена для анализа эксплуатационного нагружения конструкций и деталей при прогнозировании их прочности и сопротивления малоцикловой усталости.

Ключевые слова: концентратор напряжений, упругопластическое деформирование, циклическое нагружение.

В металлических конструкциях и деталях машин усталостные повреждения и разрушения в большинстве случаев возникают в концентраторах напряжений. Для прогнозирования этих повреждений необходимо знать распределение напряжений в этих местах и характер их изменения в процессе эксплуатационного нагружения [2,5,8,10,11]. Поле напряжений в объектах сколь угодно сложной формы при монотонном нагружении, в том числе с учетом упругопластических свойств материала, может быть рассчитано методом конечных элементов. Однако моделирование упругопластического деформирования материала в области концентратора напряжений при циклическом нагружении представляет определенные сложности при использовании как аналитических, так и численных методов. Особые сложности возникают при необходимости учета циклической нестабильности механических свойств материала [4,12]. Параметры изменения механических свойств материала при циклическом нагружении исследуются на образцах без концентраторов по известным методикам, но при применении этих параметров к деталям с концентраторами приходится вводить ряд допущений, которые применимы только в простых случаях нагружения и деформирования [1,2,4-7,9].

Для решения указанной проблемы в настоящей работе предложена модель упруго-пластического деформирования элемента конструкции или детали в условиях неоднородного напряженного состояния. Модель дает упрощенную картину напряженно-деформированного состояния материала в вершине концентратора, но позволяет наглядно проследить процесс деформирования при нерегулярном нагружении и нестабильных циклических свойствах материала. В качестве исходных данных в этой модели используются:

– значения предела текучести материала $\sigma_т$ в зоне концентратора;

– параметры циклической нестабильности материала, если таковая имеется;

– результаты упругого анализа напряженного состояния элемента конструкции, который дает значение теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ и коэффициента жесткости напряженного состояния в вершине концентратора $\eta = \sigma_I / \sigma_e$ [3], (σ_I – первое главное напряжение, σ_e – эквивалентное напряжение по теории Мизеса).

Допущения, принятые для построения модели:

а) Пластическая зона в области концентратора охватывает не более 10–20% площади сечения элемента конструкции. При этом в сечениях, расположенных на некотором удалении от зоны концентрации напряжений, напряженное состояние элемента не зависит от пластических процессов, происходящих в концентраторе.

б) Диаграмма деформирования стали при циклическом нагружении описывается с помощью обобщенного принципа Мазинга [5].

Для моделирования напряженно-деформированного состояния части элемента конструкции с концентратором напряжений используем стержневую систему, состоящую из двух стержней (рис. 1). Стержень 1 длиной L_1 и площадью сечения A_1 является моделью материала в той части сечения, которую не затрагивает концентрация напряжений. Он при всех нагружениях остается в упругом состоянии. Стержень 2 длиной L_2 и площадью сечения A_2 моделирует деформации материала в упругопластической зоне. Верхние концы стержней соединены и перемещаются совместно. Обозначим $\varphi = \dfrac{A_2}{A_1 + A_2}$.

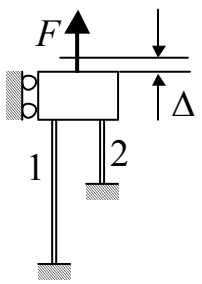


Рис.1. Стержневая модель упруго-пластической системы

Диаграмма деформирования материала стержня 1 описывается законом Гука

$$e_1 = \frac{\sigma_1}{E}. \qquad (1)$$

Упруго-пластические свойства материала стержня 2 опишем степенной зависимостью относительной деформации от напряжения, которая в нулевом полуцикле имеет вид [4,5,6]

$$e_2 = \begin{cases} \dfrac{\sigma_2}{E} & \text{при } \sigma_2 \le \eta\sigma_т; \\ \dfrac{a}{2}\left[\dfrac{\sigma_2}{E} + \dfrac{\eta\sigma_т}{E}\left(\dfrac{\sigma_2}{a\eta\sigma_т}\right)^{\frac{1}{m}}\right] & \text{при } \sigma_2 > \eta\sigma_т; \end{cases} \qquad (2)$$

а при следующих полуциклах нагружения как

$$e_2 = \frac{a}{2}\left[\frac{\sigma_2}{E} + \frac{\eta\sigma_т}{E}\left(\frac{(\sigma_2 - \sigma_{2c})(-1)^k}{a\,\eta\sigma_т}\right)^{\frac{1}{m}}\right]. \qquad (3)$$

Здесь σ_1 и σ_2 – напряжения, соответственно, в стержнях 1 и 2; E – модуль Юнга; σ_{2c} – значение предыдущего экстремума напряжения σ_2; m – показатель упрочнения в упруго-пластической области; a – масштабный коэффициент, в соответствии с допущением «б» в нулевом полуцикле при $k = 0$ задается $a = 1$, а в последующих при $k = 1, 2, 3, \ldots$ $a = 2$. Показатель упрочнения может быть определен экспериментально или вычислен по рекомендациям [4,12].

На всех этапах деформирования стержневой системы, как при упругом, так и упругопластическом деформировании, выполняются условия равновесия и совместности деформаций. Запишем их в дифференциальной форме как

$$d\sigma_n(A_1 + A_2) = d\sigma_1 A_1 + d\sigma_2 A_2. \qquad (4)$$

$$d\Delta = de_1 L_1 = de_2 L_2. \qquad (5)$$

Здесь σ_n – номинальное напряжение нетто в сечении детали с концентратором; Δ – перемещение связанных концов стержней (рис.1). Выражение (5) не учитывает изменение длин стержней L_1 и L_2 при деформировании, так как при справедливости допущения «а» влияние этого фактора будет пренебрежимо мало.

В нулевом полуцикле при $\sigma_2 \le \eta\sigma_т$ оба стержня деформируются упруго и должно выполняться равенство

$$d\sigma_2 = \alpha_\sigma d\sigma_n. \qquad (6)$$

Из равенства (6), используя выражения (5) и закон Гука, найдем соотношение длин стержней, которое примем, как параметр модели, то есть

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\alpha_\sigma(1-\varphi)}{1-\alpha_\sigma\varphi}. \qquad (7)$$

Таким образом, при упругом деформировании всей системы имеем

$$\begin{aligned} d\sigma_1 &= \frac{1-\alpha_\sigma\varphi}{1-\varphi}d\sigma_n; \quad de_1 = \frac{d\sigma_1}{E}; \\ d\sigma_2 &= \alpha_\sigma d\sigma_n; \qquad de_2 = \frac{d\sigma_2}{E}. \end{aligned} \qquad (8)$$

Для нахождения подобных зависимостей в условиях упругопластического деформирования системы, то есть при $\sigma_2 > \eta\sigma_т$, выразим из выражения (4) приращения напряжений в стержнях через приращение нагрузки $d\sigma_n$ как

$$d\sigma_1 = \frac{d\sigma_n}{1-\varphi+\varphi\dfrac{d\sigma_2}{d\sigma_1}} \qquad \text{и} \qquad d\sigma_2 = \frac{d\sigma_n}{\varphi+(1-\varphi)\dfrac{d\sigma_1}{d\sigma_2}}.$$

Из (5) и (7) найдем

$$\frac{de_1}{de_2} = \frac{1-\alpha_\sigma\varphi}{\alpha_\sigma(1-\varphi)}. \qquad (9)$$

Продифференцировав выражения (3) и подставив в (9) получим

$$\frac{d\sigma_1}{d\sigma_2} = \frac{1-\alpha_\sigma\varphi}{\alpha_\sigma(1-\varphi)}U_e,$$

где

$$U_e = \frac{a}{2}\left[1+\frac{1}{am}\left(\frac{(\sigma_2-\sigma_{2c})(-1)^k}{a\,\eta\sigma_т}\right)^{\frac{1}{m}-1}\right]. \qquad (10)$$

Таким образом, приращения напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании модели вычисляются как

$$\begin{aligned} d\sigma_1 &= \frac{(1-\alpha_\sigma\varphi)U_e}{\alpha_\sigma(1-\varphi)}d\sigma_n; \qquad de_1 = \frac{d\sigma_1}{E}; \\ d\sigma_2 &= \frac{\alpha_\sigma}{\alpha_\sigma\varphi+(1-\alpha_\sigma\varphi)U_e}d\sigma_n; \quad de_2 = U_e\frac{d\sigma_2}{E}. \end{aligned} \qquad (11)$$

Значение параметра φ установлено по результатам сравнения с данными конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния деталей с концентраторами и принято φ = 0,15.

Представленный алгоритм моделирования упругопластического дефомирования материала в концентраторе не сложно реализовать, например, в среде Mathcad. Блок-схема программы показана на рис.2.

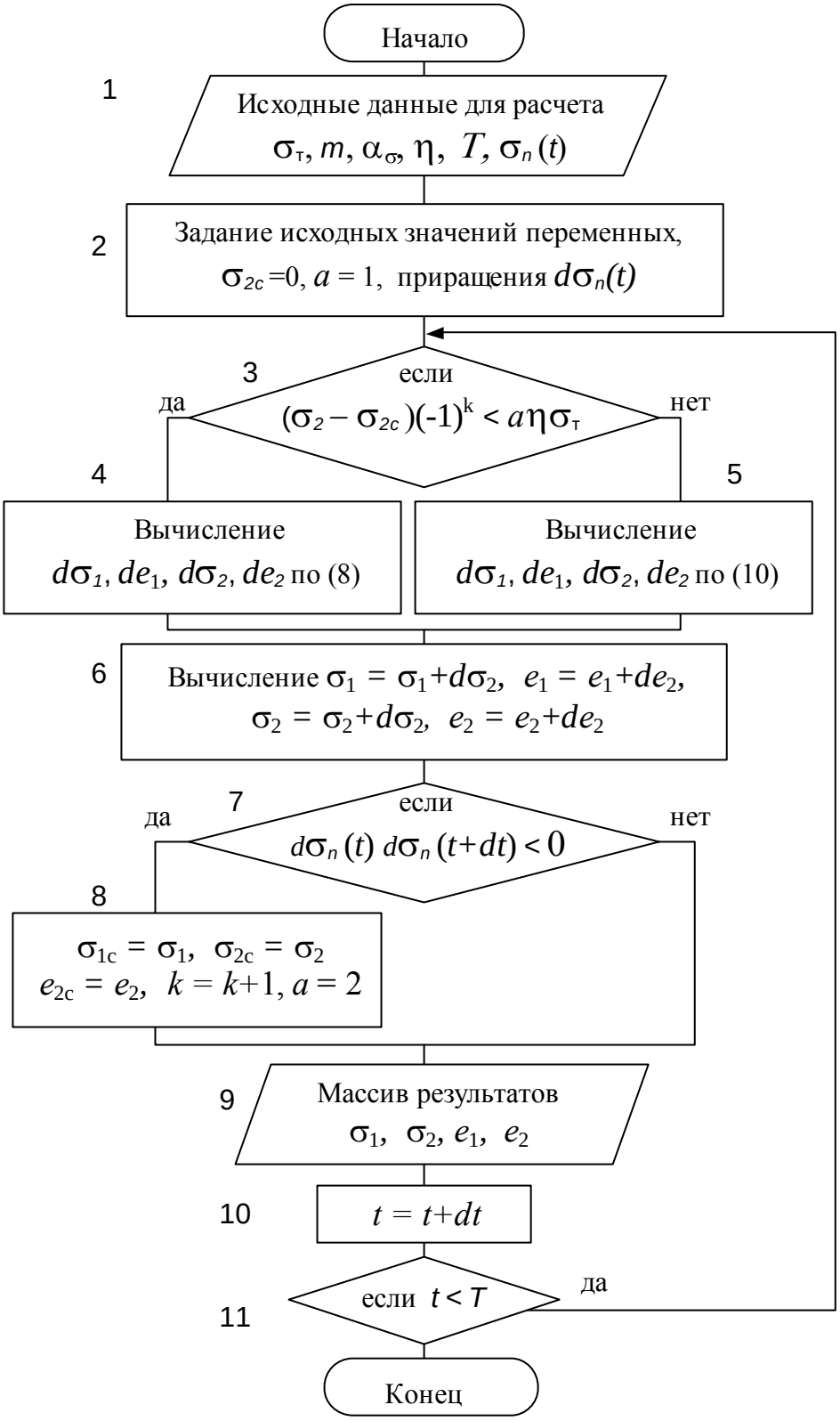


Рис. 2 Блок-схема алгоритма расчета процесса упруго-пластического деформирования материала в концентраторе.

В этой схеме блок 7 определяет момент перехода процесса нагружения через экстремум. Схема может быть дополнена в блоке 8 алгоритмом учета параметров циклической нестабильности материала. В качестве исходных данных могут быть введены технологические остаточные напряжения в концентраторе, например, как $\sigma_2 = \sigma_{2r}$ и $\sigma_1 = -\sigma_{2r}\,\varphi/(1-\varphi)$.

Проверка адекватности предложенного алгоритма была выполнена путем сравнения с результатами конечно-элементных расчетов. В качестве двух концентраторов использованы полосы с круговым отверстием и с краевым вырезом (модели 1 и 2). С учетом свойств симметрии конечно-элементные модели отражали только четверть этих объектов с заданием соответствующих граничных условий по линиям отсечения. Третий концентратор представляет собой фрагмент тонкостенной коробчатой конструкции (модель 3, рис.3, а, б). Эта конечно-элементная модель закреплена по контуру *A* и нагружена поперечной силой *F*, приложенной в плоскости фланца. Наибольшая концентрация возникает в зоне *B*. Во всех моделях использовались пластинчатые элементы (plate). Модели имели следующие параметры:

модель 1: $\alpha_\sigma = 2{,}3$; $\eta = 1{,}0$; $\sigma_n = 200$ МПа;

модель 2: $\alpha_\sigma = 3{,}9$; $\eta = 1{,}0$; $\sigma_n = 162$ МПа;

модель 3: $\alpha_\sigma = 3{,}8$; $\eta = 1{,}1$; $\sigma_n = 176$ МПа.

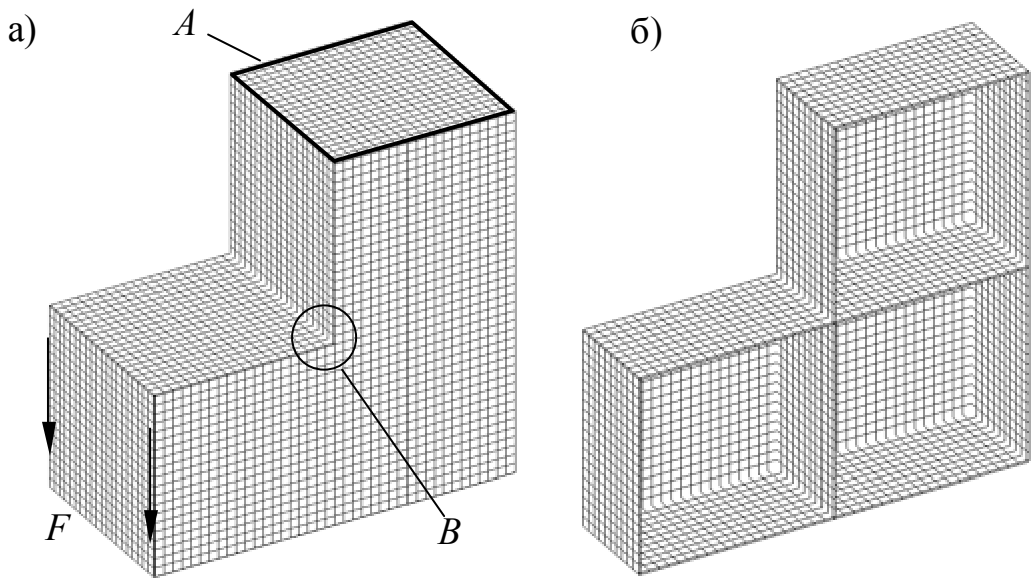


Рис.3. Конечно-элементная модель тонкостенной коробчатой конструкции (а) и ее разрез (б).

Теоретический коэффициент концентрации напряжений для всех моделей вычислялся как $\alpha_\sigma = \sigma_{\mathrm{I}}/\sigma_n$. В модели 3 происходил изгиб

пластинчатых элементов, поэтому все напряжения для этой модели вычислялись как средние по двум сторонам элемента. Материал моделей имел диаграмму деформирования по выражениям (2) и (3), предел текучести $\sigma_т$ = 300 МПа и показатель упрочнения m = 0,21. Все модели подвергались одному циклу, который состоял из нагружения и разгрузки (отнулевой цикл).

Результаты расчета процесса деформирования материала в вершине концентратора представлены в виде графиков в координатах $\sigma_x - e_x$, то есть нормальное напряжение и линейная деформация, действующие в направлении, которое при растяжении концентратора совпадает с направлением первого главного напряжения (рис.4). Как видно предложенный алгоритм показал удовлетворительную сходимость с результатами конечно-элементного анализа. В частности оба варианта расчета дают близкие значения остаточных напряжений в концентраторе, возникающих в результате местной пластической деформации.

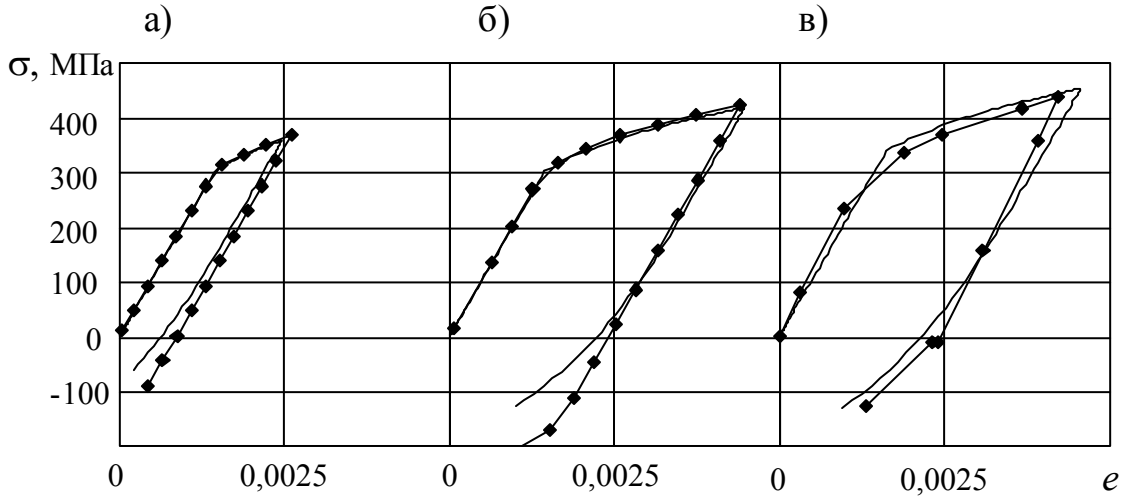


Рис.4. Графики деформирования материала в концентраторе, вычисленные МКЭ (–♦–) и по предложенному алгоритму **(–)**.

В алгоритм расчета могут быть введены свойства циклически разупрочняющегося или упрочняющегося материала. Для примера были рассчитаны кривые деформирования для образца без концентратора α_σ = 1 и φ = 0,99 при $\sigma_n > \sigma_т$ (рис.5, а) и с концентратором α_σ = 2,5 и φ = 0,15 при $\sigma_n < \sigma_т$ (рис.5, б) из упрочняющегося материала, для которого значение m, увеличивающееся от цикла к циклу, как $m_k = 1{,}1^k m_0$ (где k – номер полуцикла; m_0 – значение показателя для нулевого полуцикла). Как видно, образец без концентратора при мягком нагружении дает сужение петли гистерезиса при постоянном напряжении. В концентраторе петля

также сужается, но при этом растет напряжение. На рис.5, в, г показаны результаты расчета тех же образцов, но из разупрочняющегося материала с $m_k = 0,9^k m_0$. В этом случае петля гистерезиса в образце без концентратора существенно расширяется, а в концентраторе ее ширина меняется очень мало.

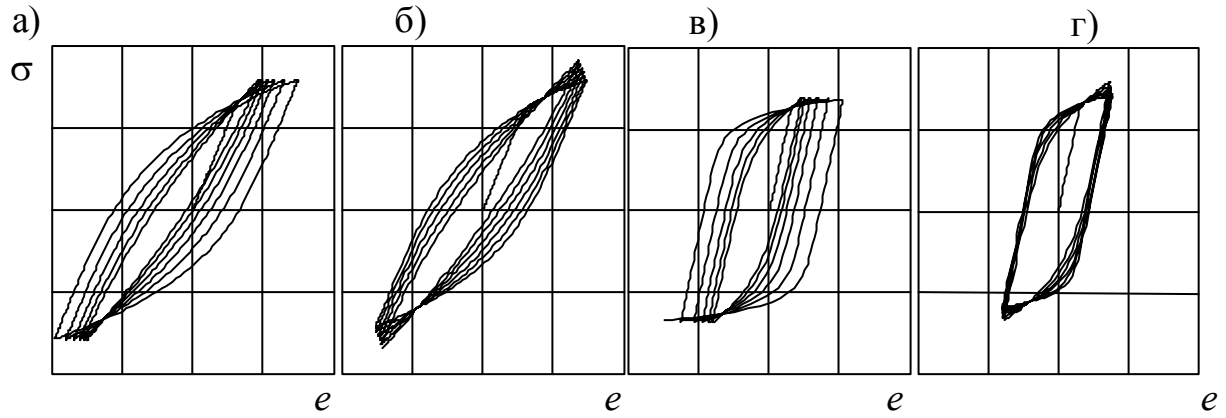


Рис.5. Кривые деформирования для образцов из упрочняющегося (а, б) и разупрочняющегося материала (в, г).

Таким образом, предложенная модель упругопластического деформирования материала в концентраторе позволяет анализировать кинетику процесса деформирования при произвольном процессе циклического нагружения, заданного функцией $\sigma_n(t)$, и с учетом нестабильности циклических свойств материала. Этот аппарат необходим для прогнозирования малоцикловой усталости и прочности высоконагруженных элементов конструкций и деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарь В.С., Бурчаков С.В., Даншин В.В. Математическое моделирование процессов пластичности и разрушения материалов при нестационарных и несимметричных циклических нагружениях// Изв. Тул.ГУ. Естественные науки. – 2010. –Вып.1., –С. 64-74.
2. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: Справочник –М.: Машиностроение, 1985. –224с.
3. Копельман Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. –Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1978. – 232с.

4. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. –М.: Машиностроение, 1981. –272 с.
5. Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. –М.: Наука. 1981. –344с.
6. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев.: Наукова думка. 1971. –268с.
7. Фомичев П. А., Звягинцев В. В. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании// Проблемы прочности. – №3, –2000, –С. 37-45.
8. Хажинский Г.М. Модели деформирования и разрушения металлов. –М.: Научный мир. 2011. –321с.
9. Agrawal R., Uddanwadiker R., Padole P. Low Cycle Fatigue Life Prediction// International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. –Vol. 2, Issue 4, July 2014, –P. 5-15.
10. Borrego L. P., Abreu L. M., Costa J. M. Aanalysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys// Anales de mecánica de la fractura. –Vol. 20, –2003, –P. 179-184.
11. Daunys M., Norkuvienė D. Investigation of stress and strain state in concentration zones under low cycle loading// MECHANIKA. – 2007. –N2(64), –P. 5-11.
12. Klysz S. Load sequence influence on low cycle fatigue life// Technical sciences. –N 8, Y. –2005, –P.193-209.

S.A.Sokolov

THE MODEL OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION OF THE STRUCTURAL MEMBER

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia,

Abstract

The model of elastoplastic deformation of the structural member with stress concentrator was designed. The model allows to visualize the process of deformation under the influence of irregular cyclic loading, considering nonstationarity of cyclical properties of the material. The model can be implemented by using of PTC Mathcad. The model is designed for the analysis of operational loading on machine elements and structures to predict their strength and to low-cycle fatigue resistance.

Key words: stress concentrator, elastoplastic deformation, cyclic load.

REFERENCES

[1] Bondar V.S., Burchakov S.V., Danshin V.V. Mathematical modeling of materials plasticity and fracture under nonstationary and unsymmetrical cyclic loadings// News Tul.GU. Natural Sciences. 2010. Vol.1., pp. 64-74. (rus.)

[2] Kogaev V.P., Machutov N.A., Gusenkov A.P. The calculations of machine elements for strength and durability: Handbook. Moscow. Mashinostroenie, 1985. 224 p. (rus.)

[3] Kopelman L.A. Resistance of welded joints to brittle fracture. –L.: Mashinostroenie, 1978. 232 p. (rus.)

[4] Machutov N.A. Deformation criterias of fracture and the calculation of structural elements for strength. Moscow. Mashinostroenie, 1981. –272 P. (rus.)

[5] Moskvitin V.V. Cyclic loading of structural elements. Moscow. The Science. 1981. 344 p. (rus.)

[6] Troshchenko V.T. Fatigue and inelasticity of metals. Kiev.: Naukova dumka. 1971. –268 p. (rus.)

[7] Fomichev P.A., Zvjagincev V.V. Predicting the durability of bodies with notches on the local stress-strain state. Message 1: Determination of stresses and strains in the notch under cyclic elastoplastic deformation// Strength Problems. N3, 2000, pp. 37-45. (rus.)

[8] Chazynski G.M. Models of deformation and fracture of metals. Moscow. The Scientific World. 2011. 321 p. (rus.)

[9] Agrawal R., Uddanwadiker R., Padole P. Low Cycle Fatigue Life Prediction// International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. Vol. 2, Issue 4, July 2014, pp. 5-15.

[10] Borrego L. P., Abreu L. M., Costa J. M. Aanalysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys// Anales de mecánica de la fractura. Vol. 20, 2003, pp. 179-184.

[11] Daunys M., Norkuvienė D. Investigation of stress and strain state in concentration zones under low cycle loading// MECHANIKA. –2007. – N2(64), pp. 5-11.

[12] Klysz S. Load sequence influence on low cycle fatigue life// Technical sciences. N 8, Y. 2005, pp.193-209.

УДК 623.437.3.093; 629.03; 629.36; DOI 10.1872/MMF-2016-82

А.Н. Филиппов[1], А.В. Лозин[2], Н.Н. Демидов[3], Р.Ю. Добрецов[4]

ТРАНСПОРТНЫЕ ГУСЕНИЧНЫЕ МАШИНЫ: МЕХАНИЗМЫ ПОВОРОТА С НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

[1]Анатолий Николаевич Филиппов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: fil-spbpu@yandex.ru
[2]Андрей Васильевич Лозин, зав. лабораторией
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: lozin@pef.spbstu.ru
[3]Николай Николаевич Демидов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: ndemidov51@mail.ru
[4]Роман Юрьевич Добрецов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: dr-idpo@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы определения основных параметров и построения кинематических схем гиперболических механизмов поворота гусеничных машин. Особенностью данного типа механизмов является нелинейный (в рассматриваемом случае – гиперболический) характер зависимости между значениями расчетного (фиксированного) радиуса поворота и скоростью движения машины. В результате получены методологическая основа для построения кинематических схем таких механизмов и собственно схемы, целесообразные для реализации в составе трансмиссий современных быстроходных (транспортных) гусеничных машин.

Ключевые слова: поворот гусеничной машины, система управления движением, двухпоточный гиперболический механизм поворота, расчетный (фиксированный) радиус, устойчивость движения, оценка энергоэффективности шасси

Механизмы поворота обеспечивают криволинейное движение гусеничных машин за счет изменения сил тяги и скоростей перематывания гусениц по бортам.

Качество управления движением машины определяется техническими возможностями механизма поворота и его системы управления. Как правило, скорость машины в повороте ограничена угрозой начал заноса, что особенно актуально для быстроходных транспортных гусеничных машин. Помимо этого механизм поворота должен быть экономичным: для фрикционных механизмов характерно понятие расчетного (фиксированного) радиуса поворота. Данный радиус получают при отсутствии буксования в фрикционных элементах управления отстающего борта. Фиксированный радиус является минимальным на данном режиме работы механизма, увеличение радиуса сопровождается буксованием одного из ФЭУ отстающего борта и, соответственно, потерями энергии. Традиционные положения теории движения в части определения сил и моментов, действующих на гусеничную машину в повороте, можно найти в фундаментальных работах [1-4]. Основные положения этих работ будут использованы ниже.

В настоящее время теоретически и экспериментально доказано (в том числе исследованиями, проведенными в ЛПИ-ЛГТУ-СПбГТУ), что наиболее высокое качество управления движением гусеничной машины обеспечивают замкнутые системы управления поворотом [5]. Данное направление является одним из приоритетных в списке проблем, решаемых специалистами СПбПУ в области проектирования быстроходных гусеничных машин [6].

Таким образом, целесообразно использование механизмов поворота, обеспечивающих увеличение фиксированного радиуса поворота с ростом скорости движения машины нелинейно, в идеале – в соответствии с квадратичной зависимостью, характерной для случая ограничений радиуса поворота по заносу. Механизм должен работать в составе замкнутой (следящей) системы управления. В этом случае ожидается сочетание высокого качества управления поворотом с хорошей энергоэффективностью [7-10].

Применяемые в настоящее время механизмы поворота гусеничных машин, как одно, так и двухпоточные, базирующиеся на фрикционных и гидравлических трансформаторах крутящего момента, реализуют линейную связь между фиксированным радиусом и скоростью движения машины. Кинематические схемы механизмов и их подробный анализ представлены в работах [1,4,11]. В процессе исследований, на тот момент, когда уже были предложены основные расчетные модели и разработаны первые схемные решения нелинейных механизмов поворота, нам удалось обнаружить механизм, имеющий нелинейную характеристику [12,13],

оказавшийся потенциально работоспособным, но, тем не менее, на практике не применявшийся.

Задачами исследования является установление условий, при которых возможно обеспечить нелинейную характеристику механизма поворота, анализ потенциальных возможностей и предложение вариантов кинематических схем таких механизмов. Результаты работы ориентированы на применение в транспортном машиностроении: в первую очередь при проектировании быстроходных (транспортных) гусеничных машин. Предложенные методы расчета и математически модели актуальны также при работах над механизмами распределения мощности колесных машин [14 и др.].

В формальной постановке задача сводится к определению параметров и вариантов построения кинематической схемы механизма поворота, обеспечивающего повышение средней скорости движения машины $V_{ср}$ и наилучшую энергоэффективность шасси (то есть минимизацию дополнительных затрат мощности при повороте), оцениваемую, например, значением коэффициента энергоэффективности D:

$$\begin{cases} V_{ср} \to \max \\ D \to \max \end{cases}$$

Максимальное значение средней скорости движения огранено в первую очередь угрозой потери устойчивости машины в результате заноса или опрокидывания. Для транспортной гусеничной машины характерно низкое расположение центра масс, и частичный занос наступает, как правило, раньше опрокидывания [15]. Таким образом

$$V_{ср} \to V_{\mu}(\mu_{max}, \rho, g, q_M).$$

В последнем выражении в качестве аргументов функции критической скорости V_{μ} перечислены: максимальное значение коэффициента сопротивления повороту, относительный радиус поворота (определен, как отношение радиуса поворота к ширине колеи $\rho=R/B$), ускорение свободного падения, кинематический параметр механизма поворота [15]. Таким образом, критическая скорость определяется условиями движения [16], некоторыми размерами опорной поверхности машины и особенностями кинематики механизма поворота. Поскольку скорость движения оказывается связанной с радиусом поворота, в некоторых случаях она будет ограничена возможностью передачи силы тяги гусеницей забегающего борта (например, на грунтах со слабым поверхностным слоем или при недостаточной квалификации механика водителя). В любом случае скорость движения не может превышать максимальной скорости, ограниченной в данных условиях движения по мощности двигателя машины.

Методика обобщенной комплексной оценки энергоэффектиности шасси гусеничной машины представлена в работах [9,10], а особенности

оценки энергоэффективности механизмов поворота рассматриваются в статьях [7,8]. Значение показателя D находится в общем случае в интервале [0,1]. Для относительно дешевых вспомогательных транспортных машин D<0,40. Для шасси основного танка получены значения D>0,80, причем выявлены резервы для повышения эксплуатационных характеристик серийно выпускаемых машин без существенного увеличения себестоимости шасси [5,7-10,17,18]. Таким образом, можно записать

$$D \to 1.$$

Линейный характер зависимости фиксированного радиуса поворота от скорости движения машины $\rho_ф(V)$ в большинстве механизмов обусловлен постоянством угловой скорости поворота машины в плане, считая постоянной скорость первичного двигателя. Получить нелинейную зависимость, используя в трансмиссии традиционные для гусеничных машин планетарные механизмы, гидростатические или электромеханические передачи возможно за счет организации подвода мощности к параллельному потоку двухпоточной трансмиссии с линейно уменьшающейся скоростью при росте скорости основного потока [19]. Другие механизмы поворота не смогут обеспечить достаточное качество управления поворотом на высоких скоростях. На рис. 1 показаны кинематическая схема привода параллельного потока мощности (для случая трансмиссии с центральной коробкой передач) и план угловых скоростей этого механизма.

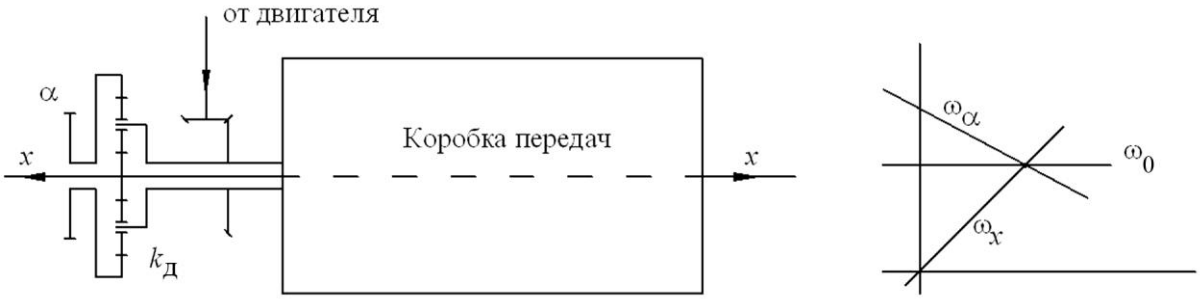


Рис. 1. Схема дифференциала привода ветви механизма поворота и вид плана угловых скоростей такого дифференциала

Привод параллельной ветви осуществляется от звена α (эпициклическая шестерня механизма). Дифференциал позволяет разветвить поток мощности от двигателя (приводится на водило, звену присвоен индекс 0, совпадает с входом коробки передач) на вход параллельной ветви (выводится на эпицикл, звену присвоен индекс α) и на выход коробки передач (выводится на солнечную шестерню, звену присвоен индекс x). Дифференциал характеризуется кинематическим параметром (внутренним передаточным отношением) $k_д = u^0_{x\alpha}$.

Для получения зависимости величины фиксированного радиуса поворота от гаммы передаточных отношений коробки передач рассмотрим

структуру трансмиссии в обобщенном виде (рис. 2, [15]). Данная структура предусматривает, что солнечные шестерни суммирующих рядов остановлены при прямолинейном движении машины – вариант, наиболее часто встречающийся в реализованных схемах двухпоточных механизмов. Перед входом в коробку передач поток мощности двигателя разветвляется (здесь будем различать ветвь коробки передач *x* и ветвь механизма поворота *m*), а перед ведущими колёсами потоки мощности снова суммируются.

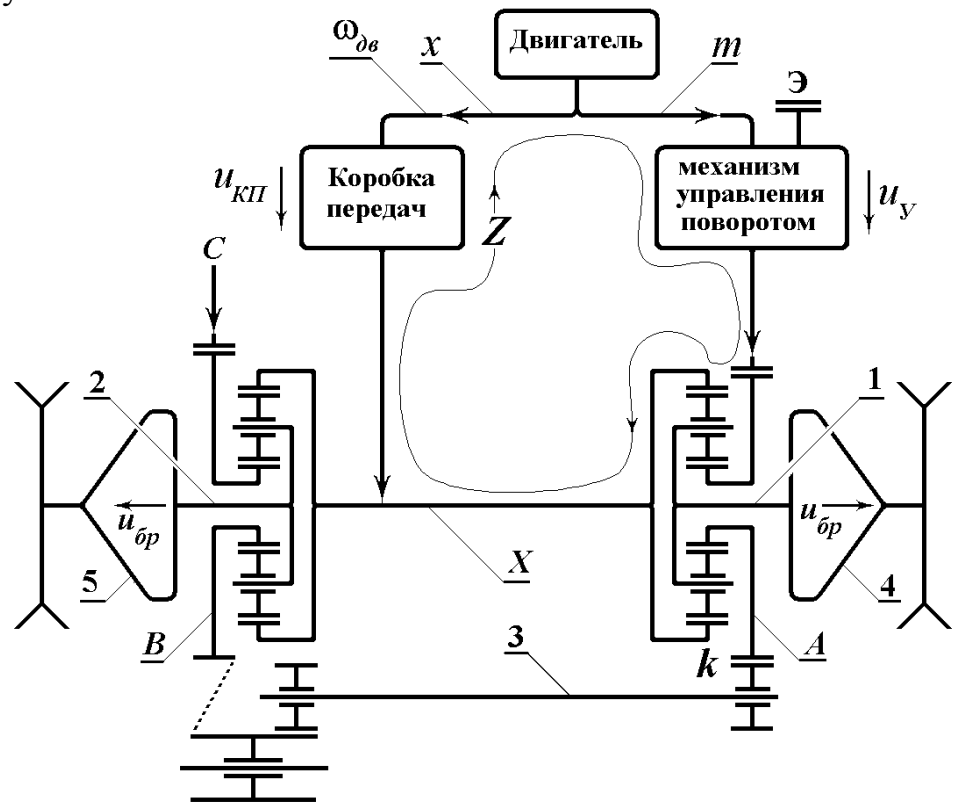


Рис. 2. Обобщённая схема двухпоточного дифференциального механизма передачи и поворота

Значение передаточного отношения $u_{\text{бр}}$ бортовых редукторов 5 и 6 (см. рис. 2) не влияет на передаточное отношение механизма поворота $u = \omega_2/\omega_1$. Поэтому в качестве ведомых звеньев бортов 1 и 2 приняты ведущие звенья бортовых редукторов. Эти звенья являются водилами суммирующих планетарных механизмов $1\frac{A}{X}$ и $2\frac{B}{X}$. Звено *X* приводится в движение коробкой передач. Звенья *A* и *B* связаны передаточным отношением $u_{AB} = -1$ посредством валика 3 и паразитной шестерни.

Ветвь механизма поворота приводит в движение звено *A* со скоростью вращения, управляемой элементом управления Э. Это тормоз или блокирующий фрикцион. Второй элемент управления для поворота в другую сторону (не показан) либо вращает звено *A* в обратном направлении, либо приводит в движение звено *B* в прямом направлении по

стрелке *C*. Использование гидрообъемной или другой непрерывной передачи не меняет логику рассмотрения.

Суммирующие планетарные механизмы характеризуются параметром $k = u_{AX}^{1} = u_{BX}^{2}$. Передаточные отношения ветви коробки передач и ветви механизма поворота при полном включении элемента управления Э (максимальных углах шайбы насоса аксиальной гидрообъемной передачи) известны и обозначены $u_{\text{КП}}$ и $u_{\text{уф}}$. При буксующем элементе управления (частичном угле шайбы насоса аксиальной гидрообъемной передачи) в ветви поворота устанавливается текущее передаточное отношение $u_{\text{у}}$. Данный подход изложен в работе [15] и применен здесь с необходимыми по содержанию задачи корректировками.

В механизмах трансмиссии (без учета введения дифференциала, не показанного на рис. 2) скорости вращения звеньев связаны следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \omega_A = k\omega_X + (1-k)\omega_1 \\ \omega_B = k\omega_X + (1-k)\omega_2 \\ \omega_A = -\omega_\alpha / u_{\text{у}} \\ \omega_B = \omega_\alpha / u_{\text{у}} \\ \omega_X = \omega_{\text{дв}} / u_{\text{КП}} \end{cases}.$$

Кинематика дифференциала описывается уравнением $\omega_X = k_{\text{д}}\omega_\alpha + (1-k_{\text{д}})\omega_{\text{дв}}$.

Отсюда $\omega_\alpha = \left[\omega_X - (1-k_{\text{д}})\omega_{\text{дв}}\right]/k_{\text{д}} = \omega_{\text{дв}}\left[u_{\text{КП}}^{-1} - (1-k_{\text{д}})\right]/k_{\text{д}}$. Введем обозначение $t = \left[u_{\text{КП}}^{-1} - (1-k_{\text{д}})\right]/k_{\text{д}}$ и запишем $\omega_\alpha = t\omega_{\text{дв}}$. Важно, что величина $t = t(u_{\text{КП}}, k_{\text{д}})$.

Решением системы уравнений является выражение передаточного отношения механизма поворота

$$u = \frac{u_{\text{у}} k u_{\text{КП}}^{-1} - t}{u_{\text{у}} k u_{\text{КП}}^{-1} + t}.$$

При $t = 1$ (что соответствует схеме на рис. 2), получим выражение, приведенное в работе [15].

Передаточные отношения механизмов, перечисляемые как множители первого слагаемого числителя, следуют по замкнутому контуру. Обозначим передаточное отношение замкнутого контура: $Z = u_{\text{у}} k u_{\text{КП}}^{-1}$.

Тогда выражение передаточного отношения механизма поворота принимает вид $u = (Z-t)/(Z+t)$.

Введение понятия замкнутого контура в рассматриваемом случае позволяет абстрагироваться от передаточных отношений отдельных элементов конструкции и сосредоточить внимание на одной её характеристике – передаточном отношении замкнутого контура *Z*.

При полном включении элемента управления поворотом передаточное отношение замкнутого контура равно известной величине

$Z_ф$. Относительный радиус поворота гусеничной машины связан с передаточным отношением между бортами выражение [15] выражением

$$\rho = 0{,}5\frac{u+1}{u-1}.$$

Тогда $\rho = -0{,}5Z/t$ и $\rho_ф = -0{,}5Z_ф/t$ (здесь $\rho_ф$ – относительный фиксированный радиус поворота (для механизма с гидрообъемной передачей – минимальный). При $t=1$ имеем частный случай этого выражения, приведенный в работе [15].

Сравним относительные фиксированные радиусы поворота, получаемые без введения дифференциала в ветвь механизма поворота и при наличии такового.

Произведем расчеты для следующего примера. Трансмиссия гусеничной машины характеризуется следующими величинами: $k=(-2{,}5)$; $u_у$=16, колея B=2,8 м. Передаточные отношения коробки передач $u_{КП}$ для пяти передач и режима «Стоп» и результаты расчетов приведены в табл. 1.

В табл. 1 для сопоставления приведены расчетные данные для частного случая при $t=1$ и результаты, полученные для значения $k_д=(-2)$.

Таблица 1

Радиусы поворота гусеничной машины

№	$u_{КП}$	$Z_ф$	$\rho_ф$	$\rho_ф(t)$	$((\rho_ф-\rho_ф(t))/\rho_ф)\cdot 100\%$
		$t=1$		$t=t(u_{КП},k_д)$	
Стоп	∞	0	0	0	0
1	8,0	–5,00	2,5	1,72	30,4
2	4,5	–8,88	4,44	3,20	28,0
3	2,8	–14,28	7,14	5,40	24,3
4	1,6	–25,00	12,5	10,52	15,8
5	1,0	–40,00	20,00	20,00	0

Таким образом, введение дополнительного дифференциала в привод ветви механизма поворота двухпоточного механизма поворота позволило получить меньшие фиксированные радиусы поворота на низших передачах. В случае первой передачи снижение достигает 30% по сравнению с вариантом непосредственного привода от ведущего вала коробки передач. Ожидается, что подобный эффект может быть достигнут и в том случае, если привод ветви механизма поворота будет осуществляться от соединительного звена планетарной коробки передач с тремя степенями свободы. При этом соединительное звено как минимум должно вращаться в одном направлении на всех передачах прямого хода.

Описанный подход был реализован на примерах трех кинематических схем (рис. 3-5). Схема, представленная на рис. 3, получена авторами независимо, однако в принципе соответствует предложениям, изложенным в авторском свидетельстве [12].

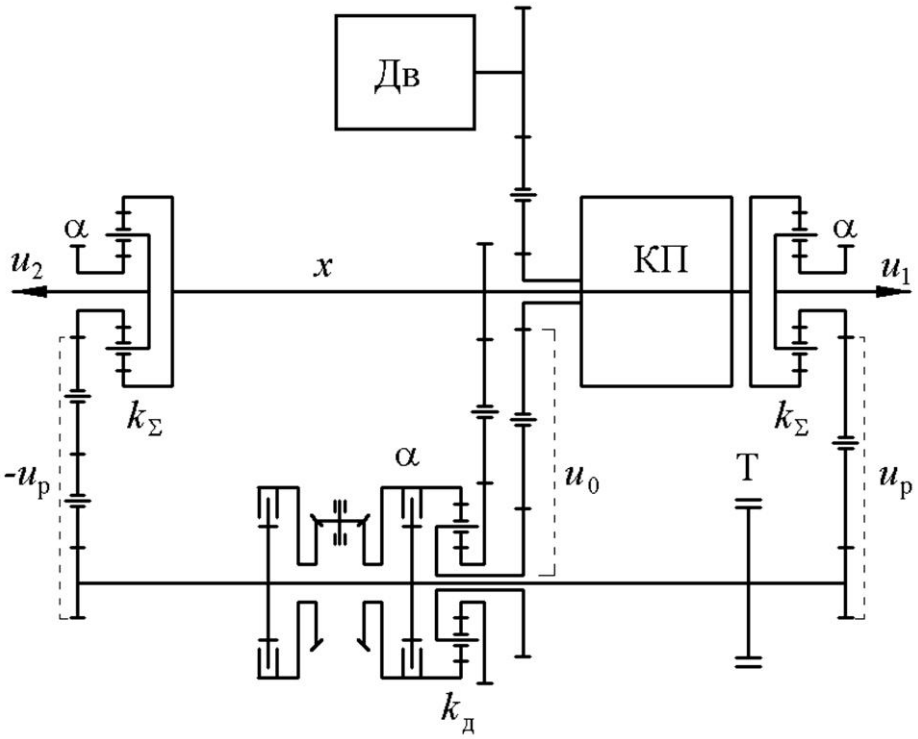


Рис. 3. Двухпоточная трансмиссия по а.с. 521174:
Дв – двигатель; КП – коробка передач

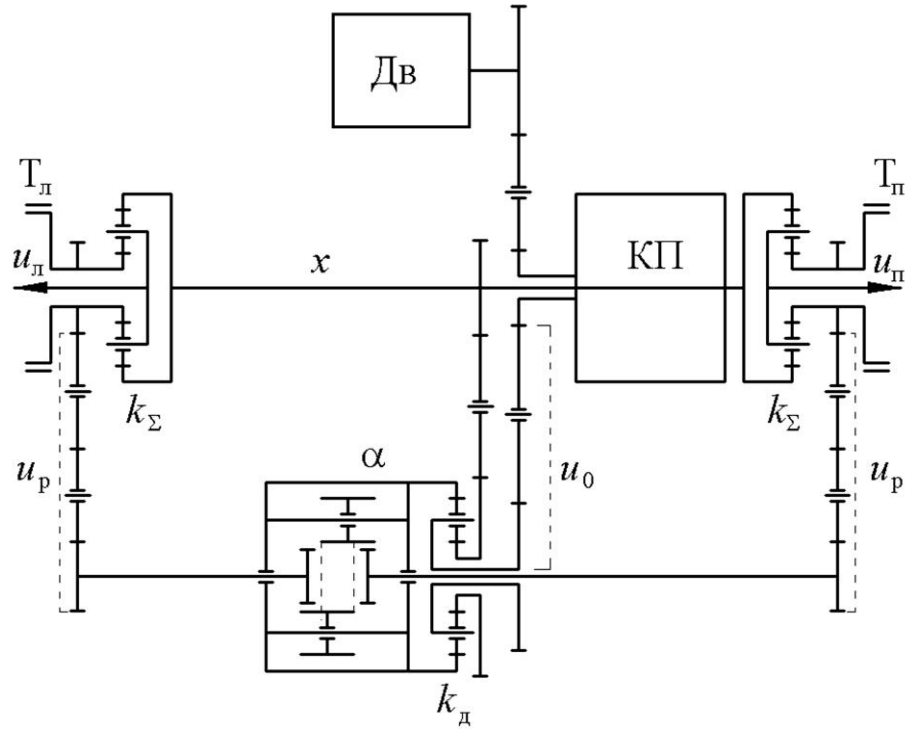


Рис. 4. Разработанная кинематическая схема двухпоточной трансмиссии:
Дв – двигатель; КП – коробка передач

Приведенная на рис. 5 кинематическая схема содержит гидрообъемную передачу.

Схемы представляют собой двухпоточные механизмы поворота с плоскими суммирующими планетарными механизмами Σ.

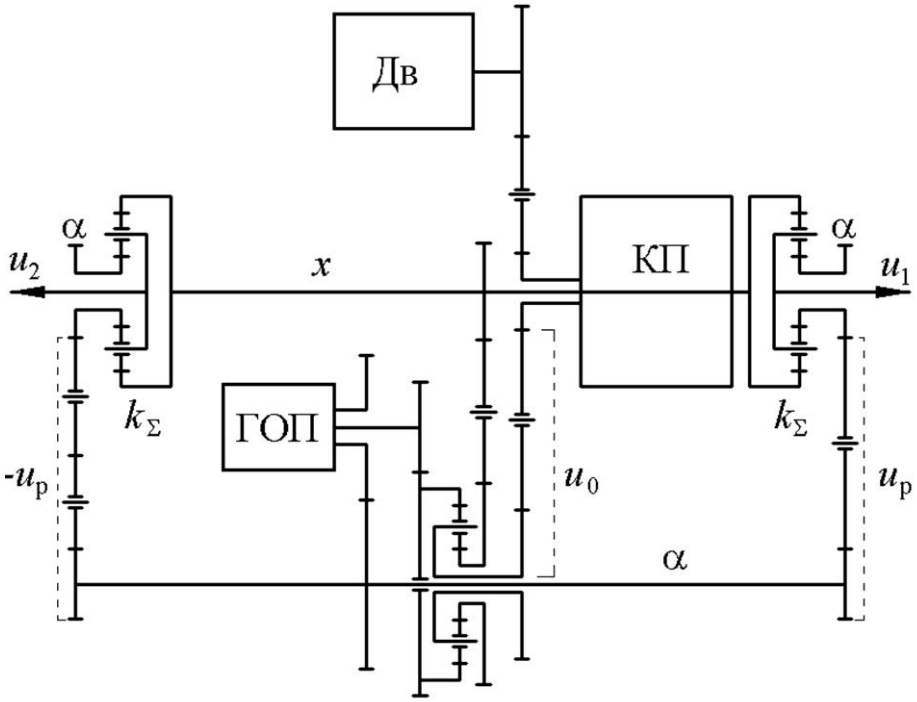


Рис. 5. Кинематическая схема двухпоточной трансмиссии:
Дв – двигатель, КП – коробка передач, ГОП – гидрообъемная передача

Один из потоков мощности от двигателя подводится к эпициклам суммирующих механизмов с ведомого вала КП. Второй к солнечным колёсам предварительно формируется в дополнительном планетарном механизме Д. Результирующий поток, снимаемый с эпицикла, является входным для механизма управления поворотом.

Относительные фиксированные радиусы схемы по рис. 3 и 4 описываются зависимостями:

$$\rho_\phi = -0{,}5 k_\Sigma u_р \bar{\omega}_x / \alpha \text{ и } \rho_\phi = 1 - 0{,}5 k_\Sigma u_р \bar{\omega}_x / \alpha .$$

В данных зависимостях: $\alpha = \left[\bar{\omega}_x - 1 - k_д / u_0\right] / k_д$; k_Σ и $k_д$ – внутренние передаточные отношения планетарных механизмов Σ и Д; $u_р$ – абсолютное значение передаточного отношения замыкающих редукторов (к солнцам суммирующих рядов); u_0 – передаточное отношение входного редуктора, связывающего вал двигателя и водило механизма Д; $\bar{\omega}_x$ – относительная скорость вращения ведомого вала коробки передач.

Выбор и расчёт параметров элементов схем механизмов поворота предлагается проводить следующим образом.

Реализуемая механизмом, схема которого приведена на рис. 3, гипербола по предварительной оценке наиболее близко соответствует квадратичной параболе, если точка пересечения их графиков соответствует скорости машины в диапазоне $(0{,}5\ldots0{,}7)v_{max}$.

Графики, приведённые на рис. 6, показывают, что гиперболические кривые на рассматриваемом интервале достаточно близки к параболе.

Точку пересечения гиперболы и параболы можно обеспечить при любой наперёд заданной скорости $\bar{v}_c = \bar{\omega}_x = v_c / v_{\max} = \omega_{xc} / \omega_{x\max}$.

Заданное согласование обеспечивается выбором $u_0 = (1 - k_д)/(1 - \bar{v}_c)$.

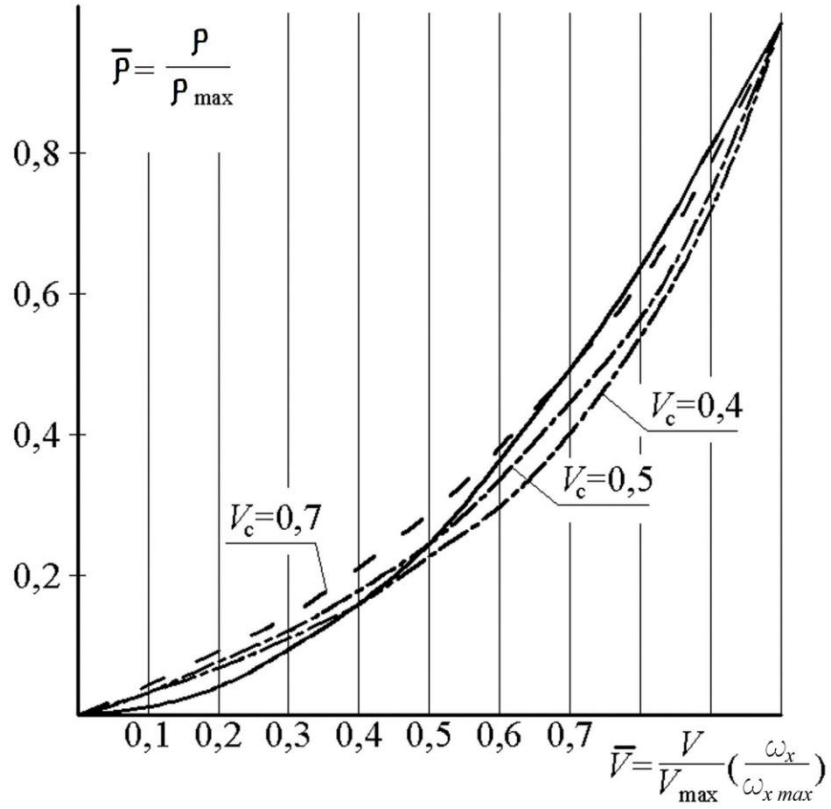


Рис. 6. Варианты согласования параметров механизма поворота: сплошной линией обозначена квадратичная парабола

Относительные фиксированные радиусы поворота при этом будут определяться зависимостью

$$\rho_ф = \frac{k_\Sigma k_д |u_р| \bar{v}}{2(\bar{v}_{\max} + \bar{v}_c - \bar{v})} = \frac{k_\Sigma k_д |u_р| \bar{\omega}_x}{2(\bar{\omega}_{x\max} + \bar{\omega}_{xc} - \bar{\omega}_x)}.$$

Максимальное значение расчётного радиуса $\rho_{ф\max} = 0{,}5 k_\Sigma k_д |u_р| / \bar{\omega}_{xc}$.

Внутренние передаточные отношения k_Σ и $k_д$ выбираются из конструктивных соображений. Заданное значение $\rho_{ф\max}$ обеспечивается выбором значений передаточных отношений $u_р$.

На рис. 7 представлены планы угловых скоростей элементов механизмов поворота по рис. 3 и 4.

На рис. 8 представлены схемы силовых потоков в механизмах при движении вперёд. Циркуляции мощности нет. На заднем ходу в обеих схемах механизмах есть контуры с циркулирующей мощностью.

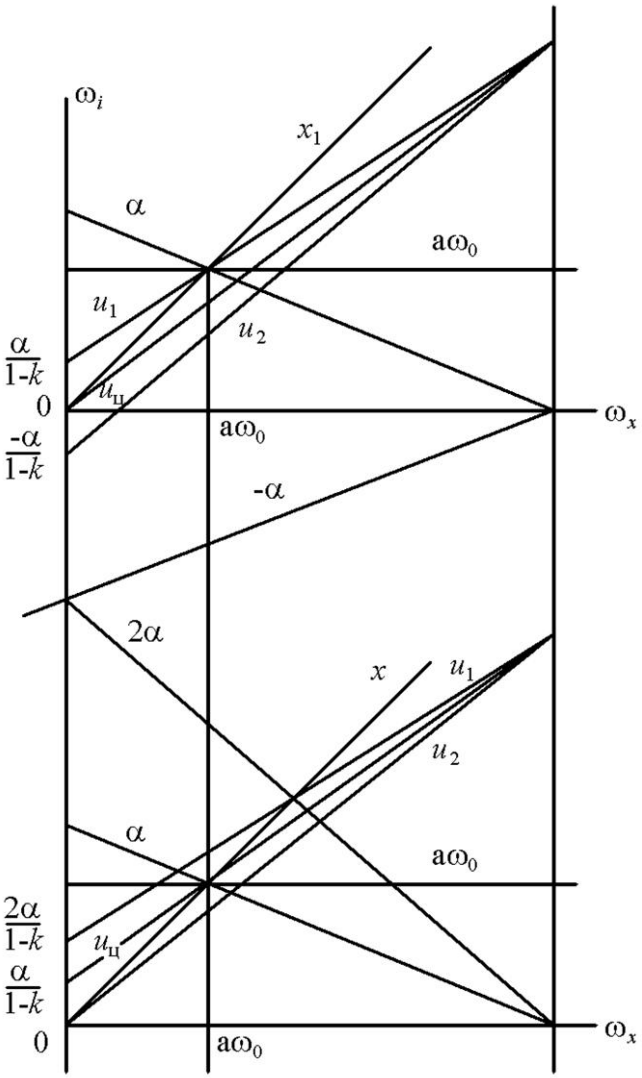


Рис. 7. Планы угловых скоростей для механизмов поворота:
вверху – по рис. 3; внизу – по рис. 4

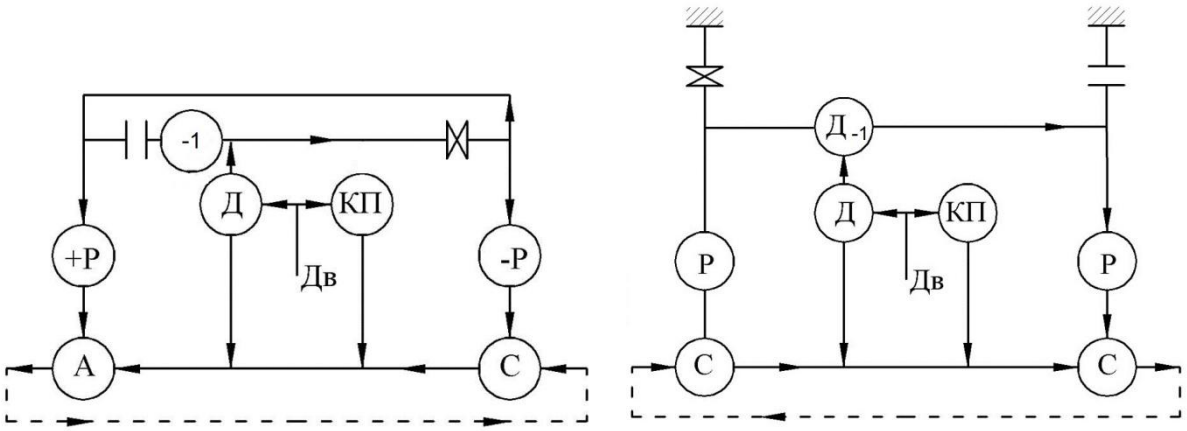


Рис. 8. Силовые потоки на передачах прямого хода:
слева – для схемы по рис. 3, справа – для схемы по рис. 4;
циркуляции мощности в трансмиссии нет

Основными результатами работы являются:

- принцип получения нелинейной (гиперболической) зависимости между фиксированным радиусом поворота и скоростью движения гусеничной машины;
- методика кинематического и силового анализа и основные технические характеристики (параметры) механизма поворота, полученные с ее использованием;
- кинематические схемы двухпоточных гиперболических механизмов поворота для машин с центральной коробкой передач; в параллельном потоке мощности могут быть использованы фрикционный трансформатор крутящего момента, гидростатическая или электромеханическая передача.

По результатам работы подана заявка на получение патента на изобретение.

Полученные результаты позволяют изменить подход к принципам поиска схемного решения механизма поворота и, при малых затратах по сравнению с существующими вариантами конструкций, повысить подвижность и экономичность гусеничной машины. Результаты применимы к трансмиссиям с центральной коробкой передач. Дальнейшие работы должны быть направлены на оптимизацию расчетных моделей для определения параметров гиперболических механизмов поворота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
2. Сергеев Л.В. Теория танка. – М: Издание Академии бронетанковых войск, 1973. – 492 с.
3. Bekker M.G. Theory of Land Locomotion. The Mechanics of Vehicle Mobility, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956. – 400 p.
4. Расчет и конструирование гусеничных машин: Учебник для вузов / Н.А. Носов, В.Д. Галышев, Ю.П. Волков, А.П. Харченко; Под ред. Н.А. Носова. – Л: «Машиностроение», 1972. – 559 с.
5. Замкнутые системы управления поворотом гусеничных машин / Галышев Ю.В. [и др.] // «Научно-технические ведомости СПбГПУ». №3, т. 2, 2014. – С. 201-209.
6. Исследования и разработки ученых СПбГПУ в области оборонной техники (по материалам IX-й международной выставки вооружения, военной техники и боеприпасов) / Галышев Ю.В. [и др.] // «Научно-технические ведомости СПбГПУ», серия «Наука и образование», №1, 2014. – С. 26-32.
7. Добрецов Р.Ю. Учет энергетических параметров механизмов поворота при комплексной оценке потерь мощности в шасси транспортных гусеничных машин // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Наука и образование», №1, 2011. – С. 122-128.
8. Добрецов Р.Ю. Поворот быстроходной гусеничной машины: определение параметров энергоэффективности шасси // Актуальные

проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение. Труды XLIII научно-практической конференции. Том 3 / под ред. В.А. Петрова, М.В. Сильникова, А.М. Сазыкина. – М.: Издание ФГБУ «Российской академии ракетных и артиллерийских наук», 2015. – 278 с. – С.103-111.

9. Добрецов Р.Ю. Оценка энергоэффективности шасси транспортных гусеничных машин // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая техника и вооружение. Труды XLII научно-практической конференции. Том 3 / под ред. В.А. Петрова, М.В. Сильникова, А.М. Сазыкина. – М.: Издание ФГБУ «Российской академии ракетных и артиллерийских наук», 2014. – 362 с. – С.168-177.
10. Добрецов Р.Ю. Объективная оценка технических характеристик шасси транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины – 2011. – №2 – С. 19-23.
11. Военные гусеничные машины. В четырех томах. Том 1. Устройство. В двух книгах. Учебник. Под ред. Э.К. Потемкина. – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990. – 380 с.
12. А. с. СССР № 521174 «Механизм поворота гусеничной машины» В.З. Изотов, В.А. Пятков, В.С. Старовойтов, А.А. Суслов, опубликовано 15.07.1976.
13. Механизм поворота гусеничной машины. Информация. // Вестник бронетанковой техники.– 1977. – № 6 – С. 40.
14. Дидиков Р.А., Добрецов Р.Ю. К вопросу о выборе кинематических схем шестеренчатых МРМ // Автомобильная промышленность: ежемесячный научно-технический журнал / Министерство образования и науки РФ; ОАО "Автосельхозмаш-холдинг". – М., 2014. – № 9. – С. 12-14.
15. Шеломов В.Б. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Тяговый расчет криволинейного движения: учебное пособие для вузов по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В.Б. Шеломов. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 90 с.
16. Теория и конструкция танка. Т.8. Параметры внешней среды, используемые при расчете танков. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
17. Добрецов Р.Ю. Особенности работы гусеничного движителя в области малых удельных сил тяги // Тракторы и сельскохозяйственные машины – 2009. – №6 – С. 25-31.
18. К методу оценки частоты импульсного управления поворотом гусеничной машины / Бойков А.В. [и др.] // «Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС. Межвузовский сборник» – Л., изд-во ЛПИ, 1987. – 96 с. – С.73-78.
19. О выборе рациональной схемы отбора мощности в двухпоточной трансмиссии транспортной гусеничной машины / Демидов Н.Н. [и др.] // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Бронетанковая

техника и вооружение. Труды XLII научно-практической конференции. Том 3 / под ред. В.А. Петрова, М.В. Сильникова, А.М. Сазыкина. – М.: Издание ФГБУ «Российской академии ракетных и артиллерийских наук», 2014. – 278 с. – С.111-116.

A.N. Filippov, A.V. Lozin, N.N. Demidov, R.Yu. Dobretsov

TRACKED VEHICLES: THE NONLINEAR STEERING MECHANISM

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

Kinematic layout and parameters of tracked vehicle steering mechanism are discussed. A feature of discussed type of mechanism is non-linear (definitely hyperbolic) dependence of the estimated radius of turn against vehicle velocity. The result is a methodological framework for elaboration of such mechanisms kinematics, suitable for implementation in modern tracked vehicles transmissions.

Key words: tracked vehicle steering, the motion control system, cross-drive hyperbolic steering mechanism, radius of turn, stability of motion, vehicle power efficiency evaluation

REFERENCES

[1] Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Fundamentals of the theory of tracked vehicle]. M.: Mashinostroenie, 1975, 448 p. (rus.)

[2] Sergeev L.V. Teoriia tanka [The theory of the tank]. M: Izdanie Akademii bronetankovykh voisk, 1973, 492 p.

[3] Bekker M.G. Theory of Land Locomotion. The Mechanics of Vehicle Mobility, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956. 400 p.

[4] Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Iu.P., Kharchenko A.P. Raschet i konstruirovanie gusenichnykh mashin [Calculation and design of tracked vehicles]. L: «Mashinostroenie», 1972, 559 p.

[5] Galyshev Yu.V. etc. Zamknutye sistemy upravleniia povorotom gusenichnykh mashin [Steering mechanism tracked vehicles]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU, seriia «Nauka i obrazovanie»*, 2014, N3-2, pp. 201-209.

[6] Galyshev Yu.V. etc. Issledovaniia i razrabotki uchenykh SPbGPU v oblasti oboronnoi tekhniki [Research and development of SPbSPU scientists in the field of defense equipment]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU, seriia «Nauka i obrazovanie»*, 2014, N1, pp. 26-32.

[7] Dobretsov R.Yu. Uchet energeticheskikh parametrov mekhanizmov povorota pri kompleksnoi otsenke poter' moshchnosti v shassi transportnykh gusenichnykh mashin [A record of the energy parameters of

the steering mechanism in the comprehensive assessment of power losses in the chassis of the tracked vehicle]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU, seriia «Nauka i obrazovanie»*, 2011, No1, pp. 122-128.

[8] Dobretsov R.Yu. Povorot bystrokhodnoi gusenichnoi mashiny: opredelenie parametrov energoeffektivnosti shassi [The rotation of tracked vehicle: definition of parameters of efficiency chassis]. APZiB, vol.3, 2015, pp. 103-111.

[9] Dobretsov R.Yu. Otsenka energoeffektivnosti shassi transportnykh gusenichnykh mashin [Evaluation of the efficiency chassis tracked vehicle]. APZiB, vol.3, 2014, pp. 168-177.

[10] Dobretsov R.Yu. Ob"ektivnaia otsenka tekhnicheskikh kharakteristik shassi transportnykh gusenichnykh mashin [Objective assessment of the technical characteristics of the chassis of the tracked vehicle]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny*, 2011, N2, pp. 19-23.

[11] Voennye gusenichnye mashiny [Military tracked vehicles], vol. 1. M: MGTU, 1990, 380 p.

[12] A. s. USSR № 521174 «Mekhanizm povorota gusenichnoi mashiny» [Steering mechanism tracked vehicle], 1976.

[13] Mekhanizm povorota gusenichnoi mashiny. Informatsiia [Steering mechanism tracked vehicle. Information]. *Vestnik bronetankovoi tekhniki*, 1977, N6, p.40.

[14] Didikov R.A., Dobretsov R.Yu. K voprosu o vybore kinematicheskikh skhem shesterenchatykh MRM [To the question about the choice of kinematic diagrams of gear mechanisms for power distribution]. *Avtomobil'naia promyshlennost': ezhemesiachnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal*, 2014, N9, pp. 12-14.

[15] Shelomov V. B. Teoriia dvizheniia mnogotselevykh gusenichnykh i kolesnykh mashin [Theory of motion of a multi-purpose tracked and wheeled vehicles]. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013, 90p.

[16] Teoriia i konstruktsiia tanka. T.8. Parametry vneshnei sredy, ispol'zuemye pri raschete tankov [Theory and design of the tank]. M.: «Mashinostroenie», 1987, 228 p.

[17] Dobretsov R.Yu. Osobennosti raboty gusenichnogo dvizhitelia v oblasti malykh udel'nykh sil tiagi [Features of work caterpillar drive in the region of low specific thrust forces]. *Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny*, 2009, N6, pp. 25-31.

[18] Boykov A.V. etc. K metodu otsenki chastoty impul'snogo upravleniia povorotom gusenichnoi mashiny [The method for estimation of the pulse frequency control the rotation of tracked vehicle]. Rabochie protsessy kompressorov i ustanovok s DVS. Mezhvuzovskii sbornik, Leningrad, LPI, 1987, pp. 73-78.

[19] Demidov N.N. etc. O vybore ratsional'noi skhemy otbora moshchnosti v dvukhpotochnoi transmissii transportnoi gusenichnoi mashiny [On the choice of the rational scheme of power development in dual-stream transmission of tracked vehicle]. APZiB, vol.3, 2014, pp. 111-116.

УДК 004.021; DOI 10.1872/MMF-2016-83

В.А. Чеканин[1], А.В. Чеканин[2]

АЛГОРИТМ УДАЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ОРТОГОНАЛЬНОЙ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ

[1]Владислав Александрович Чеканин, к.т.н., доцент
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)973-2038, E-mail: vladchekanin@rambler.ru

[2]Александр Васильевич Чеканин, д.т.н., профессор
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)973-2038, E-mail: avchekanin@rambler.ru

Аннотация

В работе рассматривается оптимизационная задача упаковки ортогональных объектов в ортогональные контейнеры в форме параллелепипедов произвольной размерности. Предложен алгоритм временного удаления размещенных объектов с целью существенного повышения эффективности заполнения свободных пространств контейнеров.

Ключевые слова: задача ортогональной упаковки, задача контейнерной упаковки, распределение ресурсов, оптимизация.

Введение

Решение большого числа оптимизационных задач распределения ресурсов может быть сведено к решению классической задачи комбинаторной оптимизации – задачи ортогональной упаковки объектов [19], заключающейся в поиске наиболее рационального размещения ортогональных объектов среди ортогональных контейнеров в форме многомерных параллелепипедов. В частности, широкое практическое значение имеют решения задач контейнерной упаковки грузов в транспортных и логистических системах, распределения вычислительных ресурсов в компьютерных системах, прямоугольного

раскроя материалов, а также других задач эффективного распределения ресурсов [2–5, 12, 19].

Размерность наиболее часто встречающихся задач раскроя и упаковки не превышает трёх [12]. В задачах ортогональной упаковки размерности выше трёх, как правило, помимо пространственных координат, используются и такие, как временные (например, в задаче распределения ресурсов с учетом различных технологических ограничений), стоимостные и др. [16, 20].

Задачи ортогональной упаковки относятся к классу NP-полных [17]. Применение для решения этого класса задач точных методов, основанных на полном переборе, оказывается неэффективным (а в подавляющем большинстве практических задач и невозможным при ограниченных ресурсах машинного времени). В результате широкое распространение получили эвристические и метаэвристические алгоритмы оптимизации [1, 6, 8, 11, 16, 18]. Эффективность алгоритмов оптимизации определяется, в первую очередь, глубиной поиска, которая существенно зависит от времени поиска субоптимального решения задачи. Для оценки качества решения, представленного в виде последовательности размещаемых объектов, необходимо выполнить размещение объектов и оценить плотность полученной упаковки. Поскольку размещение объектов выполняется для каждого промежуточного решения (число которых может доходить до десятков тысяч и более), необходимо использовать модели и методы размещения, обеспечивающие быстрое размещение объектов при полном учёте всех областей заполняемых контейнеров.

Для представления объектов в ортогональных контейнерах произвольной размерности авторами была разработана модель потенциальных контейнеров [9, 13]. Модель описывает свободное пространство заполняемого контейнера в виде набора так называемых потенциальных контейнеров – ортогональных объектов с наибольшими габаритными размерами, которые могут быть размещены в контейнере, не перекрывая размещенные в нем объекты. Быстрый доступ к потенциальным контейнерам осуществляется с помощью предложенной авторами многоуровневой связной структуры данных [10, 15]. В настоящей работе представлен алгоритм удаления объектов, разработанный применительно к модели потенциальных контейнеров и предоставляющий возможность гибкого управления объектами за счет их перераспределения после размещения. Использование этого алгоритма предоставляет возможность применения методов локального уплотнения упаковки с целью повышения качества получаемого решения.

Алгоритм удаления ортогональных объектов

Одним из эффективных методов повышения качества полученной упаковки является ее уплотнение, которое может быть реализовано путем

удаления одного или нескольких размещенных объектов с последующим более рациональным заполнением освобожденного пространства другими объектами. При удалении размещенного в контейнере объекта необходимо реорганизовать все потенциальные контейнеры, окружающие этот объект.

В формулах верхний индекс будем использовать для обозначения размерности.

Алгоритм удаления *D*-мерного ортогонального объекта i с габаритными размерами $\{w_i^1, w_i^2, \ldots, w_i^D\}$ из контейнера j с габаритными размерами $\{W_j^1, W_j^2, \ldots, W_j^D\}$ содержит следующие действия.

1. Создание нового пустого *D*-мерного ортогонального контейнера j' с габаритными размерами, совпадающими с габаритными размерами исходного контейнера j, т.е. $W_{j'}^d = W_j^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}$.

2. Размещение в контейнере j' объекта i' с габаритными размерами $w_{i'}^d = w_i^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}$ в точке размещения объекта i внутри контейнера j: $x_{i'}^d = x_i^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}$.

3. Формирование списка потенциальных контейнеров $\{L'\}$, положение и размеры которых могут быть изменены в контейнере j после удаления объекта i. В этот список включаются все потенциальные контейнеры k', для которых справедливо неравенство $x_{k'}^d \le x_i^d + w_i^d$ $\forall d \in \{1, \ldots, D\}$.

4. Размещение в контейнере j' объектов с габаритными размерами $w_{k'}^d = p_{k'}^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \ k' \in \{L'\}$ в точках $x_{k'}^d$, где $p_{k'}^d$ – габаритный размер потенциального контейнера k', измеренный в направлении координатной оси d. При размещении объектов разрешить их взаимное перекрытие. Оставшееся в результате размещения объектов свободное пространство в контейнере j' будет описываться набором потенциальных контейнеров $\{L''\}$.

5. Создание нового пустого *D*-мерного ортогонального контейнера j'' с габаритными размерами, совпадающими с габаритными размерами контейнера j, т.е. $W_{j''}^d = W_j^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}$.

6. Размещение в контейнере j'' объектов с габаритными размерами $w_{k''}^d = p_{k''}^d \ \ \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \ k'' \in \{L''\}$ в точках $x_{k''}^d$. При размещении объектов разрешить их взаимное перекрытие. Оставшееся в результате размещения объектов свободное пространство в контейнере j'' будет описываться набором потенциальных контейнеров $\{L'''\}$. Этот набор потенциальных контейнеров описывает также свободное пространство контейнера j, которое будет образовано в области удаляемого объекта i.

7. Удаление объекта i из контейнера j.

8. Замена в исходном контейнере j набора потенциальных контейнеров $\{L'\}$ на полученный набор $\{L'''\}$.

Работу описанного алгоритма продемонстрируем на примере удаления одного объекта из двухмерного прямоугольного контейнера с габаритными размерами $W^1 = W^2 = 100$ (см. рис. 1). Параметры объектов, размещенных в контейнере 1, приведены в табл. 1, параметры потенциальных контейнеров – в табл. 2.

При удалении объекта с номером $i = 2$ необходимо реорганизовать все потенциальные контейнеры из набора $\{L'\}$, для которых справедливо неравенство $x_{k'}^d \le x_i^d + w_i^d, k' \in \{L'\} \quad \forall d \in \{1;2\}$, т.е. потенциальные контейнеры с номерами 2, 3 и 4 (см. табл. 2).

Таблица 1. Размещенные объекты (контейнер 1)

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	w^1	w^2
1	0	0	30	30
2	0	30	70	50
3	0	80	40	10
4	30	0	60	20
5	70	30	10	50

Таблица 2. Потенциальные контейнеры (контейнер 1)

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	p^1	p^2
1	0	90	100	10
2	30	20	40	10
3	40	80	60	20
4	70	70	30	30
5	80	20	20	80
6	90	0	10	100

Удаляемый объект, а также объекты с габаритными размерами $w_{k'}^d = p_{k'}^d, k' \in \{L'\} \ \forall d \in \{1;2\}$ (см. табл. 3) размещаются в новом контейнере с номером 1', при этом в нем формируется набор потенциальных контейнеров $\{L''\}$, приведенный в табл. 4 и представленный на рис. 2.

Объекты с габаритными размерами $w_{k''}^d = p_{k''}^d, k'' \in \{L''\}$ (см. табл. 5) размещаются в новом контейнере с номером 1" (см. рис. 3), в результате чего в нем формируется набор потенциальных контейнеров $\{L'''\}$, приведенный в табл. 6.

После удаления объекта 2 из контейнера 1 необходимо заменить в нем все потенциальные контейнеры из набора $\{L'\}$ на потенциальные контейнеры из набора $\{L'''\}$. Полученный результат представлен на рис. 4. Параметры всех потенциальных контейнеров, содержащихся в контейнере 1, приведены в табл. 7.

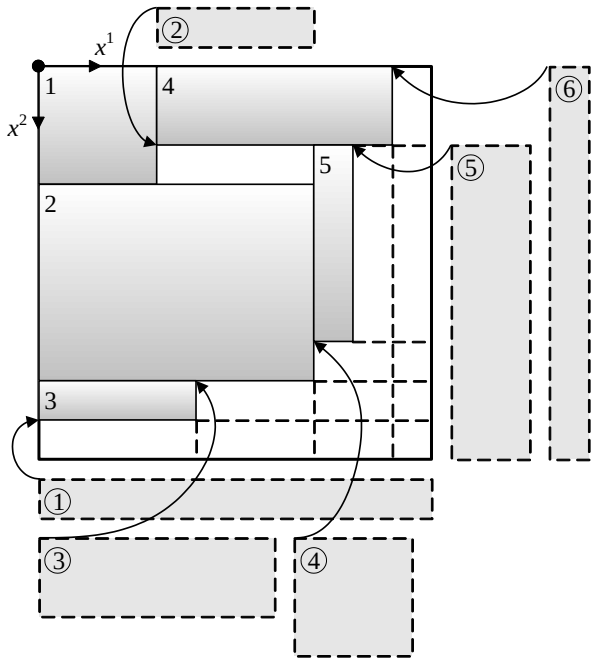


Рис. 1. Содержимое контейнера 1 до удаления объекта 2

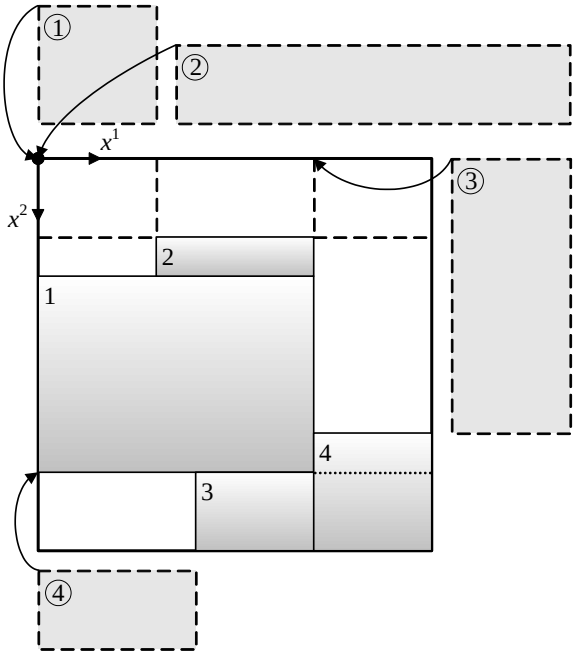


Рис. 2. Контейнер 1'

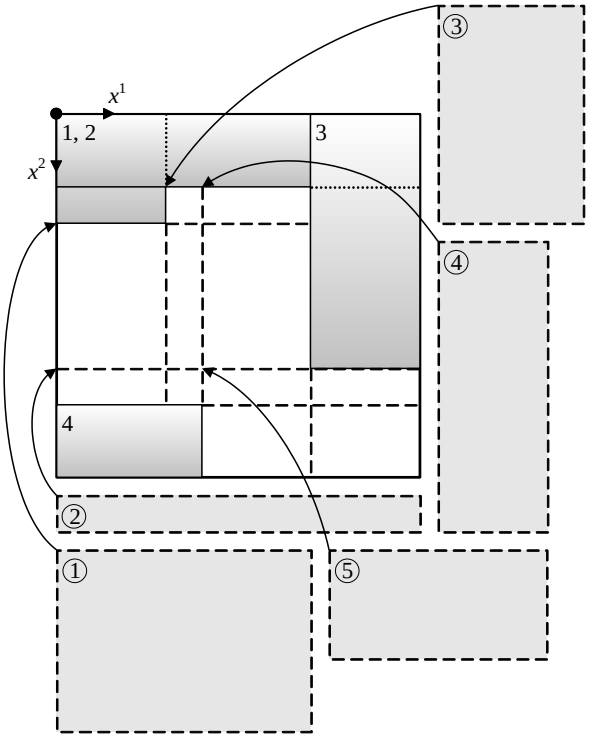


Рис. 3. Контейнер 1"

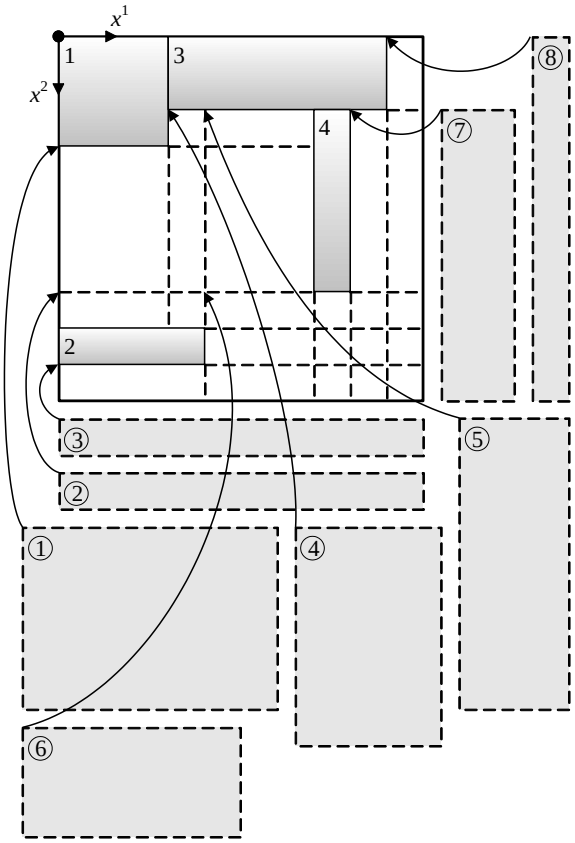


Рис. 4. Содержимое контейнера 1 после удаления объекта

Таблица 3. Размещенные объекты (контейнер 1')

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	w^1	w^2
1	0	30	70	50
2	30	20	40	10
3	40	80	60	20
4	70	70	30	30

Таблица 4. Потенциальные контейнеры (контейнер 1')

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	p^1	p^2
1	0	0	30	30
2	0	0	100	20
3	70	0	30	70
4	0	80	40	20

Таблица 5. Размещенные объекты (контейнер 1")

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	w^1	w^2
1	0	0	30	30
2	0	0	100	20
3	70	0	30	70
4	0	80	40	20

Таблица 6. Потенциальные контейнеры (контейнер 1")

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	p^1	p^2
1	0	30	70	50
2	0	70	100	10
3	30	20	40	60
4	40	20	30	80
5	40	70	60	30

Таблица 7. Потенциальные контейнеры после удаления объекта (контейнер 1)

№ п/п	Положение		Габаритные размеры	
	x^1	x^2	p^1	p^2
1	0	30	70	50
2	0	70	100	10
3	0	90	100	10
4	30	20	40	60
5	40	20	30	80
6	40	70	60	30
7	80	20	20	80
8	90	0	10	100

Заключение

Предложен алгоритм удаления объектов ортогональной упаковки произвольной размерности с последующим формированием набора потенциальных контейнеров, описывающих свободные области контейнера вокруг удалённых объектов, использование которого позволяет повысить качество получаемой упаковки. Алгоритм включен в базовый набор алгоритмов, реализованных в разработанном прикладном

программном обеспечении, предназначенном для оптимизации решений задач ортогональной упаковки объектов [7, 14]. Перспективным направлением развития исследований в области повышения эффективности размещения объектов является разработка и анализ алгоритмов и методов локального перераспределения ресурсов, используемых для уплотнения упаковок, полученных с помощью эвристических и метаэвристических алгоритмов оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиахметова Ю.И., Филиппова А.С. Мультиметодный генетический алгоритм для решения задач ортогональной упаковки // Информационные технологии. – 2007. – № 12. – С. 50 – 56.
2. Вороненко В.П., Михайлов Е.В., Соколова Я.В. Применение имитационного моделирования при проектировании или реконструкции производственных участков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 3. – С. 29 – 33.
3. Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А. Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 4. – С. 10 – 15.
4. Коркмазов Ш.Х. Оперативное распределение ресурсов между действиями автоматизированного производства // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 3. – С. 120 –123.
5. Митрофанов В.Г., Омельченко И.С., Капитанов А.В. Автоматизированное проектирование на основе «элементной» технологии // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 4. – С. 109 – 112.
6. Филиппова А.С. Моделирование эволюционных алгоритмов решения задач прямоугольной упаковки на базе технологии блочных структур // Информационные технологии. – 2006. – № 6. Приложение. – 32 с.
7. Чеканин В.А. Библиотека классов для решения задач упаковки на основе эволюционных алгоритмов // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конференции (Санкт-Петербург, 19-20 июня 2014 г.). / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 789 – 796.
8. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Исследование генетических методов оптимизации распределения прямоугольных ресурсов // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 2-й Международной науч.-практ. конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 798 – 804.
9. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Модели конструирования ортогональной упаковки объектов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2014. – № 2. – С. 37 – 45.

10. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Структура данных для задачи трехмерной ортогональной упаковки объектов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 1. – С. 112 – 116.
11. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Эвристический алгоритм оптимизации решений задачи прямоугольного раскроя // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 4. – С. 210 – 213.
12. Bortfeldt A., Wascher G. Constraints in container loading – A state-of-the-art review // European Journal of Operational Research. – 2013. – Vol. 229, N. 1. – P. 1 – 20.
13. Chekanin V.A., Chekanin A.V. An efficient model for the orthogonal packing problem // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 22. – P. 33 – 38.
14. Chekanin V.A., Chekanin A.V. Development of optimization software to solve practical packing and cutting problems // Advances in Intelligent Systems Research. – 2015. – Vol. 123. – P. 379 – 382.
15. Chekanin V.A., Chekanin A.V. New Effective Data Structure for Multidimensional Optimization Orthogonal Packing Problems // Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing. – 2016. – P. 87 – 92.
16. Fekete S.P., Schepers J., van der Veen J.C. An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing // Operations Research. – 2007. – Vol. 55, N. 3. – P. 569 – 587.
17. Johnson D.S. A Brief History of NP-Completeness, 1954–2012. Documenta Mathematica. – 2012. – Extra Volume ISMP. – P. 359 – 376.
18. Leung S.C.H., Zhang D.F., Zhou C.L., Wu T. A hybrid simulated annealing metaheuristic algorithm for the two-dimensional knapsack packing problem // Computers & Operations Research. – 2012. – Vol. 39, N. 1. – P. 64 – 73.
19. Wascher G., Haubner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 183, N. 3. – P. 1109 – 1130.
20. Westerlund J., Papageorgiou L.G., Westerlund T. A MILP model for N-dimensional allocation // Computers & Chemical Engineering. – 2007. – Vol. 31, N. 12. – P. 1702 – 1714.

V.A. Chekanin[1], A.V. Chekanin[2]

DELETING OBJECTS ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION ORTHOGONAL PACKING PROBLEMS

[1,2]Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

Abstract

The orthogonal packing problem deals with the orthogonal objects which are to be packed into orthogonal containers in a form of parallelepipeds of arbitrary dimension, is considered in the paper. For effective managing of free

spaces of containers is proposed a deleting objects algorithm provides a possibility of realization of heuristic methods of improving the resulting packings which are based on excluding of some placed objects and subsequent more rational filling of the freed container spaces.

Key words: orthogonal packing problem, bin packing problem, recourse allocation, optimization.

REFERENCES

[1] Valiahmetova Yu.I., Filippova A.S. Multi-Method Genetic Algorithm for the Decision of Problems of Orthogonal Packing // Informatsionnyye tekhnologii. 2007. Vol. 12. Pp. 50 – 56. (rus).

[2] Voronenko V.P., Michailov E.V., Sokolova Y.V. Using simulation modeling while designing or revamping production areas // Vestnik MSTU «STANKIN». 2015. Vol. 3. Pp. 29 – 33. (rus.).

[3] Grigoriev S.N., Kutin A.A., Dolgov V.A. Digital manufacturing creation principles // Vestnik MSTU «STANKIN». 2014. Vol. 4. Pp. 10–15. (rus.).

[4] Korkmazov S.H. Operational resource allocation between the operations of the automated manufacture // Vestnik MSTU «STANKIN». 2015. Vol. 3. Pp. 120 – 123. (rus.).

[5] Mitrofanov V.G., Omelchenko I.S., Kapitanov A.V. Automated design based on «component» technologies // Vestnik MSTU «STANKIN». 2015. Vol. 4. Pp. 109 – 112. (rus.).

[6] Filippova A.S. Modeling of Evolution Algorithms for Rectangular Packing Problems Based on Block Structure Technology // Informatsionnyye tekhnologii. 2006. Vol. 6. Appendix. 32 p. (rus).

[7] Chekanin V.A. Library class for solving packing problems via evolutionary algorithms // Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of 4th International scientific conference / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. Pp. 789 – 796. (rus.).

[8] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Researching of genetic methods to optimize the allocation of rectangular resources // Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of 2nd International scientific conference / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. Pp. 798 – 804. (rus.).

[9] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Packing representation models for the orthogonal bin packing problem // Informatsionnyye tekhnologii i vychislitel'nyye sistemy. 2014. Vol. 2. Pp. 37 – 45. (rus).

[10] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Data structure for the threedimensional orthogonal packing problem // Vestnik MSTU «STANKIN». 2015. Vol. 1. Pp. 112 – 116. (rus.).

[11] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Heuristic algorithm for the rectangular strip packing problem optimization // Vestnik MSTU «STANKIN». 2014. Vol. 4. Pp. 210 – 213. (rus.)

[12] Bortfeldt A., Wascher G. Constraints in container loading – A state-of-the-art review // European Journal of Operational Research. 2013. Vol. 229, N. 1. Pp. 1 – 20.
[13] Chekanin V.A., Chekanin A.V. An efficient model for the orthogonal packing problem // Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 22. – Pp. 33 – 38.
[14] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Development of optimization software to solve practical packing and cutting problems // Advances in Intelligent Systems Research. 2015. Vol. 123. Pp. 379 – 382.
[15] Chekanin V.A., Chekanin A.V. New Effective Data Structure for Multidimensional Optimization Orthogonal Packing Problems // Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing. 2016. Pp. 87 – 92.
[16] Fekete S.P., Schepers J., van der Veen J.C. An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing // Operations Research. 2007. Vol. 55, N. 3. Pp. 569 – 587.
[17] Johnson D.S. A Brief History of NP-Completeness, 1954–2012. Documenta Mathematica. 2012. Extra Volume ISMP. Pp. 359 – 376.
[18] Leung S.C.H., Zhang D.F., Zhou C.L., Wu T. A hybrid simulated annealing metaheuristic algorithm for the two-dimensional knapsack packing problem // Computers & Operations Research. 2012. Vol. 39, N. 1. Pp. 64 – 73.
[19] Wascher G., Haubner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems // European Journal of Operational Research. 2007. Vol. 183, N. 3. Pp. 1109 – 1130.
[20] Westerlund J., Papageorgiou L.G., Westerlund T. A MILP model for N-dimensional allocation // Computers & Chemical Engineering. 2007. Vol. 31, N. 12. Pp. 1702 – 1714.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.7.015; DOI 10.1872/MMF-2016-84

Э.Л. Жуков[1], Т.А. Ларионова[2], С.Л. Плавник[3]

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОПЕРАЦИЯХ ЧИСТОВОГО ТОЧЕНИЯ

[1]Жуков Эдуард Леонидович, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: kii49@yandex.ru

[2]Ларионова Татьяна Анатольевна, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: tsimkoshka@mail.ru

[3]Плавник Светлана Леонидовна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: svetlana.plavnik@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы разработки методов и методик обеспечения требуемого качества поверхности при чистовой токарной обработке титановых сплавов. Приведены рекомендации для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых сплавов, применяемых в авиационном двигателестроении.

Ключевые слова: титановые сплавы, качество поверхностного слоя, чистовая токарная обработка, режимы обработки, геометрические параметры инструмента, износ режущего инструмента.

В современном машиностроении значительно увеличилась роль качества поверхности в функциональном назначения детали.

При общей тенденции в машиностроении уменьшения допусков на размеры и формы деталей возрастает процентное содержание величины микронеровностей и волнистости в указанных допусках [1].

Наличие микронеровностей на поверхностях изготавливаемых деталей является неизбежным, так как при их изготовлении на

поверхностях появляются неровности поверхности, которые являются следами обработки.

Требования к качеству поверхности устанавливаются с целью обеспечения требуемых функциональных свойств поверхности и определяются ее численными значениями, величина которых должна обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики.

Шероховатость поверхности по ГОСТ 2789-73 определяется средним арифметическим отклонением профиля Ra, высотой неровностей по десяти точкам Rz, наибольшей высотой неровностей R_{max} и средним шагом неровностей по средней линии Sm. Все параметры определяются на базовой длине, заданной стандартом. Наиболее распространен параметр среднего арифметического отклонения профиля.

Высота неровностей, получающихся на деталях при их обработке резанием, зависят от многих факторов: режима обработки, геометрических параметров инструмента и его износа, структуры и свойств материалов детали и режущей части инструмента, условий охлаждения и смазки инструмента, жесткости системы СПИД и т.д. [1].

Шероховатость обработанной поверхности в зависимости от материала инструмента при условии сохранения постоянства его геометрических параметров и режимов резания может изменяться вследствие различия сил адгезии и условий трения на поверхности контакта, а также разной способности инструментов из различных материалов сохранять форму режущей кромки.

При чистовом точении деталей влияние переднего и заднего угла на высоту неровностей обработанных деталей и интенсивность износа резца незначительно [2].

Выбор наиболее рациональных марок обрабатывающего материала по высоте неровностей, образующихся на обрабатываемой детали, зависит от используемой скорости резания и подачи инструмента, которые различны для различных марок инструментального материала [3].

Вышеперечисленные рекомендации в большей степени относятся к обработке стальных заготовок. Рекомендации по получению требуемой шероховатости поверхности при резании труднообрабатываемых сплавов для авиационного двигателестроения практически отсутствуют.

Подача является важным элементом режима резания, влияющим на шероховатость и производительность процесса обработки. При чистовом точении подача чаще ограничивается шероховатостью обработанной поверхности. Высота неровностей, измеренная на детали, может существенно отличаться от расчетной высоты неровностей, особенно при работе на малых подачах. При постоянной скорости резания повышение подачи приводит к росту температуры контактных поверхностей. При повышении подачи приходится снижать скорость резания, иначе стойкость инструмента оказывается совершенно недостаточной [4].

На величину шероховатости весьма значительно влияет и усадка стружки. Снижение усадки стружки повышает высоту неровности. Металл, превращаемый в стружку, подвергается усадке не только по толщине, но и по ширине. Увеличенная по ширине стружка при сходе по передней поверхности непрерывно срывает вершины гребешков, образуемых на поверхности среза. Под влияния срыва вершин гребешков общая высота неровностей уменьшается. Чем больше усадка стружки, тем больше ее уширение и значительнее уменьшение высоты неровностей.

При уменьшении подачи высота неровности обработанной поверхности снижается не беспредельно. При некотором значении критической подачи S_k, зависящем от величины градуса при вершине, высота неровностей практически не изменяется с уменьшением подачи. Очевидно, точение деталей на подаче, равной S_k, является наиболее выгодным, та как при этом наименьшая высота неровностей обработанной поверхности получается при максимальной производительности [3].

Величина подачи S_k почти линейно связана с радиусом при вершине резца: чем меньше величина радиуса, тем меньше величина S_k. При таком точении радиус закругления вершины резца, являющийся оптимальным по шероховатости, одновременно является оптимальным и по интенсивности износа инструмента.

Глубина резания как геометрический фактор не может изменять профиль и высоту неровностей обработанной поверхности. Глубина резания может влиять на высоту неровностей при изменении температуры резания, условий наростообразования, деформации срезаемого слоя, интенсивности срезания и деформации вершин гребешков сходящей стружкой. Но так как глубина резания слабо влияет на температуру резания, усадку стружки, геометрические параметры нароста, то и высота неровностей изменяется незначительно [5].

В числе других основных причин появления микронеровностей является наличие колебаний, которые часто возникают во время резания. Наличие колебаний и их величина зависят от скорости резания [6].

Одним из факторов, оказывающих влияние на величину шероховатости, является образование нароста на вершине режущей кромки резца. Работа при низких скоростях резания, при которых нарост не образуется, приводит к получению меньшей шероховатости. При повышении скорости резания высота неровностей возрастает, достигая при определенной скорости максимального значения. При указанной скорости наблюдается максимальное развитие нароста, и он становится наиболее устойчивым. Вершина нароста, выступая впереди лезвия резца и ниже линии реза, увеличивает шероховатость лезвия, формирующего обработанную поверхность, оставляет на поверхности среза глубокие борозды и разрывы. Дальнейшее повышение скорости резания приводит к уменьшению наростообразования и высоты неровности обрабатываемой

поверхности. В зоне скоростей резания за пределами наростообразования высота неровности наименьшая и дальнейшее повышение скорости резания на высоту неровности влияет незначительно [3].

Кроме того, высота неровности зависит от интенсивности размерного износа резца [7, 10]. Чем выше интенсивность износа инструмента, тем больше и высота неровности обработанной поверхности. При работе на оптимальных по интенсивности износа скоростях резания достигается наименьшая высота неровности.

Для обработки традиционных материалов существует методика предварительной оценки значения параметров шероховатости и оценка влияния параметров режимов резания (скорость резания и подача) на численные значения параметров.

Для предварительного расчета численных параметров шероховатости поверхности обычно используют формулу (1):

$$Rz = \frac{S^2}{8 \cdot r} \text{ (мкм)}, \quad (1)$$

где: Rz – параметр шероховатости (средняя высота профиля по 10 точкам); S – величина подачи на оборот, мм/об; r – радиус при вершине резца, мм [8].

Для проверки вышеприведенной формулы (1), а также влияния зависимости величины параметров шероховатости от подачи инструмента при разных скоростях резания на кафедре «Технология машиностроения» СПбПУ были проведены эксперименты по точению титанового сплава ВТ8 при разных скоростях, подачах и радиусах при вершине резца.

При обработке титанового сплава согласно рекомендациям [9, 12] были выбрана державка Sandvik Coromant DDNNN 2525M 1504 и режущая пластина DNMG 150404 SF H13A. Численные значения параметров шероховатости измерялись в различных точках изготовленной детали (от пяти до десяти точек) и находилось их среднее значение.

Результаты однофакторных экспериментов приведены в таблице 1. На рисунке 1 представлена зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от скорости резания, на рисунке 2 − от радиуса при вершине резца, на рисунке 3 – от подачи.

Таблица 1 – Величина параметров шероховатости Ra и Rz при различных скоростях, подачах и радиусах при вершине резца

V, м/мин	Ra, мкм	Rz, мкм	R, мм	Ra, мкм	Rz, мкм	s, мм/об	Ra, мкм	Rz, мкм
s = 0,136 мм/об, R = 0,4 мм, t = 0,5			V = 60 м/мин, s = 0,062 мм/об, t = 0,5			V = 60 м/мин, R = 0,4 мм, t = 0,5		
40	1,13	5,89	0,1	1,451	7,35	0,041	0,534	3,09
60	1,518	7,91	0,2	0,86	4,79	0,136	1,462	7,62
80	1,645	8,77	0,4	0,643	3,46	0,212	2,936	13,63

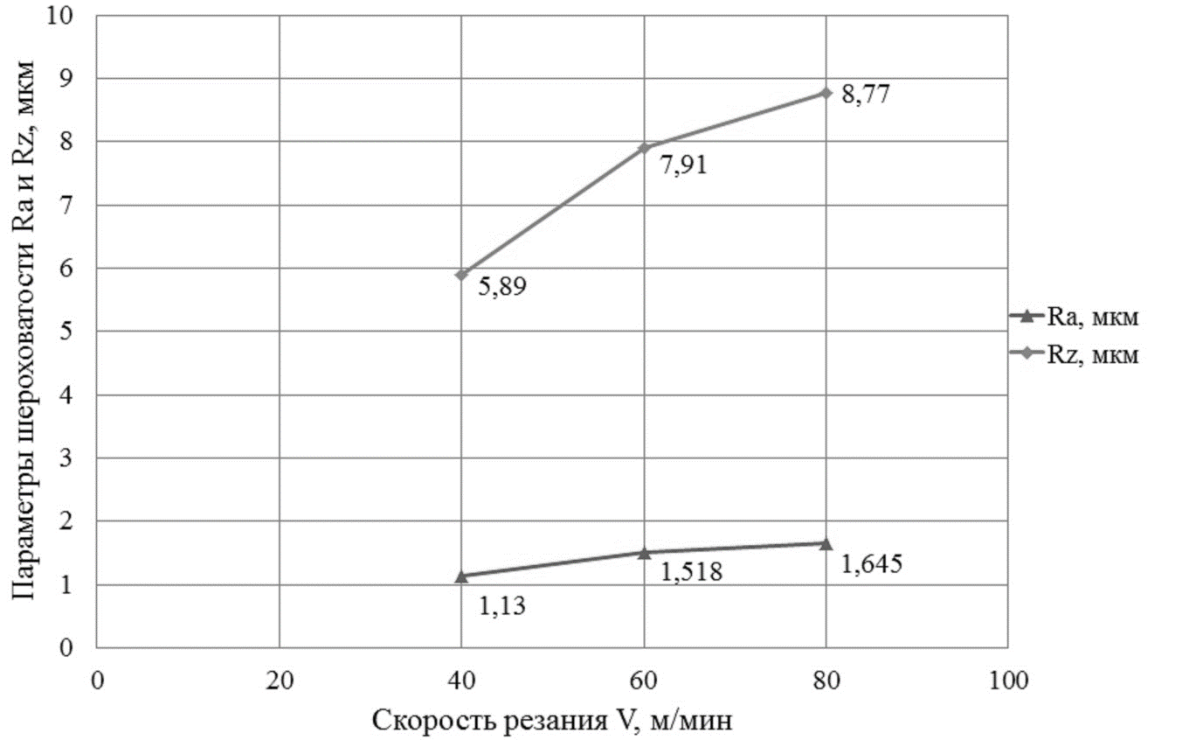


Рисунок 1 − Зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от скорости резания: s = 0,136 мм/об, R = 0,4 мм, t = 0,5 мм

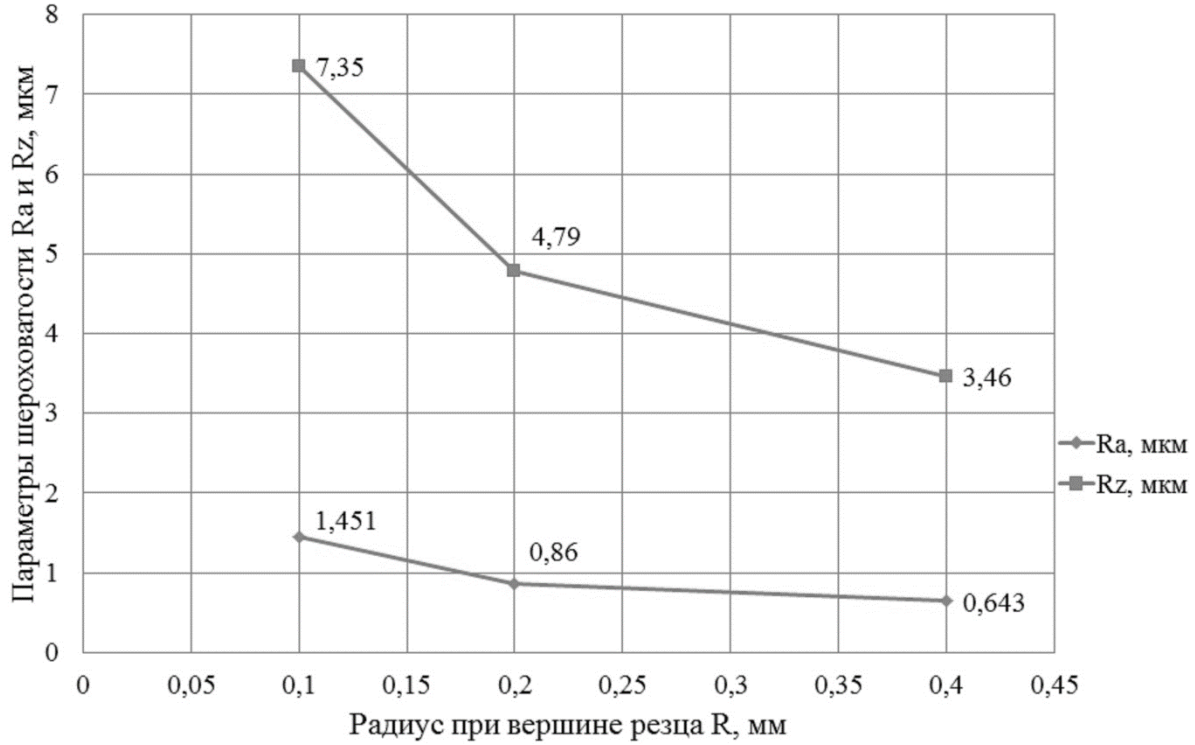


Рисунок 2 − Зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от радиуса при вершине резца: s = 0,062 мм/об, V = 60 м/мин, t = 0,5 мм

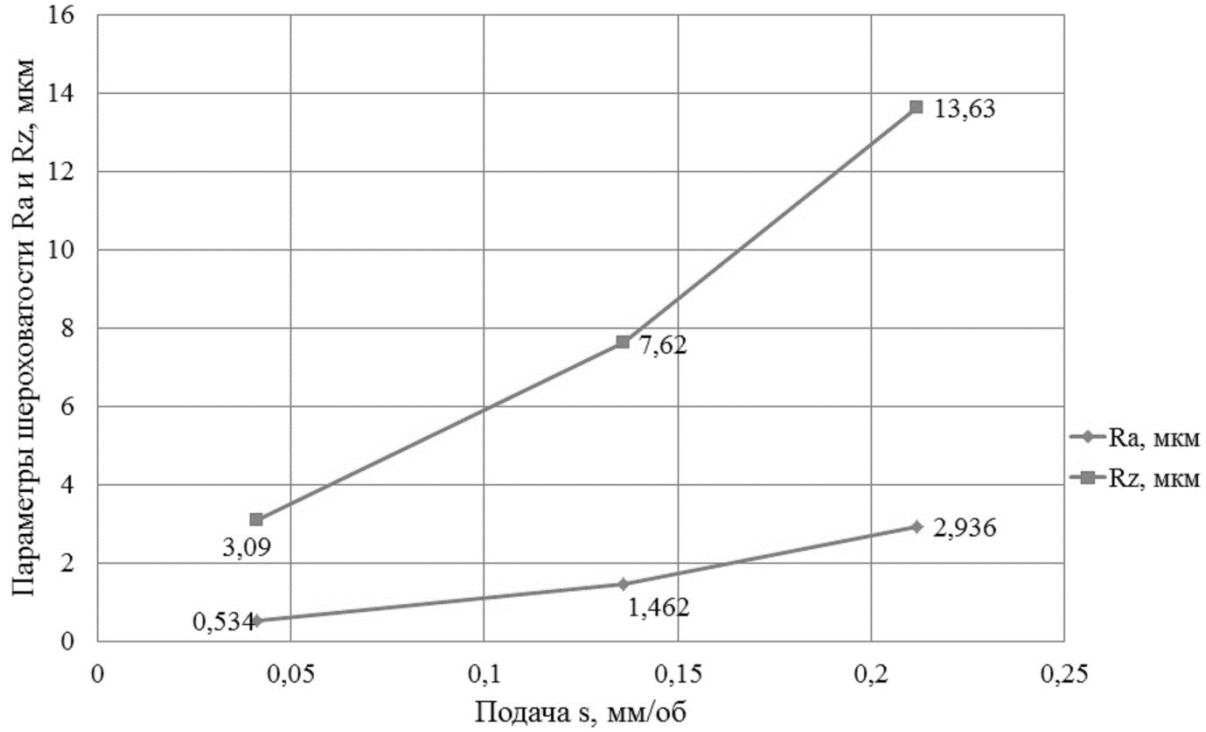


Рисунок 3 − Зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от подачи: R = 0,4 мм, V = 60 м/мин, t = 0,5 мм

Проведенные эксперименты показали:

− при чистовых режимах точения титановых сплавов приведенной выше формулой (1) пользоваться нельзя, так как исходя из результатов расчета, по ней численное значение шероховатости поверхности возрастает с увеличением подачи, а по результатам эксперимента при определенных подачах, когда пластическая деформация уменьшается, то и значения параметров шероховатости также уменьшаются;

− при малых подачах происходит сильная деформация обрабатываемого материала, поэтому параметры шероховатости возрастают;

− полученные результаты исследований представили возможным использовать представленные параметры резания для изготовления различных деталей в соответствии с определенными эксплуатационными требованиями к качеству поверхностного слоя обрабатываемой заготовки;

− проведенные предварительные однофакторные эксперименты позволили определить, что зависимость шероховатости от основных параметров процесса резания носит степенной характер.

Для численной оценки параметров шероховатости поверхности рекомендуется пользоваться эмпирической формулой. Зависимость численных значений параметров шероховатости поверхности будет выражаться формулами:

$$Ra = C_{Ra} \cdot V^a \cdot S^b \cdot R^d, \qquad (2)$$

$$Rz = C_{Rz} \cdot V^e \cdot S^i \cdot R^f, \quad (3)$$

где: V – скорость резания, м/мин; S – подача инструмента, мм/об; R – радиус при вершине резца, мм; C_{Ra} и C_{Rz} – коэффициенты, зависящие от материала инструмента; *a, e, b, i, d, f* – показатели степени V, S и R соответственно.

Для определения коэффициентов модели необходимо провести полнофакторный эксперимент в диапазоне рекомендованных режимов резания.

Значение параметра шероховатости рассчитывается по выше приведенной формуле с учетом полученных ранее параметров резания. Если величина шероховатости соответствует указанной на чертеже, то эти параметры принимаются как рабочие, если не соответствуют необходимо, либо уменьшать подачу, либо увеличивать радиус при вершине инструмента и снова производить расчет.

Исследования проводились на многопараметрическом стенде на базе универсального токарно-винторезного станка модели Knuth Turnado 230/1000V [10, 11], который имеет достаточный диапазон скоростей, с частотой вращения шпинделя до 3000 об/мин. Обрабатываемые заготовки имели цилиндрическую форму Ø 100 – 120 мм и крепились в шпинделе станка с помощью специальной оправки. Такая схема крепления обеспечивает достаточную жесткость. После обработки измерялись параметры шероховатости Ra и Rz с помощью профилометра MarSurf PS1 фирмы Mahr.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Поиск оптимальных условий является одной из наиболее распространенных научно – технических задач [13, 14]. Для этого необходимо установить взаимосвязи между аргументами $(x_1, x_2, ..., x_n)$ и зависящей от них величиной у. Величина у является случайной величиной, имеющей нормальное распределение, с переменным центром распределения M[y] , изменяющемся при изменении сочетания значений факторов $(x_1, x_2, ..., x_n)$. Задача принимает вид математической модели, связывающей параметр оптимизации, признак по которому хотим оптимизировать процесс, с факторами: $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, где f – функция отклика.

Математическая модель позволяет количественно оценить степень влияния тех или иных факторов на показатели процесса, выбрать наиболее важные из них и определить те, которые могут быть использованы при управлении.

Для упрощения регрессионного анализа факторы кодируются. При наличии двух уровней, верхнего и нижнего, один обозначается +1, другой −1. Эксперимент основан на варьировании факторов на двух уровнях.

Число опытов необходимое для реализации все возможных сочетаний уровней факторов:

$$N = 2^k, \quad (4)$$

где: N − число опытов; k − число факторов; 2 − число уровней.

Эксперимент, в котором реализуется все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом.

Эксперимент планируется для того, чтобы получить модель (формула 2), обладающую некоторыми оптимальными свойствами.

Необходимо найти значения неизвестных коэффициентов модели. Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов.

Факторами являются: скорость резания V, подача s, радиус при вершине режущей пластины R. В качестве параметров оптимизации приняты: износ инструмента, его температурное удлинение, качество поверхностного слоя, температура в зоне резания и силы резания.

Таким образом, по формуле 4 необходимое количество опытов равняется:

$$N = 2^3 = 8.$$

Многопараметрический стенд, описанный в [10] позволяет во время механической обработки одновременно получать информацию о температурном удлинении и износе режущего инструмента, о температуре в зоне резания, о силах резания и качестве поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Результаты многофакторного эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты многофакторного эксперимента

№	V, м/мин	s, мм/об	R, мм	Py	Pz	T, °C	Uo, мкм	ξ, мкм			Ra, мкм	Rz, мкм
								A	K	α		
1	40	0,041	0,1	28	57	220	0,8053	1570,4	0,004	0,005	0,998	4,91
2	40	0,041	0,4	44	63	223	1,0861	4518000	0,0000021	0,003	0,567	3,51
3	40	0,082	0,1	36	82	214	1,2055	14180	0,0006988	0,004	3,841	18,93
4	40	0,082	0,4	67	93	229	2,8557	733,748	0,009	0,006	0,942	5,13
5	80	0,041	0,1	35	57	217	0,7903	446,177	0,012	0,01	1,087	6,66
6	80	0,041	0,4	55	66	219	1,9198	351,689	0,015	0,011	0,785	4,62
7	80	0,082	0,1	53	89	230	1,7566	210,248	0,019	0,012	6,085	24,8
8	80	0,082	0,4	75	100	225	1,5273	568,434	0,015	0,008	0,785	5,12

С помощь логарифмирования в программе СТАТИСТИКА найдены коэффициенты для линейных уравнений регрессии. Полученные коэффициенты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты для линейного уравнения регрессии вида: $\ln(y) = C + a \cdot \ln(V) + b \cdot \ln(R) + d \cdot \ln(s)$

Коэффициент при:	Py	Pz	T, °C	Uo, мкм	ξ, мкм			Ra, мкм	Rz, мкм
					A	K	α		
C	4,44585	5,8138	5,4762	2,4212	24,6051	-20,16	-9,7092	1,67679	2,91889
V	0,34114	0,0724	0,0081	0,1087	-5,4771	4,9689	1,21862	0,24833	0,30576
s	0,50383	0,5822	0,0303	0,6997	-2,4515	2,5494	0,12042	1,29041	1,13484
R	0,33765	0,0882	0,0123	0,3443	1,03869	-0,901	-0,0749	-0,7834	-0,6464

Линейные уравнения регрессии для параметров шероховатости принимают вид:

$$\ln(Rz) = 2{,}92 + 0{,}31 \cdot \ln(V) + 1{,}13 \cdot \ln(R) - 0{,}64 \cdot \ln(s); \quad (5)$$

$$\ln(Ra) = 1{,}68 + 0{,}25 \cdot \ln(V) + 1{,}29 \cdot \ln(R) - 0{,}78 \cdot \ln(s). \quad (6)$$

Линейные уравнения (5, 6) преобразованы в степенные, найденные степени для каждого из параметров оптимизации представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Найденные коэффициенты для степенного уравнения регрессии вида: $y = C \cdot V^a \cdot R^b \cdot s^d$

Степень при:	Py	Pz	T, °C	Uo, мкм	ξ, мкм			Ra, мкм	Rz, мкм
					A	K	α		
C	85,2724	334,891	238,948	11,2597	$48{,}5 \cdot 10^9$	0,0000	0,000061	5,3483	18,5208
V	0,34114	0,07249	0,00817	0,10874	-5,4771	4,9689	1,21862	0,2483	0,30576
s	0,50383	0,58221	0,03033	0,69976	-2,4515	2,5494	0,12042	1,2904	1,13484
R	0,33765	0,08820	0,01235	0,34430	1,03869	-0,901	-0,07493	-0,7834	-0,6464

Уравнения для параметров шероховатости принимают конечный вид:

$$Ra = 5{,}35 \cdot V^{0{,}24} \cdot s^{1{,}29} \cdot R^{-0{,}78}, \quad (7)$$

$$Rz = 18{,}52 \cdot V^{0{,}3} \cdot s^{1{,}13} \cdot R^{-0{,}64}. \quad (8)$$

Выводы

По результатам однофакторных экспериментов были получены степенные зависимости параметров шероховатости Ra и Rz от скорости резания, подачи и радиуса при вершине резца. С увеличением скорости резания и подачи инструмента параметры шероховатости увеличиваются. Напротив, при увеличении радиуса при вершине резца параметры шероховатости уменьшаются.

Для определения численной степени влияние каждого из факторов (радиуса при вершине, подачи и скорости) на параметры шероховатости проведен полнофакторный эксперимент, произведен регрессионный анализ и выведены регрессионные уравнения (7, 8). Таким образом, подставив в регрессионные уравнения значения глубины резания, подачи и скорости резания можно подсчитать шероховатость обработанной поверхности при чистовых операциях.

Уравнения 7 и 8 показывают, в какой степени той или иной фактор влияет на шероховатость поверхности. Можно сделать вывод, что в большей степени на качество поверхностного слоя обрабатываемой детали влияет подача. В меньшей же степени оказывают влияние радиус при вершине резца и скорость резания.

Используя данные уравнения, варьируя скоростями резания и геометрией режущего инструмента можно определить рациональные режимы резания, обеспечивающие необходимую точность, заданную шероховатость и производительность обработки детали авиационного двигателестроения на операциях чистового точения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / Под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. СПб.; Изд-во Политехн. ун-та. – 2007. – 136 с.
2. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. – М.: Машиностроения. – 1976. – 144 с.
3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, – 1976, – 278 с.
4. Макаров А.Д., Волгарев Л.Н. Влияние диаметра и жесткости заготовки на износ резцов и чистоту обработанной поверхности // Тезисы докладов ВНТК "Жесткость в машиностроении" / БИТМ. Брянск, – 1971. – С. 226-230.
5. Макаров А.Д., Шевин Г.А. Исследование некоторых характеристик обрабатываемости при чистовом точении сплава Ал9 // Вопросы оптимального резания металлов: Сб. науч. тр. / УАИ. Уфа, – 1972. – вып 29. – С. 26-31.
6. Технология машиностроения. Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие / С. Л. Мурашкин, А. Г. Схиртладзе, А. М. Соловейчик, Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, Б. Я. Розовский В. В. Дегтярев. Под редакцией С. А. Мурашкина СПб.: Изд-во СПбГПУ, – 2003, – 280 с.
7. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. Л., «Машиностроение», – 1973, – 496 с.
8. Технология машиностроения: в двух кн. Учебное пособие для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин и др.; Под ред. С. Л. Мурашкина. – 3-е изд., доп. – М.: Высш. шк., – 2008.
9. Руководство по металлообработке. Технический справочник. AB Sandvik Coromant. – 2010. – 201 с.
10. С.А. Любомудров, О.Ю. Ротаренко. Влияние параметров резания на качество поверхностного слоя при точении титановых сплавов // Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием,

материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – 2015. – С. 281-284.
11. С.А. Любомудров, С.С. Паневин. Установка для исследования процесса резания при точении титановых сплавов // Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – 2014. – С. 245-247.
12. И.И. Козарь, Е.О. Ларионов. Выбор режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов в авиационном двигателестроении // Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – 2015. – С. 288-290.
13. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов / Козарь И.И. [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – № 2 (195). – С. 194-201.
14. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М: Издательство «Наука», – 1976.

E.L. Zhukov, T.A. Larionova, S.L. Plavnik

METHODS TO PROVIDE A GIVEN SURFACE ROUGHNESS ON OPERATIONS FINISH TURNING

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**,** Russia

Abstract

The article discusses the development of methods and techniques to obtain the required surface quality during finish machining of titanium alloys. Leaded to recommendations to guarantee the required quality of the surface roughness of parts made of hard alloys used in aviation engine building.

Key words: titanium alloys, surface roughness, finish turning process, the processing modes, geometrical parameters of tool, wear of the cutting tool.

REFERENCES

[1] Tabenkin, A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. Roughness, waviness, profile. International experience / Under the editorship of Cand. tech. Sciences N.A.

Tabachnikova. SPb.; Publishing house of the Polytechnic. Univ. – 2007. – 136 p.
[2] Kolev, K.S. and Gorchakov, L.M. Precision machining and cutting conditions. Moscow. Mechanical Engineering. 1976. 144 p.
[3] Makarov A.D. Optimization of cutting processes. Moscow. Mashinostroenie, 1976, 278.
[4] Makarov D.A., Volgarev L.H. the influence of the diameter and stiffness of the workpiece on the wear of cutters and the surface // Abstracts of reports of the Commission "Rigidity in machine building" / BITM. Bryansk – 1971. Pp. 226-230.
[5] Makarov D.A., Savin G. A. a Study of some characteristics of the machinability in finish turning of alloy Ал9 // optimum metal cutting: Sat. scientific. Tr. / Aim. Ufa, – 1972. issue 29. Pp. 26-31.
[6] Industrial and manufacturing engineering. Fluctuations and precision when processing materials: Textbook. textbook / S.L. Murashkin, A. G. Skhirtladze, A.M. Soloveichik, E.L. Zhukov, I.I. Kozar, B.Y. Rozovsky Vladimir Degtyarev. Edited by S.A. Murashkina SPb.: Publishing house of SPbSPU, 2003, 280 p.
[7] Wolf A.M. Cutting of metals. Ed. 2-E. L., "engineering", 1973, p. 496
[8] Mechanical engineering: in two vol. Textbook for universities / E.A. Zhukov, I.I. Kozar, S.L. Murashkin, etc.; Under the editorship of L.S. Murashkina. – 3rd ed., extra – M.: Higher. Sch., 2008.
[9] Manual of Metalworking. Technical reference. AB Sandvik Coromant. – 2010. 201 p.
[10] S.A. Lyubomudrov, O.Yu. Rotarenko. The influence of cutting parameters on the quality of the surface layer in turning of titanium alloys // science Week of SPbSPU Scientific forum with international participation, proceedings of the scientific-practical conference. Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport. 2015. Pp. 281-284.
[11] S.A. Lyubomudrov, S.S. Panevin. Installation for research of the cutting process during the turning of titanium alloys // science Week of SPbSPU Scientific forum with international participation, proceedings of the scientific-practical conference. Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport. 2014. Pp. 245-247.
[12] I.I. Kozar, E.O. Larionov. The choice of the cutting tool during cutting of composite materials in aviation engine // science Week of SPbSPU Scientific forum with international participation, proceedings of the scientific-practical conference. Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport. 2015. Pp. 288-290.
[13] Mathematical model of error when machining demanding alloys / Kozar I.I. [and others] // Scientific and technical Gazette of St. Petersburg state Polytechnic University. SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University, 2014. № 2 (195). Pp. 194-201.
[14] Planning of experiment when searching optimal conditions. Y.P. Adler, E.V. Markova, and Y.V. Granovsky. Moscow. Publishing House "Nauka", – 1976.

УДК 621.941.01; DOI 10.1872/MMF-2016-85

И.И. Козарь[1], Д.Ю. Колодяжный[2], Е.О. Ларионов[3]

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

[1]Козарь Иван Иванович, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: kii49@yandex.ru

[2]Колодяжный Дмитрий Юрьевич, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: kolod@mail.ru

[3]Ларионов Евгений Олегович, инженер, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-76-65, E-mail: beg3mot91@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрена методика определения наиболее значимых систематических составляющих суммарной погрешности при чистовой токарной обработке труднообрабатываемых, в том числе, титановых сплавов. Разработана модель образования суммарной погрешности для обеспечения требуемой точности деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых сплавов для авиационных двигателей.

Ключевые слова: труднообрабатываемые сплавы, титановые сплавы, чистовая токарная обработка, систематические составляющие, суммарная погрешность, модель образования суммарной погрешности.

Создание современных авиационных двигателей это сложная комплексная задача, базирующаяся на новейших достижениях в области аэро- и термодинамики, материаловедения, технологии, прочности, электроники, информатики. Вместе с тем, это дорогостоящее мероприятие, осуществляемое в жёсткой конкурентной борьбе на мировом рынке авиационной техники.

Современные материалы применяемые в авиационном двигателестроении материалы должны быть жаро- и эрозионностойкими,

обладать высокой жаропрочностью и низкой удельной массой. В настоящее время появилось большое количество вновь разработанных материалов и сплавов, свойства которых еще не до конца изучены. Традиционные методы разработки новых материалов сегодня уже исчерпали свои возможности. Например, повышение жаропрочности металлических материалов путем увеличения содержания легирующих элементов, технологий термохимического упрочнения достигло своих предельных возможностей.

Большой резерв повышения эксплуатационных характеристик конструкций лежит в использовании труднообрабатываемых соединений, в том числе сплавов на основе титана и никеля.

Жаропрочные сплавы на основе титана и никеля называют материалами следующего поколения благодаря благоприятному сочетанию комплекса физико-механических свойств. Они обладают высокими жаропрочностью и жаростойкостью, модулем упругости, высокой невозгораемостью в атмосфере воздуха, низкой плотностью. Создание таких сплавов, включая выбор композиции и выплавку, является очень сложной задачей. Однако, как показали предварительные исследования,

Выбор станочного оборудования, инструментов, приспособлений, режимов резания – задача, над которой работают ведущие мировые предприятия. Одновременно необходимо разрабатывать мероприятия по управлению процессом обработки и получению деталей заданной точности.

Постоянно возрастающая номенклатура выпускаемых изделий с одновременным усложнением их конструкции и технологии изготовления вызывают необходимость использования для механообработки этих изделий современного оборудования, позволяющего быстро перейти на выпуск новой продукции или её модернизацию при одновременном повышении производительности труда и снижении себестоимости производственного процесса [1 – 5].

Непрерывный рост требований к уровню качества выпускаемых изделий порождает увеличение количества и повышение качества контроля на всех этапах создания продукции. А известно, что любой контроль при дискретном характере получения измерительной информации и дискретном управлении технологическим процессом может выявить и компенсировать только часть составляющих погрешности обработки [6 – 7]. Поэтому перед выбором типа контроля необходимо иметь модель погрешности обработки, основанной на анализе причин, вызывающих отклонение от линейных размеров при механической обработке. Для этого необходимо проанализировать составляющие погрешности резания не только на качественном уровне, но и их

количественные показатели, то есть, определить способы и методы измерения этих величин.

Разнообразие средств контроля и методов получения измерительной информации при резании привело к необходимости представлять каждую составляющую погрешности обработки условно состоящей из двух частей: систематической и случайной. Систематическая – та часть составляющей погрешности, которая для всех деталей рассматриваемой партии остается постоянной или закономерно изменяется. При переходе от обработки одной партии деталей к другой ее величина и закон изменения могут меняться. Случайной является та часть составляющей погрешности, которая для различных деталей рассматриваемой партии имеет различные значения, а ее появление описывается некоторым случайным законом распределения. Такой подход к рассмотрению погрешности обработки дает возможность оценить основные источники погрешности и одновременно выявить ту часть из них, которую можно в дальнейшем исключить или устранить ее влияние (систематическая часть погрешности). Случайные же части составляющих погрешности на данном этапе развития средств контроля методами управления неустранимы и могут вносить только дополнительное влияние при устранении систематических погрешностей [8].

Наиболее значимыми систематическими составляющими суммарной погрешности обработки при точении являются[7]:

– погрешности из-за тепловых деформаций технологической системы;

– погрешности из-за упругих деформаций станка;

– погрешности из-за износа режущего инструмента;

Погрешности, возникающие в результате базирования и закрепления заготовки не рассматриваются, так как большая часть этих погрешностей может быть снижена или устранена полностью при проектировании технологического процесса.

На этапе проектирования технологического процесса, с целью выбора методов повышения точности обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, необходимо наличие методики оценки погрешности изготовления деталей. Она должна позволять заранее оценить погрешность обработки с существующими режимами резания и выбрать те режимы, которые обеспечат необходимую точность при максимально возможной производительности.

Важным являются пожелания индустриальных партнеров, заключающимися в том, что «немаловажным принципом, все более доминирующим на рынке металлообработки, является интерес к готовым для реализации комплексным техническим решениям, а не просто к набору оборудования и инструментов». Создание математических моделей погрешности обработки позволяет разрабатывать и использовать высоко оснащенные экспериментально-производственные комплексы, на которых

можно реализовать (с возможностью обработки больших объемов информации) разные технологии обработки заготовок.

Для создания методики оценки погрешности при изготовлении резанием деталей из труднообрабатываемых сплавов необходимо, чтобы модель изменения погрешности изготовления от времени обработки удовлетворяла следующим требованиям:

– модель должна иметь как количественные, так и качественные характеристики, близкие к реальному процессу формообразования, которые можно оценить с помощью экспериментальных исследований;

– модель должна позволять анализировать влияние отдельных составляющих на суммарную погрешность обработки и отражать их зависимость от режимов резания, материала детали и инструмента.

На основе известных данных и предварительных экспериментов, проведенных на кафедре «Технология машиностроения» СПбПУ можно сделать определенные выводы о характере погрешностей обработки при резании заготовок из труднообрабатываемых сплавов.

Составляющие, вызванные размерным износом режущего инструмента, носят систематический характер и могут быть вычислены заранее. В большинстве случаев обработки резанием именно эта составляющая погрешности дает наибольший вклад в общую погрешность обработки. По предварительным данным при резании труднообрабатываемых сплавов износ режущего инструмента резко возрастает, что приводит к значительному увеличению соответствующей систематической погрешности.

Составляющие погрешности обработки, вызванные упругими деформациями технологической системы, тоже носят систематический характер, так как могут быть вычислены заранее. Эти погрешности тоже могут достигать значительных величин при резании труднообрабатываемых сплавов. Анализ существующих технологий изготовления деталей авиационных двигателей показал возможность возникновения больших сил резания.

Величина систематических составляющих, вызванных тепловыми деформациями режущего инструмента, детали и элементов станка может быть уменьшена за счет применения СОЖ. Часть составляющей, связанная с нагревом инструмента уменьшается незначительно, так как инструмент постоянно находится в зоне резания и интенсивно нагревается.

Учитывая, что при чистовой обработке припуск колеблется в небольшом диапазоне, определялись эмпирические зависимости отдельных составляющих как функции от следующих факторов:

V – скорость резания, м/мин;

S – подача, мм/об;

R– радиус при вершине режущей пластины, мм.

Для определения характера зависимости параметров оптимизации от факторов и определения их диапазона варьирования на первом этапе экспериментальных исследований проводились однофакторные эксперименты. В результате было уставлено, что все изучаемые составляющие погрешности имеют степенные зависимости от перечисленных выше факторов.

Ниже приводится описание методики оценки отдельных составляющих суммарной погрешности.

При чистовой лезвийной обработке заготовок точных деталей особенно важен размерный износ режущего инструмента.

В общем случае относительный размерный износ резца u зависит от режимов резания: скорости резания; подачи; глубины резания и от характеристик режущего инструмента. Для известной геометрии режущего инструмента и традиционных материалов значение относительного размерного износа резца можно найти в справочниках [9].

С учетом сделанной выше оговорки для численной оценки относительного размерного износа резца u при чистовом точении новых труднообрабатываемых сплавов, рекомендуется пользоваться эмпирической формулой, по которой зависимость относительного размерного износа резца от режимов резания при работе конкретным инструментом будет выражаться формулой (1):

$$U_o = C_u V^{au} S^{bu} R^{du}, \quad (1)$$

где: C_u – коэффициент зависящий от геометрии и материала инструмента; au, bu и du – показатели степени V, S и R соответственно.

Имея эту зависимость можно рассчитывать погрешность вызванную износом режущего инструмента для конкретного технологического процесса.

$$\Delta_u = 2u\pi Dl/S, \quad (2)$$

где: D – диаметр заготовки, мм; L – длина обработки; S – подача, мм/об.

Погрешность обработки, зависящая от упругих деформаций технологической системы определяется по формуле (3):

$$\Delta_{\text{УПР.}} = j/\left(P_Y/P_Z C_p S^{0.75}\right), \quad (3)$$

где: j – жесткость системы Н/мм (определяется экспериментально для каждой единицы оборудования); C_p – коэффициент, зависящий от материала детали (для каждого материала определяется экспериментально);. P_Y и P_Z – составляющие силы резания, Н.

Так как попытки аналитического определения силы резания приводят к значительным погрешностям [10–11], то часто предпочитают составляющие силы резания рассчитывать по эмпирическим формулам (4) и (5):

$$P_Y = C_Y V^{ay} S^{by} R^{dy}, \quad (4)$$

ay, by и dy – показатели степени V, S и R соответственно.

$$P_Z = C_Z V^{az} S^{bz} R^{dz}, \quad (5)$$

az, bz и dz – показатели степени V, S и R соответственно.

Деформации и жесткость для конкретного станка определяются экспериментально по известным методикам [7].

Для прогнозирования тепловых деформаций резца в любой момент времени, необходимо знать закон изменения этих деформаций во времени.

Как показали предварительные исследования наиболее точно кривую зависимости теплового удлинения резца от времени обработки описывает эмпирическая зависимость:

$$\xi = \mathrm{K}(\tau + \mathrm{A})(1 - e^{-\alpha\tau}), \quad (6)$$

где: ξ – температурное удлинение резца в момент времени τ; e – основание натуральных логарифмов; K и A – коэффициенты, зависящие от режимов резания, материала детали, материала и формы резца; α – коэффициент, зависящий от материала и формы режущего инструмента.

Для определения коэффициентов уравнения по экспериментальным данным необходимо воспользоваться методом наименьших квадратов, для этого согласно [12] надо минимизировать следующую функцию:

$$\sum_{i=1}^{n} (\xi_i - K(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i}))^2 = \Phi \to min, \quad (7)$$

где: ξ_i – экспериментальное значение температурного удлинения резца в момент времени τ_i; n – количество точек, снятых за время удлинения резца.

Для решения этой задачи частные производные приравниваются к 0:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Phi}{\partial K} = -\sum_{i=1}^{n} 2(\xi_i - K(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i}))(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i}) = 0 \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial A} = -\sum_{i=1}^{n} 2\left(\xi_1 - K(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i})\right)(1 - e^{-\tau_i}) = 0 \\ \dfrac{\partial \Phi}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^{n} 2\left(\xi_1 - K(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i})\right)(A + \tau_i) K\tau_i e^{-\alpha\tau_i} = 0 \end{cases}$$

После преобразования этих уравнений и выделения коэффициентов A, K и α, получается следующая система нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} K = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} \xi_i (A - \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i})}{\sum_{i=1}^{n} (A + \tau_i)^2 (1 - e^{-\alpha\tau_i})^2} \\ A = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} \xi_1 (1 - e^{-\alpha\tau_i}) - \sum_{i=1}^{n} K\tau_i (1 - e^{-\tau_i})^2}{\sum_{i=1}^{n} K(1 - e^{-\alpha\tau_i})^2} \\ \alpha = \sum_{i=1}^{n} \left(\xi_1 - K(A + \tau_i)(1 - e^{-\alpha\tau_i})\right)(A + \tau_i)\tau_i e^{-\alpha\tau_i} + \alpha \end{cases}$$

Степенные зависимости коэффициентов A, K и α от перечисленных выше факторов имеют вид:

$$A = C_A V^{aA} S^{bA} R^{dA},$$
$$K = C_K V^{aK} S^{bK} R^{dK},$$
$$\alpha = C_\alpha V^{a\alpha} S^{b\alpha} R^{d\alpha}.$$

Для наглядности и удобства проведения расчетов методика оценки погрешности обработки резанием деталей авиационных двигателей из труднообрабатываемых сплавов сведена в таблицу 1.

Таблица 1 – Методика оценки погрешности обработки резанием деталей авиационных двигателей из труднообрабатываемых сплавов

Рассчитываемая величина	Вводимые параметры	Формула
$\Delta_{\text{сист}}$ (мкм)	Δ_u, $\Delta_{\text{УПР.}}$, ξ (мкм)	$\Delta_{\text{сист}} = 2(\Delta_u + \Delta_{\text{УПР.}} + \xi)$
Δ_u (мкм)	D, l (мм), S (мм/об), u	$\Delta_u = 2u\pi Dl/S$
u	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$U_o = C_u V^{au} S^{bu} R^{du}$
$\Delta_{\text{УПР.}}$ (мкм)	j (Н/мм^2), P_Y, P_Z (Н), C_P, S (мм/об)	$\Delta_{\text{УПР.}} = j/(P_Y/P_Z C_p S^{0.75})$
P_Y (Н)	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$P_Y = C_Y V^{ay} S^{by} R^{dy}$
P_Z (Н)	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$P_Z = C_Z V^{az} S^{bz} R^{dz}$
ξ (мкм)	К, А, α, τ (мин)	$\xi = К(\tau + А)(1 - e^{-\alpha\tau})$
А	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$A = C_A V^{aA} S^{bA} R^{dA}$
K	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$K = C_K V^{aK} S^{bK} R^{dK}$
α	V (м/мин), S (мм/об), R (мм)	$\alpha = C_\alpha V^{a\alpha} S^{b\alpha} R^{d\alpha}$

Для определения показателей степени для всех приведенных выше зависимостей были проведены плановые эксперименты типа:

$$N = 2^3 ,$$

где: N - число опытов; 3 - число факторов; 2 - число уровней.

Исследовались образцы деталей авиадвигателей из титановых сплавов ВТ8 и ВТ41.

Все эксперименты проводились с использованием многопараметрического стенда разработанного на кафедре "Технология машиностроения" СПбПУ.

Экспериментальная установка базируется на токарном станке и включает в себя следующие измерительные системы [13]:

- система измерения температурной деформации;
- динамометр для измерения трех составляющих силы резания;
- тепловизор, измеряющий температуру в зоне резания;
- устройство, расположенное в задней бабке, измеряющее размерный износ и тепловые деформации инструмента.

Вся информация собирается контроллером и передается на компьютер, который предварительно обрабатывает информацию и записывает ее. Компьютер соединен по сети с другим компьютером, на который сбрасывается информация после проведения эксперимента.

При исследовании обоих материалов диапазоны варьирования факторов были следующими:

- скорость резания – (40…80) м/мин;
- подача – (0,041…0,082) мм/об;
- радиус при вершине – (0,1…0,4) мм.

Ниже приведены примеры зависимостей, полученные для титанового сплава ВТ8.

$$U_o = 11{,}3 \cdot V^{0{,}11} \cdot s^{0{,}7} \cdot R^{0{,}34}$$
$$P_z = 335 \cdot V^{0{,}07} \cdot s^{0{,}58} \cdot R^{0{,}09}$$
$$P_y = 85{,}3 \cdot V^{0{,}34} \cdot s^{0{,}5} \cdot R^{0{,}34}$$
$$\mathrm{A} = 54 \cdot V^{-0{,}03} \cdot s^{-0{,}06} \cdot R^{0{,}08}$$
$$\mathrm{K} = 48{,}5 \cdot 10^9 \cdot V^{-5{,}48} \cdot s^{-2{,}45} \cdot R^{1{,}04}$$
$$\alpha = 6{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot V^{1{,}22} \cdot s^{0{,}12} \cdot R^{-0{,}07}$$

Используя эти зависимости определяются все названные выше систематические составляющие погрешности обработки. Суммирование этих составляющих производится алгебраически с учетом их знака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудов А.В. Оптимизация режимов резания при обработке на станках с ЧПУ с целью повышения точности размеров и формы деталей в процессе точения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Рыбинск, 2000.– 266 с.
2. Система автоматизированного проектирования. В 9-ти книгах. Кн.6. Автоматизация конструкторского и технологического

проектирования: Учебное пособие для вузов/ Н.М. Капустин, [и др.]; под ред. И.П. Норенкова. – М.: Высшая школа, 1986. – 191 с.
3. Капустин Н.М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Высшая школа – М.: Высш. шк., 2007.– 416 с.
4. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки ЭВМ.– М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
5. Горанский Г.К., Бендерова Э.И. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1981. – 455 с.
6. Анухин В.И., Макарова Т.А. Возможности управляющего контроля. – Л.: ЛДНТП, 1990. – 30 с.
7. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения. Издание 3: Учеб. Пособие для вузов/ Э.Л.Жуков [и др.]; под ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Высш. шк., 2008.– 278 с.
8. Анухин В.И., Макарова Т.А. Компенсация погрешности обработки точения при автоматизации процесса. Международная научно-практическая конференция 03-04.03.2014./ Наука и технологии: шаг в будущее. Прага, Чехия. С 30–39.
9. Барановский Ю. В. Режимы резания металлов. Справочник. Изд. третье переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 384 с.
10. Palmer W.B., Oxley P.L.B. Mechanics of metal cutting. / W.B. Palmer, P.L.B. Oxley // Proc. Inst. Mech. Eng. 173. P. 623–654.
11. Shaw M., Cook N., Finnie J. // Transactions of the ASME. – 1963. – vol. 75. – P. 273–288.
12. Кендл М. Временные ряды/ М. Кендл. М.: Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
13. Паневин С.С., Любомудров С.А. Установка для исследования процесса резания при точении титановых сплавов//.В кн.: Неделя науки СПбГПУ. Материалы научно-практической конференции с международным участием.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 245-247.

I.I. Kozar, D.Y. Kolodyazhny, E.O. Larionov

THE ESTIMATED ACCURACY OF THE MACHINING OF PARTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT ENGINE

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**,** Russia

Abstract

The article describes the method of determining the most significant systematic components of the total error at the finish machining of hard to machine, including titanium alloys. The developed model of education total

errors to ensure the required accuracy of parts produced from hard alloys for aircraft engines.

Key words: hard alloys, titanium alloys, finish turning processing, the systematic components of the total error model the total error education.

REFERENCES

[1] Poods A. V. Optimization of cutting parameters during machining on CNC machines with the aim of increasing the accuracy of dimensions and shape of parts in the turning process: the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences. Rybinsk, 2000.– 266 p.

[2] Computer-aided design. In 9 books. KN.6. Automation of design and technological designing: the textbook for high schools/ N. M. Kapustin, [and others]; under the editorship of I. P. Norenkov. M.: Higher school, 1986. 191 p.

[3] Kapustin N. M. Automation of production processes in mechanical engineering. Graduate school. Moscow. Higher. Sch., 2007. 416 p.

[4] Kapustin N. M. Development of technological processes of processing of the computer. Moscow. Mashinostroenie, 1976. 278.

[5] Goranska G. K., Bederova E. I. Technological design in complex automated systems for preparation of production. M.: Mashinostroenie, 1981. 455 p.

[6] Anuchin V. I., Makarova T. A. the Possibilities of management control. – Leningrad, 1990. 30 p.

[7] Mechanical engineering: In 2 kN. KN. 1. Fundamentals of manufacturing engineering. Issue 3: Proc. Manual for schools/ E. L. Zhukov [and others]; edited by L. S. Murashkina. Moscow. Higher. Sch., 2008. 278.

[8] Anuchin V. I., Makarova T. A. error Compensation processing sharpening with process automation. International scientific-practical conference 03-04.03.2014./ Science and technology: step into the future. Prague, Czech Republic. With 30-39.

[9] Baranovsky V. Y. the cutting of metals. Guide. Ed. the third reprocessing. and extra. Moscow. Mashinostroenie, 1972. 384 p.

[10] Palmer W. B., Oxley, P. L. B. Mechanics of metal cutting. / W. B. Palmer, P. L. B. Oxley // Proc. Inst. Mech. Eng. 173. Pp. 623-654.

[11] Shaw M., Cook N., Finnie J. // Transactions of the ASME. 1963. vol. 75. Pp. 273-288.

[12] Kendall, M. Time series/ M. Kendall. Moscow. Finance and statistics, 1981. 199 p.

[13] Panevin S. S., lubomudrov S. A. Installation for research of the cutting process during the turning of titanium alloys//.In the book: The week of science of SPbSPU. Materials of scientific-practical conference with international participation. SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University, 2014. Pp. 245-247.

УДК 681.518; DOI 10.1872/MMF-2016-86

В.А. Коковин, А.А. Евсиков

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область
Тел.: (4967)31-0234, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.

Александр Александрович Евсиков, к.т.н.,
заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино", Россия, Протвино, Московская область
Тел.: (4967)31-0190, E-mail: eaa@uni-protvino.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы алгоритмических зависимостей при управлении распределенными взаимосвязанными технологическими процессами (ВТП). Приведена упрощенная модель системы управления распределенными технологическими платформами, находящимися в неоднородной среде, сформулированы требования к сетевой системе, обеспечивающей взаимодействие различных подсистем.

Ключевые слова: взаимосвязанные технологические процессы, управление, силовые преобразователи, потоки данных.

Автоматизации технологических процессов больших промышленных или научных комплексов, когда существует большая территориальная и алгоритмическая распределенность, связана с разработкой сетевых систем для обеспечения взаимодействия отдельных технологических установок. Как правило, в качестве такой сетевой системы выступает телекоммуникационная система. В общем случае каждая установка реализует свою часть заданного алгоритма, функционируя в автономном режиме, после чего передает результаты другим установкам. Результатом выполнения могут выступать информационные данные, материалы, изделия и т.д. По таким алгоритмам работает большинство промышленных комплексов. Другой случай - когда результат работы распределенной

автоматизированной системы создается большинством технологических подсистем совместно в реальном времени и при этом технологические процессы взаимосвязаны по алгоритмам.

Примером таких взаимосвязанных технологических процессов могут служить подсистемы прокатного стана непрерывной прокатки труб [1]. Основная особенность технологического процесса непрерывной прокатки – это взаимосвязь отдельных клетей (систем прокатных валков) непрерывного стана через прокатываемую трубу с соблюдением равенства объема металла, проходящего через каждую клеть в единицу времени.

Другим примером ВТП могут служить технологические подсистемы циклического ускорителя заряженных частиц. Каждый ускоритель оснащен определенными средствами таймирования, которые необходимы для обеспечения режима реального времени систем управления и синхронизации технологических процессов на ускорителе [2]. Технологические процессы отдельных подсистем являются взаимосвязанными с точки зрения решения главной задачи – получения устойчивого пучка заряженных частиц с заданными параметрами

В приведенных примерах к работе сетевых систем, обеспечивающих взаимодействие технологических подсистем управления, предъявляются специальные требования, определяемые зависимостями ВТП.

Кроме того, необходимо отметить функциональные и структурные особенности современных распределенных систем управления. Анализируя их структуру можно выделить цепочку информационных потоков между различными подсистемами: информация от датчиков одних технологических процессов преобразуется телекоммуникационной системой в потоки данных для передачи другим подсистемам, и эти потоки, обрабатываясь вычислителями в реальном времени превращаются в управляющие потоки для силовых преобразователей. Реализация такой парадигмы управления требует строгой детерминированности и быстрой реакции управляющих систем. В работах [3,4] анализируется адаптивная управляющая система силового преобразователя ультразвуковой технологической установки, обрабатывающая потоки данных в вычислителе, построенного на основе модели *data flow* [5]. В работе [6] дается сравнение модели вычисления *control flow* и *data flow* при управлении быстропротекающими технологическими процессами.

В качестве примера ВТП рассмотрим задачу выравнивания (в заданной плоскости) поверхности географически распределенных технологических платформ (ТП), находящихся в неоднородной среде (например, на водной поверхности). Платформы могут находиться по отношению друг к другу на значительном расстоянии. Эту задачу можно решить методом распространения лазерного луча через все платформы. Необходимо управляя технологическими платформами замкнуть световую траекторию, т.е. построить плоскость через три точки. Согласно аксиоме

стереометрии: через любые три точки, не лежащие на одной прямой, проходит плоскость, и притом только одна.

На рис.1 изображена упрощенная структура трех технологических платформ – ТП1, ТП2 и ТП3. На каждой платформе размещены отражатели лазерного луча, а на ТП1 – генератор лазерного излучения. Каждая платформа может перемещаться по трем координатам *X, Y, Z* и поворачиваться относительно вертикальной оси на угол *φ*. Таким образом текущая координата центра тяжести каждой платформы будет:

K1 ={X1,Y1,Z1, φ1} – координаты ТП1

K2 ={X2,Y2,Z2, φ2} – координаты ТП2

K3 ={X3,Y3,Z3, φ3} – координаты ТП3

Перемещение по соответствующей координате выполняется с помощью привода, управляемого от локальной системы управления (ЛСУ), на основании анализа датчиков обратной связи и информации, поступающей от других платформ. На каждую платформу воздействуют внешние возмущения (течения, ветер, температура среды и т.д.), обозначенные как интегрированные по каждой координате силы *F1, F2* и *F3*.

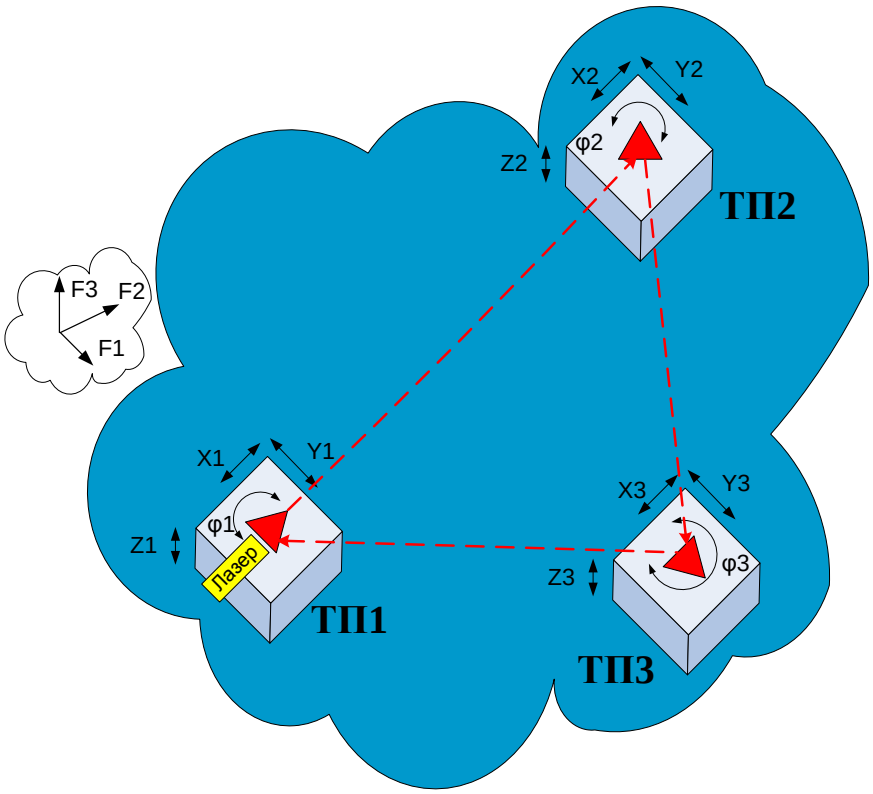


Рис.1 Структура распределенных технологических платформ

Задача ЛСУ заключается в следующем:

- Обработка информационных сообщений от других ТП. На основании этих сообщений корректируется траектория движения платформы.

- Определение текущих координат платформы с помощью датчиков обратной связи и сравнение их с заданными.
- Формирование оптимальных управляющих воздействий для отработки заданных координат согласно выбранного закона управления и с учетом внешних возмущающих воздействий.
- Формирование сообщений для ЛСУ других ТП.

Локальная система управления реализует алгоритм управления платформой исходя из решения приведенных выше задач.

Поскольку технологические процессы (формирование траектории движения платформ) взаимосвязаны и распределены географически, то управление системой платформ должна обеспечивать распределенная система управления (РСУ). Составной частью РСУ является телекоммуникационная система. Взаимосвязанность отдельных технологических процессов, большие расстояния между подсистемами и малое время реакции ЛСУ накладывают определенные требования при построении телекоммуникационной системы:

- Передача данных от одной ЛСУ к другой (передача параметров выполнения технологических процессов).
- Детерминированность передачи данных от одной ЛСУ к другой.
- Минимальное время передачи данных.
- Обработка больших объемов данных и преобразование их в события.
- Кодирование данных в виде сообщений.

Приведенные требования существенно влияют на многие характеристики телекоммуникационной системы. Это топология телекоммуникационной сети, среда распространения сигналов, способ доступа и т.д. Кроме того, при проектировании телекоммуникационной системы большое влияние оказывают зависимости технологических процессов.

В работе [7] даны методика и определение зависимости управляющих алгоритмов через построение графов зависимостей. Граф зависимостей по данным определен как $G_D = \{A,R_D\}$, где $A = \{A_1,A_2,A_3\}$ – множество алгоритмов управления технологическими платформами (рис.1), $R_D \subseteq A \times A$ - множество связей по данным между алгоритмами. Граф зависимостей по управлению определен как $G_C = \{A,R_C,F\}$, где $A = \{A_1,A_2,A_3\}$ – множество алгоритмов управления технологическими платформами, $R_C \subseteq A \times A$ - множество связей по управлению между алгоритмами, $F = \{F_1,F_2,F_3\}$ – множество внешних сил, воздействующих на платформы (предполагая, что для всех платформ эти силы имеют одинаковую природу).

Будем считать, что алгоритм A_j (рис.2,а) зависит по данным от A_i, если алгоритм A_i в результате своего выполнения модифицирует некую переменную, а алгоритм A_j ее использует. Тем самым определена зависимость по данным. Аналогично алгоритм A_j (рис.2,б) зависит по управлению от A_i, если выполнение алгоритма A_j зависит от выполнения алгоритма A_i . Таким образом, в приведенном примере (рис.1) есть только зависимость по данным.

а) б)

Рис. 2 Зависимость алгоритмов: а) по данным, б) по управлению.

Входными параметрами управления ЛСУ (рис.1) являются сигналы корректировки от распределенной системы управления

Задача распределенной системы управления состоит в синхронизации работы локальных многоконтурных регуляторов для выполнения поставленной задачи – построении плоскости.

В приведенном примере (рис.1) основные зависимости алгоритмов управления ВТП связаны с зависимостями по данным и по управлению. Зависимость по данным определяет выбор определенного алгоритма в исполняемом технологическом процессе. Зависимость по управлению определяется заданным порядком исполнения алгоритмов. Особое внимание при анализе зависимостей необходимо уделить взаимосвязанным временным рядам параметров технологических процессов. Анализ временных рядов таких параметров некоторых физических процессов (например, изменение температуры, скорость изменения ее и т.д.), в разных технологических процессах может показать взаимосвязанность ТП, что даст определенные качественные требования для распределенной системы управления, а, следовательно, и для сетевой системы. В работе [8] проанализированы особенности проектирования телекоммуникационных систем, работающих в составе систем управления ВТП

Одним из эффективных способов выявления зависимостей является построение графа зависимостей программного обеспечения систем

управления [9]. В работе [10] на основе анализа зависимостей инструкций нижнего уровня даны рекомендации по распараллеливанию программ, как средство повышения производительности систем управления.

Алгоритмические зависимости при управлении распределенными ВТП существенно усложняют систему управления. Добавляются требования по детерминированной доставке и обработке потоков данных, синхронизации и таймирования процессов в различных подсистемах, т.е. выстраивается цепочка: источники информации (датчики), телекоммуникационная система, силовые преобразователи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С. Автоматизация прокатного производства. – М.: Металлургия, 1984. – 472 с.
2. V. Komarov, V. Kokovin etc. Modernization of U-70 general timing system. // Proceedings of the 10th ICALEPCS Int. Conf. on Accelerator & Large Expt. Physics Control Systems. Geneva, 10 - 14 Oct 2005, PO2.104-5
3. Vladimir I. Diagilev, Valery A. Kokovin, Saygid U. Uvaysov Designing a power converter with an adaptive control system for ultrasonic processing units. Advances in Mechanical Engineering, Springer, 2015.- P. 39-47, DOI: 10.1007/978-3-319-15684-2
4. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Построение силового преобразователя с адаптивной системой управления для ультразвуковых технологических установок // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й международной научно-практической конференции конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 1122-1131.
5. Dennis J. “Data flow ideas for supercomputers”. IEEE Society, 28th international conference, San Francisco, 1984, pp. 15-19.
6. Коковин В.А., Евсиков А.А. Использование метода потокового управления при автоматизации технологических установок // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й международной научно-практической конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 1275-1284.
7. Дубинин В.Н., Вяткин В.В., Дроздов Д.Н. Опережающие вычисления в системах функциональных блоков IEC 61499 // Труды Международной научно-технической конференции “Современные информационные технологии”, Пенза, 2013, вып. 17. – С. 9-24
8. Коковин В.А. Особенности построения телекоммуникационной системы для управления взаимосвязанными технологическими процессами // Современное состояние и перспективы развития технических наук: материалы Международной научно-практической конференции - Уфа, 2015.- С. 56-59

9. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. - СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
10. Wall D.W. Limits of instruction-level parallelism // Proc. 4th Int. Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-91). - P. 176-188.

Kokovin V.A., Evsikov A.A.

ALGORITHMIC DEPENDENCE FOR CONTROL OF DISTRIBUTED INTERCONNECTED PROCESSES

State University “Dubna”, Branch “Protvino”, Russia, Moscow Region

Abstract

The paper discusses the algorithmic dependencies in the control of distributed interconnected process. Shows a simplified model of the distributed control system technology platforms, located in a heterogeneous environment, the requirements to a network system that provides interaction between different subsystems.

Key words: interconnected processes, control, power converter, data flows.

REFERENCES

[1] Vydrin V.N., Fedosienko A.S. Automation of rolling manufacture. M.: Publishing "Metallurgy", 1984. 472 p. (rus.)
[2] V.Komarov, V.Kokovin etc. Modernization of U-70 general timing system. Proceedings of the 10th ICALEPCS Int. Conf. on Accelerator & Large Expt. Physics Control Systems. Geneva, 10 - 14 Oct 2005, PO2.104-5
[3] Vladimir I. Diagilev, Valery A. Kokovin, Saygid U. Uvaysov Designing a power converter with an adaptive control system for ultrasonic processing units. Advances in Mechanical Engineering, Springer, 2015.- P. 39-47, DOI: 10.1007/978-3-319-15684-2
[4] Diagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Design a power converter with an adaptive control system for ultrasonic processing units // Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Proceedings of the 3rd International scientific conference / St-Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2013. Pp. 1122-1131.
[5] Dennis J. “Data flow ideas for supercomputers”. IEEE Society, 28th international conference, San Francisco, 1984, pp. 15-19.
[6] Kokovin V.A., Evsikov A.A. Streaming techniques use management automation in manufacturing plants // Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Proceedings of the 4th International scientific

conference / St-Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2014. Pp. 1275-1284.
[7] Dubinin V.N., Vjatkin V.V., Drozdov D.N. A speculative execution method for IEC 61499 function block systems // Proceedings of International scientific conference “Computer-Based Conference”, Penza, 2013, v. 17. Pp. 9-24
[8] Kokovin V.A. Features of the construction of the telecommunications system to control interdependent processes // Current state and prospects of development of engineering science: Proceedings of the International scientific conference. Ufa, 2015. Pp. 56-59
[9] Kasyanov V.N., Evstigneev V.A. Graphs in programming: processing, visualization and application. St-Petersburg: Publishing House BHV, 2003. 1104 p.
[10] Wall D.W. Limits of instruction-level parallelism // Proc. 4th Int. Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-91). Pp. 176-188.

УДК 62-52; DOI 10.1872/MMF-2016-87

С. А. Любомудров[1], Т. А. Макарова[2], С. С. Паневин[3]

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ

[1]Любомудров Сергей Александрович, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург,
E-mail: Lyubomudrow@yandex.ru

[2]Макарова Татьяна Алексеевна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург,
E-mail: makarovata2004@gmail.com

[3]Паневин Сергей Сергеевич, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург,
E-mail: guny1992@mail.ru

Аннотация

Описаны принцип работы и конструкция многопараметрического автоматизированного стенда для исследования точения труднообрабатываемых сплавов. Приведены результаты исследований, полученные при точении титанового сплава ВТ-8.

Ключевые слова: токарная обработка, экспериментальная установка, титановые сплавы, точность, обрабатываемость.

Современные предприятия авиационной и аэрокосмической техники решают сложные задачи при проектировании изделий новых поколений (снижение стоимости производства и эксплуатации, в том числе путем упрощения конструкции и снижения количества деталей и узлов), требующие создания материалов, способных эффективно работать в условиях длительного циклического воздействия высокотемпературных агрессивных среди технологий их обработки [1].

Эти материалы должны обладать высокой жаропрочностью и низкой плотностью, стойкостью к факторам космического пространства. Традиционные методы разработки новых материалов сегодня уже исчерпали свои возможности. Например, повышение жаропрочности

металлических материалов путем увеличения содержания легирующих элементов, технологий термохимического упрочнения достигло своих предельных возможностей. То же самое можно сказать о керамике. Повысить стойкость к термоударам и термоцикличности, которые возникают при эксплуатации ответственных узлов аэрокосмической техники, традиционными способами сегодня не удается [2].

Новые материалы обладают высокими эксплуатационными свойствами, но их обработка точением представляет значительную проблему. Однако до сих пор, большинство деталей в машиностроении получается обработкой на станках резанием, поэтому разработка технологии резания современных материалов, в том числе сплавов на основе титана является актуальной задачей.

Мировые ведущие отрасли - авиационная, ракетная, космическая с каждым годом все интенсивнее используют труднообрабатываемые материалы со специальными физико-химическими свойствами. Обработка этих материалов имеет свои характерные особенности, качественно отличающие ее от механообработки конструкционных материалов. Согласно исследованиям Д.Г. Евсеева [3], А.С. Верещаки [4], Ю.Г. Кабалдина [5, 6], Л.В. Окорокова [7], В.Н. Подураева [8], Н.И. Резникова [9], Н.В. Талантова [10], М.В. Шатерина [11] и др. основные проблемы при резании жаропрочных и нержавеющих сталей определяются следующими факторами:

– высоким упрочнением материала в процессе деформации резанием, ввиду специфических особенностей строения кристаллической решетки;

– низкой теплопроводностью обрабатываемого материала, приводящей к повышенной температуре в зоне контакта и к активизации адгезионных и диффузионных явлений;

– способностью сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах, что приводит к высоким удельным нагрузкам на поверхностях контакта детали с режущим инструментом;

– большой истирающей способностью жаропрочных и нержавеющих сталей, обусловленной наличием второй фазы (кроме твердого раствора) образующей интерметаллидные включения;

– невысоким качеством поверхности из-за повышенной пластичности труднообрабатываемых материалов;

– значительной разнозернистостью и неравномерностью плохо деформируемых зон, приводящей к резкому возрастанию сил резания, температур и к быстрому разрушению режущей части инструмента.

Принимая во внимание основные проблемы, возникающие при резании этих материалов, необходимо изучить наиболее важные факторы, определяющие возможность эффективной обработки резанием высокопрочных, жаропрочных и других труднообрабатываемых материалов:

– подходы к выбору режимов резания с целью минимизации энергосиловых параметров и управления тепловыми потоками в зоне резания для обеспечения заданного качества поверхности;

– вопросы образования погрешности обработки при точении заготовок, с целью обеспечения точности размеров;

– методы создания высокой жесткости и виброустойчивости элементов технологической системы.

Для решения выше изложенных задач необходимо разработать математическую модель, связывающую параметры технологического процесса (скорость резания, подача и т. д.) с показателями точности (точность размеров, формы и т. д.) и производительности (время обработки, стойкость инструмента и т. д.).

Для создания математических моделей необходимо: определение механических характеристик, как для материала заготовки, так и материала режущего инструмента при различных температурах нагрева; определение зависимости температуры в зоне резания от скорости резания.

Кроме этого следует установить:

– связь стойкости режущего инструмента от интенсивности его износа при точении труднообрабатываемых материалов;

– определить критерии допустимого износа режущего инструмента при чистовом точении труднообрабатываемых материалов;

– установить степень влияния сил резания на износ режущего инструмента и вибрации при резании;

– установить корреляцию между параметрами обработки и качеством обработанной поверхности;

– определить основные составляющие, влияющие на точность обработки и способы компенсации погрешностей, возникающих при формообразовании.

Создание такой математической модели требует проведения большого количества экспериментов за ограниченный интервал времени.

В настоящее время наблюдается два подхода к созданию математических моделей обработки резанием:

1 – испытываются непосредственно характеристики технологического оборудования (как правило, станков с ЧПУ или модулей), на нем же проводятся статистические мероприятия по обработке заготовок, после чего создается модель к конкретным условиям обработки;

2 – создается специальная экспериментальная установка, способная в процессе резания накапливать огромное количество информации о качестве входных и выходных параметров, производить обработку этой информации, проектировать модели в зависимости от условий резания и доминирующих составляющих погрешности обработки; проверять эти модели экспериментальным и вычислительными методами, а потом рекомендовать их использование с привязкой на конкретное

рекомендуемое оборудование, где они дадут максимальный эффект по получению возможно максимальной точности обработки.

В работе [12] подчеркивается, что «немаловажным принципом, все более доминирующим на рынке металлообработки, является интерес к готовым для реализации техническим решениям, а не просто к набору оборудования и инструментов». Поэтому большое внимание в последние годы уделяется созданию высоко оснащенных экспериментальных комплексов, на которых можно реализовать (с возможностью обработки больших объемов информации) разные технологии обработки заготовок с целью создания математических моделей погрешности обработки.

«Универсальный интеллектуальный диагностический комплекс для контроля токарных станков» описывается в работе [13]. Приводится описание универсального интеллектуального диагностического комплекса для контроля токарных станков, который осуществляет контроль технологического процесса точности изготовления детали и износа резца. Инструментом для выполнения перечисленных функций является измерение траекторий формообразующих элементов токарного станка. Контроль точности изготовления детали заключается в расчете и построении виртуальной детали в процессе ее изготовления и расчете регламентированных показателей точности. Контроль износа резца состоит в определении величины смещения траектории оси заготовки на холостом ходу и при резании.

В работе [14] рассматривается «стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки». Повышение эффективности использования стенда происходит за счет автоматизированного управления сбором информации.

«Самообучающаяся технологическая система обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя» разработана в Брянском государственном техническом университете [15]. Система позволяет обеспечить повышение заданных параметров качества поверхностного слоя (шероховатость, остаточные напряжения, поверхностная микротвердость, комплексный параметр C_x) деталей машин при обработке новых материалов, для которых отсутствуют справочные данные по условиям обработки.

Анализируя существующие исследования и практические решения механической обработки деталей из титановых сплавов у нас в стране, можно сделать вывод, что возрастающий объем выпуска и жесткие сроки на изготовление деталей для авиационно-космической техники (АКТ) требуют использования эффективных организационно-технических решений при механической обработке. А эффективность механической обработки заготовок этих деталей в настоящее время недостаточна из-за высокой трудоемкости и существенной зависимости от квалификации

исполнителя. Закономерности изготовления деталей из таких материалов мало исследованы как теоретически, так и экспериментально.

Кроме того, возможности современного оборудования и инструментальных материалов недостаточно эффективно используются из-за отсутствия практических рекомендаций. К тому же применение современного оборудования, позволяющего реализовать комплексный подход к повышению эффективности, требует совершенствования применения отечественных САПР

В то же время механообработка при изготовлении изделий АКТ является единичным производством с изготовлением больших номенклатур (свыше 26000 номенклатур деталей и сборочных единиц в одном изделии) и малых партий (12-36 деталей - среднегодовая партия для одной номенклатуры) деталей.

Для решения всех этих проблем необходимо создание автоматизированной экспериментальной установки, в дальнейшем автоматизированный многопараметрический стенд (АМС), позволяющей в процессе резания накапливать огромное количество информации о качестве входных и выходных параметров, производить обработку этой информации, проектировать модели в зависимости от условий резания и доминирующих составляющих погрешности обработки; проверять эти модели экспериментальным и вычислительными методами, а потом рекомендовать их использование с привязкой на конкретное рекомендуемое оборудование.

Разработка стенда

В состав АМС, схема которого приведена на рисунке 1, включены следующие функциональные блоки:

1 – система измерения температурной деформации резца; 2 – резец; 3 – динамометр; 4 – деталь; 5 – прибор для измерения шероховатости поверхности; 6 – скоба для измерения диаметра детали; 7 – тепловизор; 8 – устройство для измерения положения вершины резца; 9 – устройство для измерения положения державки резца; 10 – монитор; 11 – компьютер; 12 – блок сбора и обработки информации.

Основой для создания АМС, схема которого приведена на рисунке 1, был выбран универсальный токарный станок TURNADO 230/1000V.

В процессе механической обработки заготовок на основные элементы технологической системы (элементы станочного оборудования, режущий инструмент, станочные приспособления и обрабатываемую заготовку) воздействуют силы, возникающие в результате деформирования срезаемого слоя металла и поверхности обрабатываемой детали, а также силы трения по передним и задним поверхностям режущего инструмента [16].

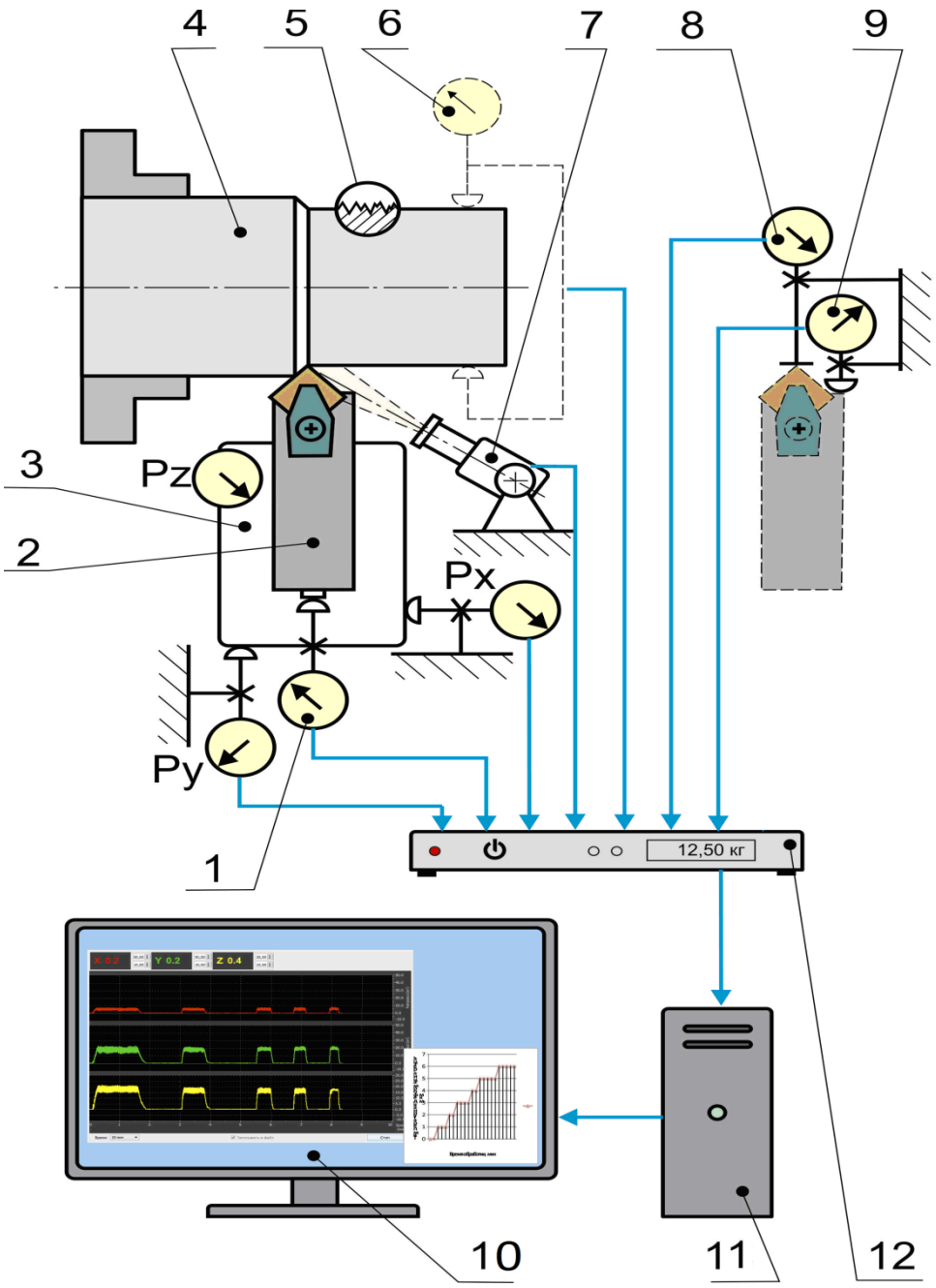


Рисунок 1 – Схема автоматизированного многопараметрического стенда

Равнодействующую этих сил удобно разложить на три взаимно-перпендикулярные составляющие, направление которых совпадает с направлением главного движения и движения подачи.

Pz – тангенциальная составляющая силы резания. Направление действия данной силы касательно к поверхности резания и совпадает с направлением главного движения (с вектором скорости резания). Всегда имеет наибольшую величину. Определяет обрабатываемость материала резанием.

Px – осевая составляющая силы резания. Данная сила действует

параллельно оси главного вращательного движения резания в направлении, противоположном направлению подачи. По величине «Px» определяется прочность механизма подачи станка;

Py – радиальная составляющая силы резания. Данная сила направлена перпендикулярно оси обрабатываемой заготовки параллельно основной плоскости, т.е. по радиусу главного вращательного движения резания. Определяется для расчета параметров жесткости технологической системы (деформации узлов станка, детали и др.).

В процессе резания данные силы действуют на все составляющие технологической системы, поэтому точное определение величины и направления сил резания необходимо:

– для прочностных расчетов станочного оборудования, режущего инструмента, приспособлений и оснастки;

– для расчета точности и качества поверхности обработанной детали;

– при проектировании систем управления технологическими процессами;

– для изучения и объяснения физической сущности процессов резания.

Для измерения составляющих сил резания был сконструирован динамометр с цифровым выходом, конструкция которого крепится на суппорте токарного станка вместо резцедержателя (см. рис 1. позиция 3).

За основу динамометра взята конструкция Б.И. Мухина. Непосредственно в корпусе динамометра была заменена печатная плата предварительного трёхканального усилителя. В новой схеме усилителя использованы прецизионные операционные усилители OP177, имеющие весьма малый дрейф по постоянному току и очень небольшой уровень шумов.

Разработанный динамометр позволяет измерять все три составляющие силы резания одновременно с точностью до 2 Н и одновременно обрабатывать полученные данные.

Для создания математической модели необходимо иметь информацию о температуре в зоне резания. Для измерения температурного поля на верхней поверхности стружки и передней поверхности резца был применен тепловизор модели BALTECH TR-01200, который крепится непосредственно над зоной обработки (см. рис 1 позиция 7). Постоянная съемка зоны резания тепловизором позволяет зафиксировать момент выхода резца из металла и определить температурное поле передней поверхности резца с одновременной фиксацией температуры верхней поверхности стружки. Оценка ведется с учетом различных заранее определенных коэффициентов излучения стружки и передней поверхности резца.

Важной характеристикой стойкости инструмента является размерный износ резца [17]. Для измерения размерного износа резца непосредственно

на станке было разработано приспособление, установленное в задней бабке станка. Измерение размерного износа происходит после каждого прохода. За счет одновременного измерения положения державки резца (рис. 1 позиция 9) и положения его вершины (рис. 1 позиция 8), которые расположены практически в одной плоскости, появилась возможность исключить влияние температурной деформации резца. Тарирование системы при разной температуре резца практически показало одинаковые результаты в сравнении с измерениями на стационарной установке при термостабилизированной державке резца. В качестве измерительной системы используются индуктивные датчики М-200, точность измерения размерного износа ±1 мкм.

Для оценки погрешности обработки большое значение имеет температурное удлинение режущего инструмента в процессе обработки [18]. Для измерения температурного удлинения режущего инструмента непосредственно в процессе резания было разработано специальное приспособление, установленное внутри державки резца (см. рис 1. позиция 3). Это устройство измеряет положение вершины режущего инструмента, положение которой меняется в зависимости от температурного удлинения резца [19]. Точность измерения составляет ±1,2 мкм.

Для контроля диаметра обрабатываемой заготовки используется измерительное приспособление в виде скобы (см. рис 1. позиция 6). Диаметр можно контролировать до и после обработки в разных сечениях непосредственно на станке. Конструкция устройства защищена патентом [20].

Шероховатость поверхности контролируется с помощью портативного профилометр Mar Surf M 400 прямо на станке.

Все системы имеют цифровой выход и данные измерения фиксируются на компьютере в реальном режиме времени.

Созданный АМС зафиксирован, как уникальная научная установка и может использоваться для исследования обрабатываемости различных типов материалов.

Проведение экспериментальных исследований.

Перед началом проведения эксперимента заносятся в блок первичной информации все предварительно полученные данные: механические характеристики резца; механические характеристики детали; значения твердости детали и режущей пластины резца при повышенных температурах; результаты тарирования тепловизора; принятые параметры проводимого эксперимента.

Обрабатываемую деталь устанавливают в приспособлении на токарном станке.

Деталь предварительно обрабатывается, чтобы устранить погрешности установки и базирования. Измеряется диаметр детали. Резец подводят к измерительной системе, установленной в задней бабке станка.

Устанавливаются нулевые значения положения державки резца и положения его вершины. Выбираются режимы резания в зависимости от принятых условий эксперимента. Производится обработка детали. Во время обработки фиксируются параметры: температура верхней поверхности стружки (измеряется тепловизором); температурная деформация резца; значения составляющих сил резания; в момент окончания резания фиксируется температура передней поверхности резца; после каждого прохода измеряются размерный износ и износ по задней грани резца; измеряется диаметр обработанной детали.

Все полученные данные заносятся в блок сбора первичной информации.

Работу многопараметрического стенда можно показать на примере обработки чистового точения партий деталей с целью установления взаимосвязи между отдельными составляющими погрешности обработки в процессе формообразования.

В процессе экспериментов обрабатывались заготовки из стали 40Х в виде колец, крепящихся в оправке. Размеры заготовок: ширина 60 мм, диаметр 100 и 140 мм. Режимы резания: глубина резания t = 0,2 – 0,3 мм, скорость резания V = 180 – 200 м/мин, подача S = 0,05...0,02 мм/об. Материал режущей части инструмента – твердый сплав ТI5К6.

На рисунке 2 показан пример распределения погрешности обработки и ее составляющих при точении партии из 27 колец с указанными выше режимами. На рисунке приведены точечные диаграммы: отклонения диаметра детали от настроенного размера Δd, тепловых деформаций резца ξ, размерного износа резца h, величины составляющей силы резания P_Y. По продольной оси отложены номера обрабатываемых деталей.

Значения составляющих погрешности обработки приводятся для определенного сечения детали (5 мм от правого торца кольца). При измерении в другом сечении размер детали, как и величины составляющих погрешности обработки, имели уже другие значения. Даже при обработке одной детали, вдоль ее длины происходит перераспределение величин, составляющих погрешности обработки.

Результаты обработки экспериментов показали, что существует тесная связь не только между изменением диаметров деталей и доминирующими составляющими, но и между самими составляющими.

Причем связь между этими величинами в пределах партии деталей проявляется по-разному, в зависимости от выбора контролируемого сечения деталей, откуда следует, что оценка годности детали по значению ее диаметра в одном сечении может быть не всегда корректной. Поэтому было принято, что в качестве оценки точности диаметра детали будет являться наибольший размер обработанной поверхности вдоль всей ее длины и его колебание, равное разности между наибольшим и

наименьшим значениями. Такое допущение практически соответствует принципу Тейлора.

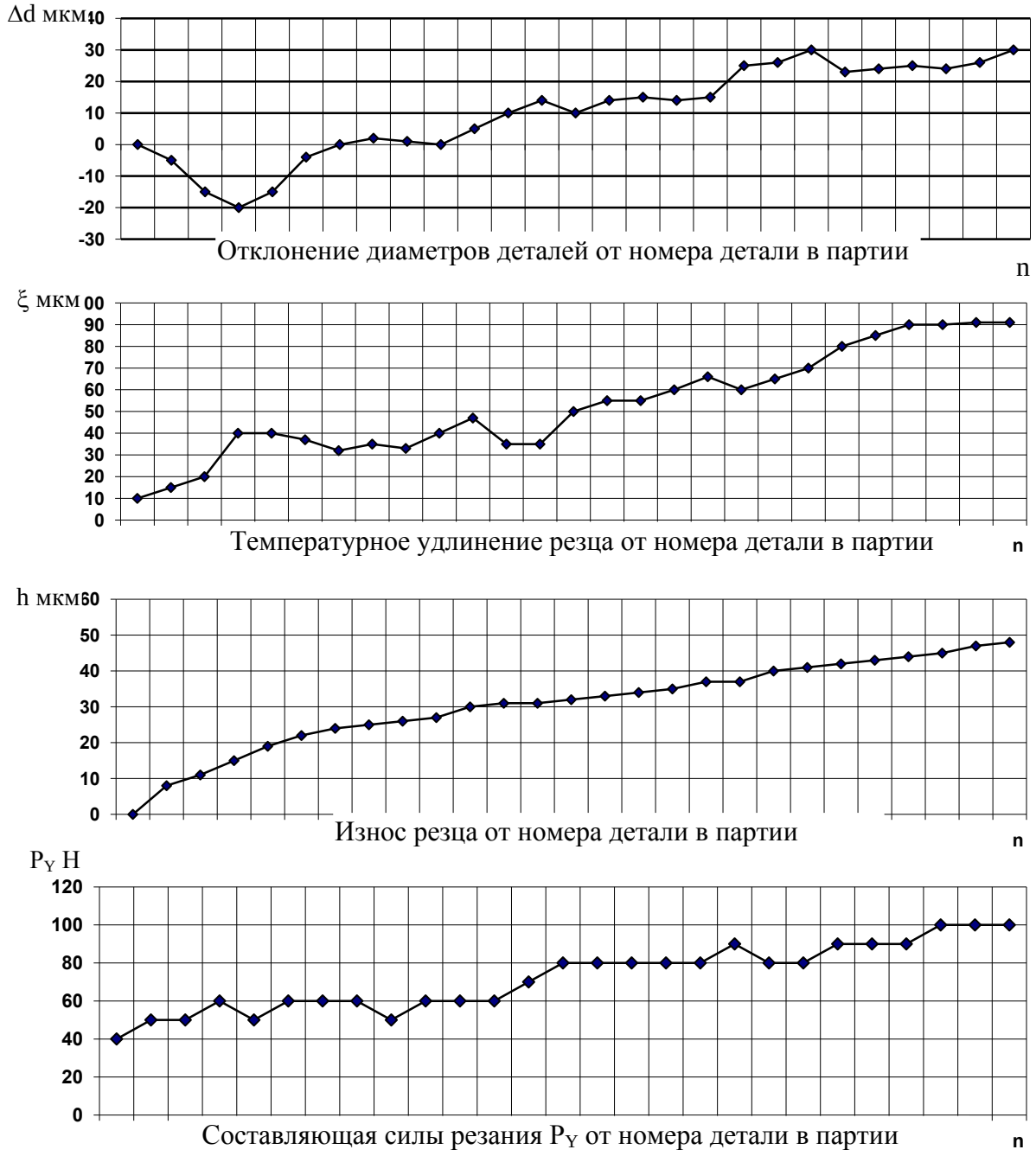


Рисунок 2 – Погрешность обработки и ее составляющие

Из графиков видно, что доминирующие составляющие при обработке партии колец это: размерный износ резца, тепловое удлинение резца в процессе работы, упругие деформации технологической системы под действием силы резания.

Величина температурного удлинения резца носит нестабильный характер, так как на нее большое влияние оказывают характер схода

стружки (накапливание мотка стружки на резце увеличивает его температуру) и интенсивность попадания СОЖ на резец.

Область начального износа резца при чистовой токарной обработке может захватывать несколько деталей в партии. Поэтому при расчете погрешности необходимо ее учитывать.

Составляющие силы резания по мере обработки партии деталей увеличиваются, что связано с износом режущего инструмента.

Изменение доминирующих составляющих погрешности трудно прогнозируемо по величине, так как они взаимосвязаны не только друг с другом, но и с различными факторами. Так как изменение диаметра детали происходит из-за воздействия выше указанных составляющих, величина суммарной погрешности обработки тоже трудно прогнозируема.

Установлено, что при чистовой токарной обработке величины этих составляющих погрешности обработки соизмеримы друг с другом и влияют на суммарную погрешность одновременно, поэтому компенсация одной из них без учета влияния других может не только не уменьшить, но и резко увеличить суммарную погрешность обработки.

Для прогнозирования изменения величины обрабатываемых деталей в партии необходимо иметь математическую модель образования и изменения погрешности в процессе точения.

Другой пример работы АМС – результаты исследований экспериментальных образцов деталей авиадвигателей (типа вал, диск, втулка) полученные при точении титанового сплава ВТ-8 по определению рациональных режимов резания.

Использовались резцы с пластинами твердого сплава DNMG 15 04 04-SF H13A производства SANDVIK, рекомендуемыми фирмой для обработки жаропрочных сплавов.

Для разработки математической модели процесса резания необходимо найти значения неизвестных ее коэффициентов. Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов.

Факторами являются: скорость резания V, подача s, радиус при вершине режущей пластины R.

В качестве параметров оптимизации приняты: износ инструмента, его температурное удлинение, качество поверхностного слоя, температура в зоне резания и силы резания.

В таблице 1 сведены все полученные параметры оптимизации для каждого эксперимента, где:

ξ – температурное удлинение резца в момент времени τ;

e – основание натуральных логарифмов;

K и A – коэффициенты, зависящие от режимов резания, материала детали, материала и формы резца;

α – коэффициент, зависящий от материала и формы режущего инструмента.

Uo- относительный износ – это характеристика размерного износа. Он равен углу наклона аппроксимирующей прямой, проведенной к кривой размерного износа инструмента. Примеры зависимостей размерного износа резца от пути резания, полученные на установке при разных параметрах обработки титанового сплава показаны на рис. 3.

Таблица 1 – Параметры оптимизации для каждого эксперимента

№	V, м/мин	s, мм/об	R, мм	Py	Pz	T, °C	Uo, мкм	$\xi = K(\tau + A)(1 - e^{-\alpha\tau})$, мкм			Ra, мкм	Rz, мкм
								A	K	α		
1	40	0,04	0,1	28	57	220	0,805	1570	0,004	0,005	0,99	4,9
2	40	0,04	0,4	44	63	223	1,086	451800	0,000002	0,003	0,56	3,5
3	40	0,08	0,1	36	82	214	1,205	14180	0,0007	0,004	3,84	18
4	40	0,08	0,4	67	93	229	2,855	733	0,009	0,006	0,94	5,1
5	80	0,04	0,1	35	57	217	0,790	446	0,012	0,01	1,08	6,6
6	80	0,04	0,4	55	66	219	1,919	351	0,015	0,011	0,78	4,6
7	80	0,08	0,1	53	89	230	1,756	210	0,019	0,012	6,08	24
8	80	0,08	0,4	75	100	225	1,527	568	0,015	0,008	0,78	5,1

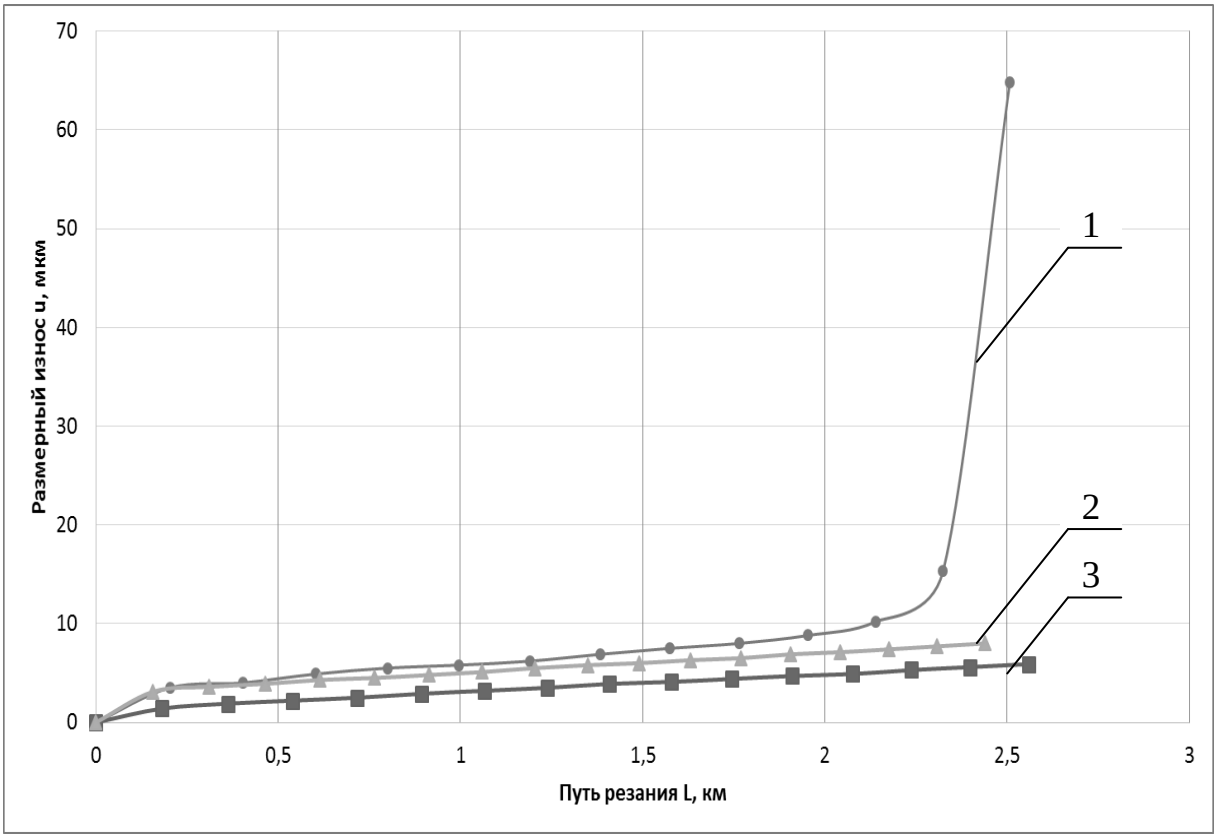


Рисунок 3 − Зависимость размерного износа резца от пути резания при разных скоростях резания: s = 0,136 мм/об, R = 0,4 мм, t = 0,5 мм; 1 – V = 80 м/мин, 2 – V = 60 м/мин, 3 – V = 40 м/мин.

В результате обработки данных были получены коэффициенты для линейных уравнений регрессии. Линейные уравнения преобразованы в степенные вида:

$$Y = C \cdot V^a \cdot R^b \cdot s^d \quad (1)$$

Найденные степени для каждого из параметров оптимизации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Найденные коэффициенты для степенного уравнения регрессии

Степень при:	Py	Pz	T, °C	Uo, мкм	ξ, мкм			Ra, мкм	Rz, мкм
					A	K	α		
C	85,2	334	238	11,2	$48{,}5 \cdot 10^9$	0,001	0,000061	5,3	18,5
V	0,341	0,0728	0,0081	0,11	5,47711	4,96	1,21	0,24	0,30
s	0,503	0,582	0,030	0,69	2,45157	2,54	0,12	1,29	1,13
R	0,337	0,088	0,012	0,34	1,03869	0,90	0,074	0,78	0,64

Получены уравнения для параметров, приведенных в таблице 2.

Например, уравнение для относительного износа режущего инструмента имеет конечный вид:

$$U_o = 11{,}2 \cdot V^{0,11} \cdot R^{0,34} \cdot s^{0,69} \quad (2)$$

Полученные результаты зависимостей процесса резания позволяют без дополнительных затрат прогнозировать одновременно все заложенные в программу параметры обработки исследуемых сплавов при изменении влияющих на них факторов в широких пределах.

Выводы

1. Разработанный автоматизированный многопараметрический стенд с применением ЭВМ и измерительных систем для контроля составляющих сил резания, измерения температуры в зоне резания, размерного износа инструмента, изменения его тепловой деформации в процессе резания позволяет проводить диагностику процесса резания и выявлять доминирующие составляющие погрешности обработки в ускоренном режиме, следить за состоянием инструмента и автоматически определять необходимый момент его замены.

2. АМС может быть эффективно использована для исследования характера обработки при проектировании технологии изготовления деталей в мелкосерийном и единичном производствах благодаря своему компоновочному решению с принципом независимого управления.

3. Использование установки может обеспечить повышение производительности труда в мелкосерийном производстве за счет сокращения времени настройки резцов на размер, снижения количества отказов из-за износа и поломок режущего инструмента, за счет снижения времени на контроль деталей и подналадку в процессе обработки, а также

в некоторых случаях за счет сокращения числа чистовых и финишных операций.

4. Применение установки системы повышает точностные возможности станков с ЧПУ, обеспечивая стабильность размеров в партии деталей и точность настройки.

5. Установка может продлить сроки эксплуатации устаревшего оборудования за счет расширения его функциональных возможностей и компенсации ряда погрешностей, вызываемых изношенными элементами станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухин В.С. Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроение). Уфа: УГАТУ, 2007. 148 с.
2. Павлинич С.П., Зайцев М.В. Применение интерметаллидных титановых сплавов при литье узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений [Электронный ресурс] / «Вестник УГАТУ» Т. 15, № 4 (44). Уфа, 2011. С. 200–202. URL: www.journal.ugatu.ac.ru/index.php/vestnik/article/viewFile/394/358 (дата обращения: 7.06.2014).
3. Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойким покрытием / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
4. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов / Л.Л. Евсеев // Вестник машиностроения, № 2, 1995. С. 29–32.
5. Кабалдин Ю.Г. Универсальная модель изнашивания режущего инструмента и методы повышения его работоспособности / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения, № 11, 1993. С. 31–34.
6. Кабалдин Ю.Г. Термодинамический подход к анализу причин возникновения вибраций при резании / Ю.Г. Кабалдин // Вестник машиностроения, – № 4, – 1994.
7. Окороков Л.В. Точение тугоплавких металлов с предварительным лазерным подогревом / Л.В. Окороков, А.А. Волков, А.А. Углов // Станки и инструмент, № 9, 1989. С. 32–35.
8. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, – 1974. – 590 с.
9. Резников Н.И. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов / Н.И. Резников, Е.В. Бурмистров, И.Г. Жарков и др. М.: Машиностроение, – 1972. – 200 с.
10. Талантов Н.В. Особенности влияния электроподогрева на механизм контактного взаимодействия / Н.В. Талантов, Н.П. Черемушников // Обработка деталей машин резанием: сб. тр. Волгоград, политехн. ин-та. Волгоград, 1986. С. 81–86.

11. Шатерин М.А. Влияние предварительного плазменного нагрева срезаемого слоя на характер износа режущего инструмента, силы резания и контактные нагрузки на грани резца / М.А. Шатерин, М.А. Ермолаев; Ленингр. политехн. ин-т. Л., – 1985. – С. 10–15.
12. Жак С.В. Оптимизация проектных решений в машиностроении. Методология, модели, программы Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного университета, – 1982. – 168с.
13. Универсальный интеллектуальный диагностический комплекс для контроля токарных станков / Юркевич В.В. // Журнал Контроль. Диагностика, № 9. М., 2011. С. 53–57.
14. Пат. 83721 РФ, МПК: B 23 B 25 06. Стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки / Кошин А.А., Дьяконов А.А.; заявитель и патентообладатель Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования "Южно-Уральский государственный университет". – № 2009105395/22; – заявл. 16.02.2009; – опубл. 2009.
15. Пат. 93725 РФ, МПК: B 23 Q 15 007. Самообучающаяся технологическая система обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя / Суслов А.Г., Петрешин Д.И.; заявитель и патентообладатель Гос. Образовательное учреждение высшего проф. Образования "Брянский гос. Технический университет". № 2009149563/22; заявл. 30.12.2009; опубл. 2010.
16. Рыжкин А.А., Обработка металлов резанием / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. Ростов на Дону, Феникс, – 2008. – 411 с.
17. Анухин В.И. Метод измерения температуры в зоне резания на основе математического моделирования В.И. Анухин, И.В. Анухин, Слатин В.И. В книге: Неделя науки СПбГПУ материалы научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: М.С. Кокорин (ответственный редактор) и др. – 2014. – С. 263-265.
18. Козарь И.И. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов. И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, М.М. Радкевич, Т.А. Цимко Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 2 (195). – С. 194-201.
19. Греков И.Н. Измерение температурного удлинения токарного резца в процессе чистового точения. И.Н. Греков, С.А. Любомудров Металлообработка. – 2015. – № 1 (85). – С. 2-5.
20. Пат. 160604 РФ, МПК: B 23 B 25/06. Устройство для измерения диаметров деталей при токарной обработке/Анухин В.И., Любомудров С.А., Макарова Т.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное Гос. автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". № 2015131186/02; заявл. 27.07.2015; опубл. – 2016.

S.A. Lyubomudrov, T.A. Makarova, S.S. Panevin

MULTIPLE PARAMETER THE AUTOMATED STAND FOR RESEARCH OF THE WORKABILITY OF THE HARDLY PROCESSED ALLOYS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The principle of operation and design of multiparameter automated test stand for turning tough alloys. The results of studies obtained during turning of titanium alloy VT-8.

Key words: turning processing, the experimental setup, titanium alloys, accuracy, workability.

REFERENCES

[1] Mukhin, V.S. Fundamentals of manufacturing engineering (aircraft engine). Ufa: USATU, 2007. 148 p.
[2] Pavlinich S.P., Zaitsev M.V. Application of intermetallic titanium alloys during casting of the units and blades of GTE with lightweight high strength structures for aircraft engines of new generations [Electronic resource] / "Vestnik UGATU" Vol. 15, No. 4 (44). Ufa, 2011. S. 200-202. URL: www.journal.ugatu.ac.ru/index.php/vestnik/article/viewFile/394/358 (accessed on 7.06.2014).
[3] Vereshchaka A.S. Cutting tools with wear-resistant coating / Vereshchaka A.S., Tretyakov I. P.. M.: Mashinostroenie, 1986. 192 p.
[4] Evseev JI.JI. The initial position and the dependencies for the calculation of dynamics characteristics of the cutting process of metals / JI.JI. Evseev // Vestnik mashinostroeniya, No. 2, 1995. Pp. 29-32.
[5] Kabaldin YG Universal wear model of cutting tools and methods to improve its efficiency / G. Kabaldin // Vestnik mashinostroeniya, No. 11, 1993. Pp. 31-34.
[6] Kabaldin J.G. Thermodynamic approach to the analysis of the causes of vibrations during cutting / YG Kabaldin // Vestnik mashinostroeniya, No. 4, 1994.
[7] Ham JI.B. Turning refractory metals with preliminary laser heating / JI.In. Okorokov, A.A. Volkov, A.A. Uglov // machinery and tools, No. 9, 1989. Pp. 32-35.
[8] Poduraev, V.N. Cutting hard materials. M.: Higher school, 1974. 590 p.
[9] Reznikov, N. And. Cutting heat-resistant, high-strength titanium alloys / N. And. Reznikov, E.V. Burmistrov, I.G. Zharkov, etc., Moscow: Mashinostroenie, 1972. 200 p.

[10] Talent N.In. The influence of heating on the mechanism of contact interaction / N.In. Talent, N.P. Ceremonial // Processing of details of machines cutting Tr. Volgograd Polytechnical. in-TA. Volgograd, 1986. Pp. 81-86.
[11] Sateren M.A. the Influence of preliminary heating of plasma cut-off layer on the wear behavior of the cutting tool, the cutting force and the contact load on the edge of the cutter / Sateren M.A., Ermolaev A.M.; St. Petersburg. Polytechnic College. in T.L., 1985. Pp. 10-15.
[12] Jacques S.V. Optimization of design solutions in mechanical engineering. The methodology, models, programs, Rostov-on-don: Publishing house of Rostov state University, 1982. 168 p.
[13] Universal intelligent diagnostic system for the control of lathes / Yurkevich V.V. // Journal of Control. Diagnostics, No. 9. M., 2011. Pp. 53-57.
[14] Pat. 83721 OF THE RUSSIAN FEDERATION, IPC B 23 B 25 06. Stand for research of interaction of tool and sample in high-speed machining techniques / Koshin A. A., Dyakonov A. A.; applicant and patentee State. educational institution of higher professional education "South Ural state University". No. 2009105395/22; Appl. 16.02.2009; publ. 2009.
[15] Pat. 93725 THE RUSSIAN FEDERATION, IPC B 23 Q 15 007. Self-learning technological system to maintain the set quality parameters of the surface layer / Suslov A. G., Petrushin D. I.; applicant and patentee State. Educational institution of higher professional Education "Bryansk state Technical University". No. 2009149563/22; Appl. 30.12.2009; publ. 2010.
[16] Ryzhkin A. A., metal cutting / A. A. Ryzhkin, K. G. Chuchev, M. M. Klimov. Rostov on don, Phoenix, 2008. 411 p.
[17] Anuchin V.I. Method of measuring temperature in the cutting zone on the basis of mathematical modeling V.I. Anuchin, I.V. Anuchin, Slatin V.I. In the book: science Week of SPbSPU materials of scientific-practical conference with international participation. Editorial Board: M.S. Kokorin (editor), and etc. 2014. Pp. 263-265.
[18] Kozar I.I. Mathematical model of error when machining demanding alloys. I.I. Kozar, D.Y. Kolodyazhny, M.M. Radkevich, T.A. Tsimko Scientific and technical Gazette of St. Petersburg state Polytechnic University. 2014. No. 2 (195). Pp. 194-201.
[19] Greeks I.N. Measurement of thermal elongation lathe tool in the finish turning process. I.N. Greeks, S.A. Lyubomudrov Metalworking. 2015. No. 1 (85). Pp. 2-5.
[20] Pat. 160604 OF THE RUSSIAN FEDERATION, IPC B 23 B 25/06. The device for measurement of diameters of parts during turning/Anuchin V.I., Lyubomudrov, S.A., Makarova T.A.; applicant and patentee Federal State. Autonomous educational institution of higher professional education "Saint Petersburg state Polytechnic University Peter the Great". No. 2015131186/02; Appl. 27.07.2015; publ. 2016.

УДК 621.658.588; DOI 10.1872/MMF-2016-88

В.А. Пашнёв[1], Д.Ю. Пименов[2], Н.В. Сырейщикова[3], М.С. Кольцова[4]

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАТОРА ОПЕРАЦИЙ И ПЕРЕХОДОВ РЕМОНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ ПОЛИМЕРОВ

[1]Владислав Альевич Пашнёв, к.т.н., доцент
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: (351)267-9-267, E-mail: alich74@rambler.ru

[2]Пименов Данил Юрьевич, старший преподаватель
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: (351)267-9-267, E-mail: danil_u@rambler.ru

[3]Сырейщикова Нэлли Владимировна, к.т.н., доцент
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: (351)267-9-267

[4]Кольцова Мария Сергеевна, магистрант
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: (351)267-9-267, E-mail: mariya86koltsova@mail.ru

Аннотация

Жизненный цикл промышленного оборудования в большинстве случаев сопровождается ремонтом либо модернизацией. Автоматизация проектирования и нормирования технологических процессов ремонта позволяет сократить сроки производственного планирования и повысить скорость определения стоимости работ. Разработка баз единиц проектирования ремонтных технологических процессов на базе полимеров для САПР ремонтных технологических процессов является актуальной задачей. Разработанные классификаторы единиц проектирования являются информационной базой для систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: полимеры, технологический процесс, ремонты

В период жизненного цикла производственным предприятиям приходится сталкиваться с проблемами связанными, с ремонтом, восстановлением и про-

длением срока службы средств труда и производства. Поэтому практически на любом предприятии существует ремонтно-механическое производство, которое представляет собой ряд подразделений: цех, участок и т.д.

Повышение качества ремонта машин при одновременном снижении его себестоимости — главная проблема ремонтного производства. В структуре себестоимости капитального ремонта машин 60–70 % затрат приходится на покупку запасных частей, которые даже в условиях рынка остаются дефицитными при росте цен. Основной путь снижения себестоимости ремонта машин — сокращение затрат на запасные части. Частично этого можно добиться за счет бережного и грамотного выполнения разборки машин и выявления дефектов деталей, но наиболее целесообразным является восстановление и ремонт изношенных агрегатов, узлов, деталей [1].

В ремонтном производстве используются следующие виды работ:

1. слесарно-механическая обработка;
2. пластическое деформирование;
3. нанесение полимерных материалов;
4. ручная сварка и наплавка;
5. механизированная дуговая сварка и наплавка;
6. механизированные бездуговые способы сварки и наплавки;
7. газотермичесхое нанесение покрытий (металлизация);
8. гальванические и химические покрытия;
9. термическая и химико-термическая обработка
10. и другие способы.

В последнее время с интенсивным развитием фундаментальных наук, таких как физика и химия появляются всё более прогрессивные полимерно-композитные материалы (ПКМ), которые облегчают процессы ремонта и заставляют по-новому взглянуть на технологию ремонта. Если ранее под понятием ПКМ понималась эпоксидная смола, то в настоящее время на смену им пришли новые ПКМ с физико-механическими свойствами, успешно удовлетворяющими запросы промышленности и, в частности, ремонтные производства.

В силу специфики и свойств данных материалов возникает проблема грамотного проектирования и нормирования технологических процессов (ТП) ремонта на базе ПКМ. Поэтому актуальна задача разработки компьютерных систем для проектирования ТП ремонта на базе ПКМ. В нашей стране в виду закрытости отраслей, связанных с разработкой и производством ПКМ практически не развиты вопросы технологии ремонта на базе ПКМ, так как производство ПКМ сводилось к малым партиям под конкретные узкие задачи. Поэтому, при создании систем автоматизированного проектирования (САПР) технологии ремонта на базе ПКМ необходимо решить задачу упорядочивания операций и переходов на данные типы ремонтов и, в частности, разработка классификатора операций и переходов с созданием САПР на базе полученного классификатора.

В большинстве систем автоматизированного проектирования технологических процессов вводится понятие «единица проектирования». Это элементарное

понятие, из которого систематизируются все решения системы проектирования, в данном случае – это технологический переход.

Технология ремонта на базе ПКМ представляет собой группы операций, связанных с различным этапом в проведении ремонта с использованием ПКМ, где можно выделить следующие виды проводимых работ:

1. дефектация;
2. разработка технологий ремонта (непосредственно технологии ремонта, включая выбор материала);
3. подготовка поверхности;
4. приготовление рабочей смеси;
5. нанесение рабочей смеси;
6. формообразование;
7. контроль.

Виды работ, входящие в ТП ремонта на базе ПКМ можно выделить в операции, подобные содержащимся в классификаторе технологических операций машиностроения и приборостроения – 1 85 151 (КТОМ и П). Также часть видов работ, проводимых при ремонтах с использованием ПКМ, содержится в укрупнённых нормативах на ремонт, например, в прейскурантах ЕН и Р, ВН и Р и т.д., в виде группы операций и переходов. Следовательно, названные источники можно принять за основу при выделении единиц проектирования. Следует отметить, что в ранее разработанных САПР ТП выделяются два уровня единиц проектирования: технологическая операция и технологический переход. Исходя из анализа видов работ, выполняемых в ТП ремонта на базе ПКМ, и нормативных баз для ремонтных производств, выделены два уровня единиц проектирования – технологические операции и технологические переходы.

По аналогии с прейскурантом КТОМ и П за вид технологического процесса по методу выполнения приняты следующие виды работ ТП ремонта на базе ПКМ:

1. операции общего назначения;
2. технический контроль;
3. перемещение;
4. обработка давлением;
5. термообработка;
6. формообразование из полимерных материалов, керамики, стекла, резины;
7. получение покрытий органических (лакокрасочных).

В соответствиями с пояснениями КТОМ и П из ряда операций, входящих в виды технологического процесса по методу выполнения, принимаются только те. которые непосредственно отвечают процессам при использовании ПКМ. На данный момент выделено 35 таких операций.

Следующий уровень единиц проектирования – технологические переходы, которые жёстко привязываются к операциям, то есть для каждого вида операций существует свой набор переходов. Правила записи на данные типы ТП отсутст-

вуют, поэтому были использованы наиболее близкие по содержанию правила записи переходов для слесарных операций. В содержании перехода должны быть включены: ключевое слово – наименование действия (вида работы), включающего определенные методы обработки изделия; дополнительная информация, характеризующая число обрабатываемых элементов поверхностей; наименование предметов производства; обрабатываемых поверхностей и конструктивных элементов; информация по размерам или их условным обозначениям.

При анализе нормативных источников (руководствуясь при этом принципами стандартизации) были выявлены ключевые слова для каждого вида операций и перечень переходов включаемых в операцию. Результаты анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты анализа работ, выполняемых при ремонтах с использованием ПКМ

Количество видов процесса по выполнению	Количество операций	Количество ключевых слов	Количество переходов	Количество позиций прейскуранта
7	34	278	396	69

Все виды работ, включаемые в ТП ремонта на базе ПКМ, различаются по составу решаемых задач: выбор оснастки (1), выбор оборудования (2), выбор рабочего инструмента (3), выбор измерительного прибора (4), выбор материала (5). Задачи выбора оснастки и оборудования решаются на уровне выбора операции. Исходя из анализа нормативных материалов, оснастка и оборудование выделяются в самостоятельные уровни классификатора. Задачи выбора рабочих инструментов, измерительных приборов (инструментов) решаются на уровне выбора перехода. Решение задачи выбора материала складывается из ряда факторов, таких как среда работы ремонтируемого объекта, его габаритные размеры, конструктивные особенности и т.п. Поэтому выбор материала является самостоятельным уровнем классификатора.

При анализе исходной информации были выявлены следующие факторы, упорядочивающие основные единицы проектирования:

– переход жестко связан с операцией;
– к каждому виду операции относится свой набор работ (вид работы);
– учитывается, с чем проводится работа, то есть, с какими деталями или с плоскостями, отверстиями, (например, очистка от ржавчины плоских поверхностей);
– различный инструмент для работы.

По результатам исследования предложены следующие уровни классификатора.

1. Отношение операции к виду технологического процесса (подготовка по-

верхности, приготовление рабочей смеси и т.д.).

2. Наименование операции (очистка, зачистка, нанесение, шпатлевание, формование и т. д.)

3. Инструмент, приспособление, способ (вручную, с частичным применением механического привода, фальшдеталью, оправкой и т.д.).

4. Материал, применяемый 8 работе (технологические свойства), охлаждение (вода, специальный раствор, пастообразный раствор и т.д)

5. Условия выполнения работ (работающее оборудование, неудобное положение, труднодоступные места и т. д.).

6. Вид поверхности (плоскости, наружные, внутренние и т.п.).

7. Состояние поверхности (ржавчина, смолянистые отложения, нагар, и т.д.).

8. Текст перехода, приближённый к требованиям ГОСТ 3.1703-79.

Разработанный классификатор переходов является информационной базой к любой САПР с модулем ремонтного профиля.

Кроме того, одной из основных задач в ремонтном производстве является задача нормирования трудоемкости работ, с последующим переходом к оценке себестоимости затрат.

Нормирование технологических операций ремонтных технологических процессов на базе полимерно-композитных материалов (ПКМ), является комплексной задачей [5]. Это связанно с тем, что к нормированию ремонтных технологических процессов (РТП) имеется два подхода: первый – нормирование трудоёмкости работ во временных единицах с последующим переводом в денежные единицы; второй – нормирование трудоёмкости непосредственно в денежных единицах. При нормировании трудоёмкости работ оценивается трудоёмкость технологического процесса (ТП) ремонта. При нормировании в денежных единицах составляется смета ТП по ведомости объёма работ укрупнённого ТП.

Если говорить о нормирование трудоёмкости ТП ремонта, то в настоящий момент отсутствует тщательно проработанная нормативная база, в лучшем случае она представлена лишь как справочники нормирования отдельных видов работ, например, слесарных работ и т. д.

Нормирование в денежных единицах наиболее актуально для промышленности России и за основу нормативных баз приняты укрупнённые нормы в прейскурантах № 26-05-43-э, ЕН и Р, ВН и Р и т. п., которые осуществляют нормирование переходов, группы переходов и группы операций.

При проектировании за основу информационного обеспечения взят прейскурант 26-05-43-э оптовых цен на ремонт энергетического оборудования, выполняемый металлургическими заводами. Данный документ структурирован как по видам работ, так и по видам работ под конкретную единицу, либо по группам единиц оборудования. Прейскурант имеет четыре формы представления нормативной информации: 1 – таблицы; 2 – внутренние примечания (с коэффициентами, применяемыми к ценам прейскуранта); 3 – примечания (с коэффициентами) по инструкции пользования прейскурантом; 4 – расчет по формулам зависимости

стоимости работы от объёма работ и стоимости за единицу.

Нормирование переходов из классификатора операций и переходов технологических процессов ремонта с использование ПКМ предложено проектировать следующим обрезом: осуществляется основной выбор по смыслу из группы предложенных переходов в позиции прейскуранта по смысловой и качественной нагрузке, привязывается к переходу из классификатора; оставшиеся переходы из позиции прейскуранта, по смыслу подходящие к классификатору, не нормируются. При документальном сопровождении (как описывалось выше) составляется поэлементная ведомость объёма работ с указанием объёма работ и далее калькуляционный документ (смета), более укрупнённый по содержанию объёма работ, с учетом цены за единицу, стоимости всей работы. В смету включают ключевой переход из группы переходов, в результате чего происходит учёт всех выполненных переходов.

Для включения в САПР ТП была выбрана, как наиболее простая табличная форма представления информации (см. табл. 1 и 2). Для этих целей переходы, которые для каждой позиции прейскуранта и для каждого перехода оформляются управляющей таблицей или алгоритмом поиска нужной позиции, по которым в зависимости от комплекса условий управление передаётся на ту или иную конкретную позицию прейскуранта. Данные о позиции представлены в табличной форме и в виде дополнений – коэффициентами с соответствующими примечаниями, как для конкретной позиции прейскуранта, так и для всех позиций в зависимости от выполняемых работ. Поэтому для учёта поправочных коэффициентов как внутренних, так и внешних. условия включения коэффициентов внесены в классификатор операций и переходов ремонтных технологических процессов на базе ПКМ. Эти условия связанны с условиями выполнения работ, применяемого материала, материала объекта ремонта и т. д. Для выбора ряда поправочных коэффициентов, выбор которых нельзя автоматизировать используется человеческий фактор. Для подобных операций используются одни и те же позиции прейскуранта, Например, операция очистка отличается от зачистки смысловым лексическим значением (очистка – вся деталь, зачистка – область детали).

Используемые архивы имеют следующие уровни: 1 – текст перехода по нормативному документу; 2 – шифр и номер позиции прейскуранта; 3 – единица измерения; 4 – дополнительных данных; 5 – стоимость работы; 6 – стоимость технического руководства; 7 – цена за единицу измерения; 8 – содержание примечания; 9 – значение поправочного коэффициента; 10 – цена с применяемым коэффициентом; 11 – шифр и номер позиции с принятым коэффициентом.

В настоящий момент в виду освоения российской промышленностью технологий работы с ПКМ, наиболее актуальной является так же необходимость в разработке поэлементных норм времени на |выполнение операций для технологий с использованием ПКМ.

Анализ показывает, что ремонтные технологические процессы мало изучены и практически не описаны в литературе, но они важны в технологии ремонтных работ. Так как большую долю в ремонтных технологических процессах со-

ставляют слесарные работы, поэтому для разработки системы автоматизированного проектирования ремонтных технологических процессов в первую очередь нужно упорядочить слесарные работы.

Традиционно в каждой компьютерной системе вводится такое базовое понятие, как единица проектирования – это элементарное понятие, из которого систематизируются все решения системы проектирования. Так как методика проектирования слесарных работ в литературе не описана, имеются только некоторые их элементы, содержащиеся в сборниках общемашиностроительных нормативов времени [1, 2] (примером является справочник [2], который использовался при разработке классификатора переходов на слесарные работы).

В ранее разработанных САПР ТП выделены два уровня единиц проектирования: технологические операции и технологические переходы. По аналогии со станочной обработкой и на основании изучения сборника общемашиностроительных нормативов времени на слесарные работы по ремонту оборудования [3] было принято решение выделить два уровня единиц проектирования: слесарные операции и слесарные переходы.

Анализ нормативных карт показал, что на первом уровне единиц проектирования можно выделить четыре вида слесарных операций: слесарно-разборочная, слесарно-сборочная, вспомогательная и слесарная. Все четыре слесарных операций различаются между собой по виду выполняемой работы. К первому виду слесарной операции относятся работы, связанные только с разборкой оборудования (карты с № 1 по № 54 [1]). Ко второму виду операции относятся все сборочные работы, то есть работы по сборке оборудования и по проверке технических требований сборки (карты с № 55 по № 132 [1]). В третий вид операции входят работы, связанные с подготовкой к выполнению операций (карты с № 136 по № 157 [1]). Четвертый вид операции включает в себя ремонтные работы (карты с № 158 по № 193 [1].

Следующий уровень единиц проектирования – слесарные технологические переходы. Они жестко привязаны к слесарным операциям, то есть для каждого вида операций существует свой набор слесарных переходов [1,2,3,4] и правила записи переходов [4]. В содержание перехода должны быть включены: ключевое слово (наименование действия или виды работы, которые охватывают определенные методы обработки или сборки изделия); дополнительная информация, характеризующая число обрабатываемых элементов поверхностей; наименование предметов производства, обрабатываемых поверхностей и конструктивных элементов; информация по размерам или их условным обозначениям [6,7].

Анализируя нормативы и руководствуясь стандартом, было получено разное количество ключевых слов, используемых на каждом виде операции и разное количество слесарных переходов, включаемых в тот или иной вид операции (см. таблицу 2).

Результаты анализа нормативного справочника

Все виды слесарных работ (слесарные переходы) различаются по составу решаемых задач: задача выбора оргоснастки, задача выбора оборудования, задача

выбора рабочего инструмента, задача выбора измерительного прибора (инструмента).

Первые две задачи решаются на уровне проектирования операции, а другие две – на уровне проектирования технологического перехода [8,9,10,11]. Но так как нормирование слесарного перехода зависит от оргоснастки и от выбранного оборудования, то принято решение выделить в классификаторе переходов самостоятельные уровни: оргоснастка и оборудование. Например, в группе работ «вывертывание болтов» решается первая задача выбора рабочего инструмента (гаечный ключ, торцовый ключ, электрогайковерт, пневмогайковерт), а другие задачи отсутствуют; в группе работ «перемещение детали» решается задача выбора оборудования (электротельфер, электромостовой кран, кран-балка).

Таблица 2

Результаты анализа документов по количеству ключевых элементов

Вид операции	Количество ключевых слов.	Количество нормативных карт.	Количество слесарных переходов.
Слесарно-разборочная	7	54	71
Слесарно-сборочная	12	81	104
Вспомогательная	10	22	23
Слесарная	21	36	56

Классификатор содержит 8 уровней:

1. наименование операции: слесарно-разборочная, слесарно-сборочная, вспомогательная, слесарная;
2. вид работы: расстопорение; вывертывание; установка и т. д.; работа: детали, плоскости, отверстия, шпонки и т. д.;
3. рабочий инструмент: слесарный инструмент, вспомогательный инструмент, режущий инструмент;
4. оргоснастка: тиски, плита, кран-балка, винтовой пресс, ванна и др.;
5. оборудование: электрическая сверлильная машинка, сверлильный станок;
6. измерительные приборы (и инструменты): щуп, штангенциркуль, угольник, микроскоп, микрометр, индикатор и т. д.;
7. текст перехода: по стандартным требованиям.

Разработанные классификаторы используются для международной магистерской программы «Обеспечение эффективности технологических процессов

жизненного цикла изделия», являются информационной базой для САПР ТП, апробированы и имеют значительное практическое применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мылов, А.А. Ремонт автомобилей: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2007. – 9 с.
2. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарные работы по ремонту оборудования: Справочник. – М.: Экономика, 1989. – 456 с.
3. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин: Справочник. — М.: НИИ труда, 1982. – 346 с.
4. ГОСТ 3.1703-79. Правила записи операций и переходов: Слесарные. Слесарно-сборочные работы. – М.. Стандартинформ, 1979. – 79 с.
5. С.В. Кручинин, А.В. Липатов, Л.В. Овчаренко, М.М. Феткулин. Металлополимерные композиционные материалы для ремонтно-восстановительных работ технологического оборудования // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 1. – С. 37–41.
6. А.Б. Гончаров. Опыт применения передовых технологий с использованием полимерных композиционных материалов на фирме «Мосинтраст» // Сварочное производство. – 1999. – № 10. – С. 17–24.
7. В.А. Пашнёв. Повышение эффективности шлифования трехслойных металл-композитных систем. – автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.02.08. Челябинск, 2005. – 20 с.
8. А.А. Кошин, В.А. Пашнёв. Особенности шлифования трехслойных металл-композитных систем. Абразивное производство: сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С. 79–84.
9. В.А. Пашнёв, Д.Ю. Пименов Анализ напряженного состояния трехслойной металлокомпозитной системы подшипниковых узлов при шлифовании // Механика композитных материалов. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 109–128.
10. А.Б. Тулинов, А.Б. Гончаров Новые композиционные материалы для сборочных и ремонтных работ // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 7. – С. 26–28.
11. И.В. Шмидт, А.А. Дьяконов Проектирование технологии финишной обработки слоистых систем // СТИН. – 2014. – № 6. – С. 30–33.

V.A. Pashnyov, D.Yu. Pimenov, N.V. Syreyshchikova, M.S. Koltsova

CLASSIFIER OF OPERATIONS AND TRANSITIONS FOR REPAIR TECHNOLOGIES BASED ON POLYMERS

all: South Urals State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract

The life cycle of industrial equipment in most cases is related to its repair or up-dating modernization. Automation of designing and regulation of repair technologies

helps to reduce terms of production planning and increase the process of estimating the cost of works. Nowadays development of database of designing items for repair technologies based on polymers for computer-aided design (CAD) systems is highly actual. Developed classifiers of designing items serve as the information database for the CAD systems.

Keywords: polymers, engineering process, repair

REFERENCES

[1] Mylov A.A. Remont avtomobiley: Uchebnoye posobie [Auto service works: educational book]. M.: MGIU, 2007. 9 p. (rus.)
[2] Obshchemashinostroitel'nye normatovy vremeni na slesarnye raboty po remontu oborudovaniya: Spravochnik. [General engineering standard time for mechanical works on repair of equipment: A handbook] M.: Eknomika, 1989. 456 p. (rus.)
[3] Obshchemashinostroitel'nye normatovy vremeni na slesarnuyu obrabotku detaley I slesarno-sborochnye raboty po sborke mashyn: Spravochnik [General engineering standard time for mechanical treatment of parts and bench-work and assembly of vehicles: A handbook]. M.: NII truda, 1982. 346 p. (rus.)
[4] GOST 3.1703-79. Principles of registraton of work operations and transfers: Mechanical works. Bench-work and assembly. M. Standartinform, 1979. 79 p. (rus.)
[5] Kruchinin S.V. Metal polymer composite materials for the repair and restoration of engineering equipment / S.V. Kruchinin, A.V. Lipatov, L.V. Ovcharenko, M.M. Fetkulin // Remont Vosstan Moderniz. 2002. no. 1. Pp. 37-41. (rus.)
[6] Goncharov A.B. Application of advanced technologies with the use of polymer composite materials at the "Mosintrast" company // Svarochn. Proizv. 1999. no. 10. Pp. 7-24. (rus.)
[7] Pashnyov V.A. Increased effectiveness of grinding of the 3-layer metal composite systems. Abstract of thesis of Ph.D. in Engineering: 05.02.08. Chelyabinsk. 2005. (rus.)
[8] Koshin A.A. Features of grinding of three-layer metal-composite systems / A.A. Koshin, V.A. Pashnyov. Abrasive production. Coll. Works, Izdat. YuUrGU, Chelyabinsk. – 2004. Pp. 79-84. (rus.)
[9] Pashnyov V.A. Stress analysis of a three-layer metal composite system of bearing assemblies during grinding / V.A. Pashnyov, D.Yu. Pimenov // Mechanics of Composite Materials. 2015. 51(1). Pp. 109-128.
[10] Tulinov A.B. New composite materials for the assembly and repair work // Sbor. Mashinostr. Priborostr. / A.B. Tulinov, A.B. Goncharov. 2003. no. 7 Pp. 26-28. (rus.)
[11] Shmidt I.V. Finishing of laminar systems / I.V. Shmidt, A.A. D'yakonov // Russian Engineering Research. 2014. 34 (12). Pp. 822-825.

УДК 621.833.4; DOI 10.1872/MMF-2016-89

А.В.Петров, С.Б.Тарасов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАРАТОРА ДЛЯ ПОВЕРКИ КОНЦЕВЫХ МЕР ДЛИНЫ

Антон Владимирович Петров, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:: (812) 591-66-61, E-mail: a-v_petrov@mail.ru

Станислав Борисович Тарасов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:: (812) 591-66-61, E-mail: imcmikro@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы исследования точности отечественной установки для поверки концевых мер длины в соответствии с международными рекомендациями калибровки компараторов для концевых мер длины «Calibration of Gauge Block Comparators. Calibration Guide». Результаты исследований показали, что традиционная отечественная методика поверки приборов для аттестации концевых мер длины принципиально отличается от международной методики, метрологические характеристики отечественных и зарубежных приборов при одних и тех же численных значениях имеют разный смысл. Однако числовые значения параметров калибровки отечественного прибора практически не уступают зарубежным. Международные рекомендации по калибровке являются не только современным методом оценки качества приборов для поверки концевых мер длины, но и инструментом для исследования факторов, влияющих на качество приборов, и возможности повышения точности.

Ключевые слова: измерение, поверка, калибровка, компаратор, концевые меры длины, неопределенность.

Плоскопараллельные концевые меры длины с 1900 года являются эталонами длины и по-прежнему не имеют альтернативы. Концевые меры по достоверности воспроизводимой длины подразделяются на разряды [5]. Доверительная погрешность измерений длины при доверительной вероятности 0,99 не должна превышать для разряда, мкм:

1-го ± (0,02+0,2L);

2-го ± (0,05+0,5L);

3-го ± (0,1+1L);

4-го ± (0,2+2L).

где L – длина концевой меры, м.

С целью аттестации на разряд концевые меры длины подлежат калибровке. Калибровка — это совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных метрологических характеристик меры с помощью эталонной меры. При калибровке концевых мер длины основной операцией является сопоставление длин поверяемой меры со срединной длиной эталонной меры с помощью прибора - компаратора.

Основным современным методом калибровки концевых мер является контактный дифференциальный метод измерения, где эталонная и поверяемая мера сопоставляются по схеме, показанной на рис. 1.

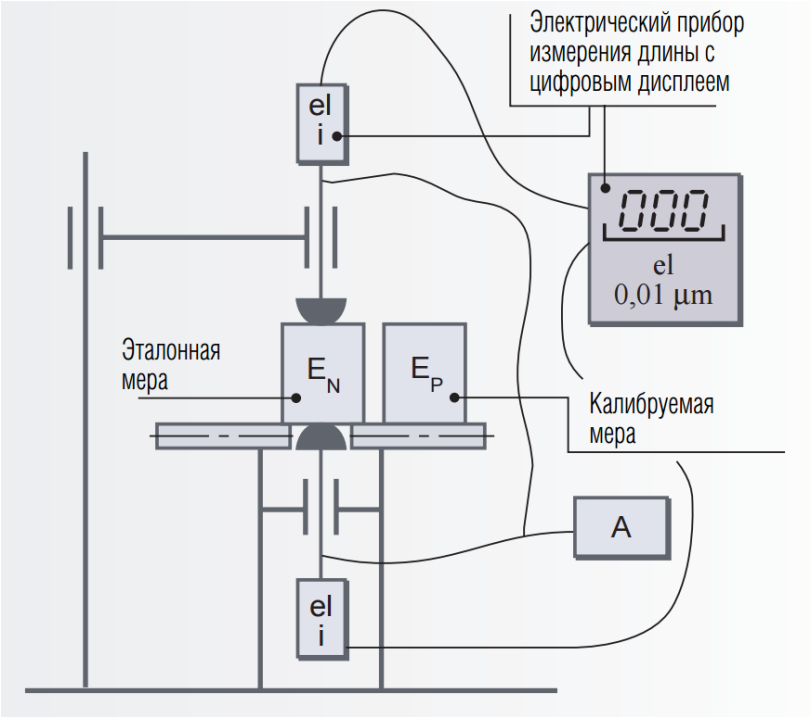


Рис. 1 Схема поверки концевых мер

Инженерно-метрологический центр «Микро» производит установку УКМ-100 для поверки плоскопараллельных концевых мер длины 3-4 разрядов (Рис.2). Установка, по существу, является компаратором и представляет собой законченное компьютеризированное рабочее место поверителя в виде лабораторного стола, в столешницу которого встроена гранитная плита. На плите установлена измерительная станция в виде колонки с двумя кронштейнами – верхним и нижним. В кронштейны

установлены индуктивные измерительные преобразователи с вакуумным арретированием. Арретирование измерительных наконечников обоих датчиков осуществляется автоматически.

Перемещение эталонной и поверяемой мер под измерительными наконечниками производится поверителем с помощью кассеты, в которой уложены меры и которая имеет копир для перемещения поверяемой меры согласно схеме поверки. Кассета имеет специальную форму, благодаря которой меры не касаются гранитной плиты. Применение кассеты и гранитной плиты вместо доведенного стола является отличительной особенностью установки УКМ-100 в сравнении со всеми компараторами, выпускаемыми в мире [11].

Рис. 2 Установка для поверки плоскопараллельных концевых мер УКМ-100

В нормативном документе на установку основной метрологической характеристикой является предел допустимой погрешности измерений, который не должен превышать ±(0,1+1L) мкм, где L – длина концевой меры в метрах [5]. Зарубежные производители компараторов для калибровки концевых мер длины (Mahr, Tesa, Mitutoy и др.) выражают упомянутую метрологическую характеристику через неопределенность измерений.

Неопределённость измерений (measurement uncertainty) — это параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеивание значений, которые достаточно обоснованно могли бы быть приписаны измеряемой величине.

Введение в нашей стране стандартов на воспроизводимость и неопределенность процессов измерений [2, 3] принципиально изменяет отношение к калибровке эталонных приборов. Неопределённость измерений имеет в общем случае много составляющих [2]. Фактически это факторы, влияющие на результат измерения. Некоторые из этих составляющих могут быть оценены на основании статистического распределения результатов экспериментов – неопределенность типа А. Другие составляющие вычисляют из предполагаемого распределения, основанного на опыте, паспортных данных, свидетельств или другой информации – неопределенность типа В.

Количественно неопределённость принято оценивать стандартной неопределённостью – неопределенностью, выраженной как стандартное отклонение, суммарной стандартной неопределённостью на основе суммирования дисперсий и расширенной неопределённостью с учетом вероятности распределения. Таким образом, неопределённость измерений как параметр характеризует рассеяние множество возможных результатов измерений в рассматриваемой ситуации, но не является погрешностью конкретного результата измерения.

Целью настоящей работы является проведение исследований точности установки УКМ-100 по международной методике «Calibration of Gauge Block Comparators» с расчетом неопределенности калибровки для определения соответствия зарубежным аналогам и выявления возможности дальнейшего повышения точности установки.

Методика предназначена для компараторов для калибровки концевых мер длиной до 100 мм методом сравнения, контактным методам и только с применением двух преобразователей, контактирующих с мерой с противоположных сторон. Установка УКМ-100 полностью соответствует указанным условиям.

Перед выполнением калибровки установка прошла полную подготовку и проверку на точность по методике поверки МП УКМ100.01. В соответствии с международной методикой для проведения калибровки были составлены следующие пары мер 1-го разряда:

Номера пар	Номинальная длина, мм	
	A	B
1	1,0	1,0
2	1,0	1,01
3	1,0	1,005
4	10,0	10,0
5	100,0	100,0

Процедура калибровки

1. Сравнение срединных длин мер

Меры укладывались по парам в гнезда кассеты и выполнялось по пять сравнительных измерений срединных длин всех пяти пар. Затем серия измерений повторялась, после того как положение мер A и B в кассете менялось. Для каждой серии измерений были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения (10 значений).

2. Измерение плоскопараллельности

Мера 1,01 мм укладывалась в гнездо поверяемой меры и проводились серии из пяти измерений от срединной длины меры в углы A, B, D, E по схеме, показанной на Рис. 3. Четыре измерительные серии были повторены, после поворота меры в гнезде кассеты на 180 в горизонтальной плоскости. Были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения для каждой из восьми серий.

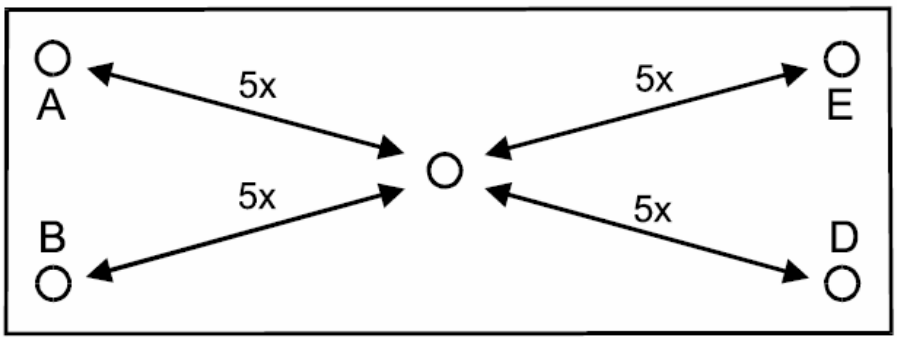


Рис. 3 Схема измерений плоскопараллельности

3. Оценка результатов

Оценка результатов калибровки компаратора зависит от того, какие концевые меры по точности должны калиброваться с помощью компаратора. В методике рассмотрены критерии приемки из условия, что компаратор применяется для калибровки мер с расширенной неопределенностью измерений, равной 0,05 + 0,5L при k= 2, что соответствует концевым мерам 2-го разряда.

При этих условиях установлены следующие критерии:

- стандартные отклонения, определенные в 1, 2 пунктах не должны превышать 0,015мкм.

- максимальные отклонения средних значений по пункту 1 и наибольших отклонений от плоскопараллельности по пункту 2 от значений эталонных мер, указанных в протоколе поверки, не должны превышать 0,03 мкм.

Протокол измерений в соответствии с описанной процедурой калибровки установки показан в табл.1, 2, 3, 4.

Таблица 1

Повторяемость

A	B	Значения	Среднее, мкм	Погрешность измерения, мкм	σ
1,0	1,0	-0,01; 0,01; -0,01; 0,02; -0,01	0	0	0,013
1,0	1,005	5,13; 5,11; 5,12; 5,12; 5,11	5,12	0,01	0,008
1,0	1,01	10,04; 10,05; 10,02; 10,02; 10,05	10,04	0,03	0,014
10,0	10,0	-0,05; -0,06; -0,05; -0,05; -0,05	-0,05	-0,02	0,004
100,0	100,0	-0,11; -0,12; -0,10; -0,10; -0,08	-0,10	0,10	0,013

Таблица 2

Повторяемость (меры поменяны местами)

B	A	Значения	Среднее, мкм	Погрешность измерения, мкм	σ
1,0	1,0	0,01; 0,00; 0,00; 0,00; -0,01	0	0	0,006
1,005	1,0	-5,07; -5,09; -5,11; -5,12; -5,11	-5,1	-0,01	0,018
1,01	1,0	-10,06; -10,05; -10,05; -10,07; -10,05	-10,06	-0,05	0,008
10,0	10,0	-0,01; 0,01; -0,01; 0,01; 0,00	0	0,03	0,010
100,0	100,0	0,00; 0,01; 0,01; 0,01; 0,02	0,01	0,01	0,006

Таблица 3

Плоскопараллельность

Направление	Значения	Среднее	σ
A	-0,06; -0,06; -0,04; -0,06; -0,05	-0,054	0,008
B	-0,10; -0,09; -0,12; -0,11; -0,11	-0,106	0,010
D	-0,04; -0,04; -0,05; -0,02; -0,04	-0,038	0,010
E	-0,11; -0,11; -0,11; -0,11; -0,11;	-0,11	0
Отклонение от плоскопараллельности:		**0,056**	

Таблица 4

Плоскопараллельность (мера повернута на 180º)

Направление	Значения	Среднее	σ
A	-0,09; -0,09; -0,10; -0,11; -0,09	-0,096	0,008
B	-0,10; -0,09; -0,08; -0,09; -0,11	-0,094	0,010
D	-0,09; -0,10; -0,08; -0,10; -0,09	-0,092	0,008
E	-0,13; -0,11; -0,10; -0,09; -0,08;	-0,109	0,017
Отклонение от плоскопараллельности:		**0,017**	

Неопределенность калибровки

Методика рекомендует составляющие неопределенности, названия, обозначения численные значения, которых представлены в табл. 5.

Таблица 5

Стандартные неопределенности калибровки

№ п/п	Название неопределённости	Обозначение	Численное значение, мкм
1	Калибровка индуктивных преобразователей	$u_{пр}$	0,014
2	Рассеивание средних значений измерений	$u_{сред}$	0,0036
3	Дискретность отсчета	$u_{отс}$	0,00289
4	Остаточная погрешность двух преобразователей	$u_{погр}$	0,0025

Суммарная стандартная неопределенность $u_{кал} = \sqrt{u_{пр}^2 + u_{сред}^2 + u_{отс}^2 + u_{погр}^2}$

$$U_{кал} = 0.01496 \text{ мкм}$$

Обобщенная неопределенность калибровки установки $U_{кал} = k \times u_{кал}$

$$U_{кал} = 2 \times 0.01496 = 0.02992 \text{ мкм}.$$

В методике калибровки обобщенная неопределенность не должна превышать

U = 0,03 мкм+0,002D, если разница длин мер D не превышает 10 мкм.

Выводы

1.Калибровка установки УКМ-100 по международной методике «Calibration of Gauge Block Comparators» показала, что установка, предназначенная для поверки концевых мер длины 3-го разряда, почти соответствует поверке концевых мер 2-го разряда, к чему стремятся производители установок, а значит не уступает по точности зарубежным аналогам.

2.Метод средних и стандартных отклонений, применяемый в международной методике, оказался хорошим инструментом для исследований факторов, влияющих на точность измерительных приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Денисов, А.В. Петров, С.Б. Тарасов. Исследование влияния различных факторов на контактные наноизмерения. «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции.
2. ГОСТ Р 54500.3 – 2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения.
3. ГОСТ Р ИСО 22514-7 – 2014. Статистические методы. Управление процессами. Воспроизводимость процессов измерений.
4. EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
5. МИ 1604-87. Меры длины концевые плоскопараллельные. Общее требования к методикам поверки.
6. ISO 3650:1998. Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards - Gauge blocks.
7. ISO Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, first edition 1995, ISO (Geneva)
8. Р50.2.038 – 2004. ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результатов измерений. М.: Госстандарт России, 2004 – 7 с.
9. РМГ 91-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
10. МИ 3281-2010. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Оценка результатов измерений - Пояснения к «Руководству по выражению неопределенности измерений». ФГУП «ВНИИМС», 2010, 19 с.
11. Авторское свидетельство № 1441156 «Прибор для поверки концевых плоскопараллельных мер длины» Авторы: Жаркой Роман Абрамович, Тарасов Станислав Борисович и др.
12. Calibration of gauge block comparators. Calibration Guide. Euramet CG-2, 2011.
13. Степанов С.Н., С.Б., Петров А.В. Качество деталей и текстура поверхности. СОВРЕМЕННОЕ Тарасов МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ, с. 1066 – 1076, 2014.

A.V.Petrov , S.B.Tarasov

Investigations of Gauge Block Comparator

all: St.Petersburg Polytechnical University Great Peter, Russia

Abstract

The paper deals with research questions the accuracy of the domestic gauge block comparator in accordance with international recommendations «Calibration of Gauge Block Comparators. Calibration Guide». The results

showed that the traditional domestic methods of calibration instruments for the certification of end measures of length differs fundamentally from the international procedure, the metrological characteristics of domestic and foreign devices at the same numerical values have different meanings. However, the numerical values of the calibration parameters of the domestic appliance are not inferior to foreign ones. International Recommendations for calibration are not only modern method of assessing the quality of instruments for verification of end measures of length, but also a tool for the study of factors affecting the quality of the instruments, and the possibility of increasing the accuracy.

Keywords: measurement, calibration, verification, comparator, standart gauge blocks, uncertainty.

REFERENSES

[1] V.V. Denisov, A.V. Petrov, S.B. Tarasov. Research of influence of various factors on contact nanoizmereniya. "Science Week SPbPU": materials of scientific-practical conference.
[2] GOST R 54500.3 - 2011 / ISO / IEC Guide 98-3: 2008. Measurement uncertainty. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.
[3] GOST R ISO 22514-7 - 2014 Statistical methods. Process Management. The reproducibility of the measurement process.
[4] EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
[5] MI 1604-87. Measure the length of the plane-parallel end. General requirements for methods of checking.
[6] ISO 3650:1998. Geometrical Product Specifications (GPS) – Length standards - Gauge blocks.
[7] ISO Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, first edition 1995, ISO (Geneva)
[8] R 50.2.038 - 2004. ICG. Measurements of direct one-off. Estimation errors and uncertainties of measurement results. M .: State Standard of Russia, 2004 – 7 p.
[9] RMG 91-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Sharing the concepts of "measurement error" and "uncertainty of measurement". General principles.
[10] MI 3281-2010. Recommendation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Evaluation of the measurement results - Explanation of the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement". FSUE "VNIIMS", 2010, 19 p.
[11] Author's certificate № 1441156 Device for verification of standart gauge blocks.
[12] Calibration of gauge block comparators. Calibration Guide. Euramet CG-2, 2011.
[13] Stepanov SN, Tarasov SB, Petrov AV The quality of the surface texture and detail. MODERN MACHINERY. SCIENCE AND EDUCATION p. 1066 - 1076 2014.

УДК 621.6.09:534.01; DOI 10.1872/MMF-2016-90

Е.В. Раменская, Ю.А. Филиппов, Н.А. Амельченко

АТТЕСТАЦИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Елена Владимировна Раменская, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск
Тел.: 8 (391) 2919134, E-mail: lena@kraslan.ru

Юрий Александрович Филиппов, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск
Тел.: 8 (391) 2919134.

Николай Александрович Амельченко, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск
Тел.: 8 (391) 2919134, E-mail: nikalam@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы аттестации работающих металлорежущих станков в условиях их цеховой эксплуатации. В отличие от базового метода оценки технического состояния по измеренным значениям жесткости, геометрической и технологической точности станков предложены два новых метода аттестации. Первый, по акустической эмиссии с количественной оценкой уровня звукового давления и мощности, второй - по амплитудам виброускорения и (или) виброскорости, полученным инструментальным измерением в локальных точках и плоскостях станочной системы.

Ключевые слова: аттестация, вибрация, акустика, прецизионность.

Введение

Появление новых средств труда и рабочих процессов в механической обработке заготовок создали условия необходимости перехода от переплетения случайностей к формированию закономерностей в прецизионном формообразовании контура деталей повышенной сложности. В связи с этим необходимо провести квалифицированную аттестацию, работающих металлорежущих станков, особенно на участках точной механики.

По данным ряда информационных агентство, Россия при общей потребности в металлорежущих станках от 1,9 - 2,1 млрд. долларов в год производит их не более 0,2 млрд.долларов, что принуждает выбрать определенную стратегию развития собственного станкостроения. Практически в стране отсутствуют современные подходы к разработке прогрессивных моделей станков с новой элементной базой не только в системах ЧПУ, но и отдельных механизмах управления динамикой работы станков. Ведущие фирмы усилили собственные исследования и разработки прецизионной техники, как основу, обеспечивающей её конкурентоспособность на рынках сбыта. Однако, необходимость выхода отечественного станкостроения на мировой и собственный рынок сбыта продукции такова, что без этого невозможно поднять экономику страны и довести её до русла стабильного подъема.

Существует три варианта решения проблемы повышения эффективности отечественного машиностроения: аттестация существующего оборудования для системного обновления; создание новых конструкций станков; приобретение импортного оборудования

Аттестация действующего технологического оборудования на основе использования отечественных государственных стандартов на нормы точности и жесткости один из путей выявления качества и точности средств технологического оснащения. Но при этом трудоемкость поверочных работ превышает допустимые нормативы простоя оборудования, предусмотренные в соответствии с планово-предупредительным ремонтом. Поэтому существует необходимость проработки методов аттестации технологического оборудования по ускоренной технологии испытаний.

1. Краткий обзор публикаций

В передовых в экономическом отношении странах, таких как США, Япония, Германия, машиностроение занимает примерно 50% в доле общего промышленного производства, а в России этот показатель не превышает 17%.

Первичный анализ показал немногочисленность исследований по вопросам аттестации рабочих машин, наиболее интересными на наш взгляд являются следующие работы.

Койетт Ж.П., Фейф К.Р. предложили способ анализа акустических собственных колебаний с помощью метода граничных элементов [1].

Кэннати-Асибу Е., Дорнфелд Д.А. установили количественные связи для акустической эмиссии при ортогональном резании металлов [2].

Латюк Д.В., Раменская Е.В., Филиппов Ю.А. получили патент на расточную оправку с эффектом демпфирования [3].

Лэ Д. раскрыл механику формообразования сливной и элементной стружки при ортогональном резании металлов [4].

Масори О. оценил параметры процесса резания при токарной обработке в режиме реального времени с установлением зависимости силы резания от подачи при точении [5].

Матью, Альфредсон использовали метод вибрационного анализа для контроля технического состояния подшипников качения [6].

Меграб, Гилсин уточнили условия потери устойчивости и изменения собственные частоты перовых сверл и резцов с канавками. Показали, что на поломку осевого режущего инструмента влияют два фактора: острота лезвия и скорость подачи, формирующие нагрузки изгиба и скручивания, тепловые явления, приводящих к потере устойчивости и увеличению амплитуд виброскорости и виброускорения, особенно при снижении собственной частоты осевого режущего инструмента [7].

Медисон В.В., Пегашкин В.Ф., Голубев В.И. открыли повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции [8].

Раменская Е.В., Филиппов Ю.А., Амельченко Н.А. раскрыли механизм генерирования и распространения вибрации в оборудовании [9].

Раменская Е.В., Филиппов Ю.А. предложили в монографии управление вибрацией средств технологического оснащения [10].

Фрейденштейн Ф., Мейси Ж.П., Мейки Е.Р. исследовали одновременное уравновешивание вертикального и горизонтального моментов в быстроходных машинах [11].

Янг Ж.Н., Донат Р.С. выявили статистику роста трещины в жаропрочном сплаве при действии длительной нагрузки [12].

Рассмотренные первоисточники разъясняют отдельные моменты, используемые в операции проверки и аттестации станочного оборудования в цеховых условиях.

2. Теоретические подходы к решению задачи

Для количественной оценки качества станочной системы можно принять следующие компоненты вибрации с амплитудами: виброперемещения Sv, виброскорости Vv и виброускорения Av, а также амплитуду уровня звукового давления SPL.

Акустическая эмиссия связана с упругими волнами напряжения, которые возникают при быстром освобождении энергии, накопленной при деформировании, за счет перестроения внутренней структуры материалов. Волны напряжения от перестроения структуры материала вызывают деформацию поверхности, которые можно обнаружить при измерении вибрационных компонент: перемещения, скорости, ускорения точки или поверхности обследуемого объекта.

Образование стружки, её перемещение по передней грани резца, а также скольжение обработанной поверхности вдоль задней грани резца приводит к изменению интенсивности излучения звука.

По первому методу - методу акустической эмиссии измеряются логарифмические уровни характеристик звукового поля с использованием ме-

тодики и протокола измерения по ISO 230-5-2002. При измерении шумомер реализует следующие амплитудные значения функций: уровень звукового давления; интенсивность излучения звука; уровень звуковой мощности. Измеренные значения характеристик акустической эмиссии сравниваются с нормативными показателями, имеющихся в действующих регламентах, например, EN ISO 3748-95, стандартах серии ССБТ, а также ГОСТ 30457-2006, ГОСТ Р ИСО 12716-2009, ГОСТ 12.2.10785. После анализа принимают решения о качестве и аттестации станка.

По второму методу, по амплитуде значения одной компоненты вибрации, для аттестации станка амплитуды вибрации определяются при наличии документации на него, в частности руководства по эксплуатации и паспорта по уравнениям, полученных авторами при исследовании станочных систем RU 2 332 652 C1 МПК G01M 7/00.

Виброскорость, принадлежащая механизму главного движения, описывается функцией

$$V_v = \omega \cdot S \cdot \sin \omega t ,$$

где ω – вынужденная частота процесса резания. Определяется по формуле

$$\omega = \frac{n \cdot d_i \cdot z}{60 \cdot (d_e - d_i)},$$

n – частота вращения; z – число тел качения в подшипнике; d_e и d_i – диаметры беговой дорожки наружного и внутреннего кольца подшипника.

Функция отражающая виброперемещение исследуемой поверхности или точки:

$$S = [\pi \cdot \{[\sum_{rk=1}^{N} \int_0^{IT} dx/(k_r \cdot x + k_l)]/N + [\sum_{rb=1}^{M} \int_0^{it} dy/(k_l \cdot y + k_r)]/M\}/2] + \frac{1}{n_k - 1} \cdot (\sum_{i=1}^{n_k} x_i),$$

где IT – допуск отверстия контактной пары вращения и корпуса шпиндельной сборки, it – допуск контактной пары типа вал; rk = 1…N – число сопряженных контактных пар в конструкции механизма для вала; rb = 1…M – число сопряженных контактных пар в конструкции механизма для отверстия; N, M – наибольшее число сопряженных контактных пар для вала и отверстия; k_r = D / d – коэффициент связи по диаметрам; D, d – соответственно диаметры подшипника наружный и внутренний; k_l = L / D – коэффициент связи по линейному размеру; L – расстояние между опорами шпинделя; x – горизонталь, ось абсцисс; y – вертикаль, ось ординат; x_i – составляющие компоненты виброскорости, определяется по частным функциям; n_k – коэффициент, зависящий от количества входящих компонент x_i: n_k = 1÷10.

Виброускорение, принадлежащее механизму главного движения в области опор качения на поверхности корпуса шпиндельной сборки, можно описать функцией

$$A_v = \omega^2 \cdot S \cdot \cos \omega t .$$

Рассчитанные по приведенным выражениям значения амплитуд компонент вибрации сравниваются с измеренными значениями одноименных амплитуд, по результату численного анализа принимается решение о качестве станка [7].

Теоретические значения амплитуд вибрации при отсутствии необходимой конструкторской документации определяются по значениям регламентных величин радиального биения и (или) соосности опор шпинделя. Кроме этого, для расчетов можно использовать значения эксцентриситета оси вращения шпинделя, определяемого в соответствии с методикой ГОСТ ИСО 1940-1-2007.

Представленные уравнения прошли верификацию при численном моделировании и физическом эксперименте.

3. Экспериментальные исследования

Имитационное моделирование по уравнению $mq'' + \alpha q' + cq = F \cdot Sin\,\omega t$ упругого движения характерных точек и плоскостей, принадлежащих контуру станка, выполнено в прикладном пакете Mathcad с учетом робастности Тагути, применением характеристического уравнения оператора L(t,X) и матрицы D(t,X). Полученные значения амплитуды виброперемещения на первом фрагменте рис. 1 не превышают 7,5 мкм в установившемся режиме работы станка.

$t0 := 0 \quad t1 := 1.0 \qquad ic := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad N := 750$

$$D(t,X) := \begin{bmatrix} X_1 \\ 1.641 \cdot \cos(223 \cdot t) - 59.93\,X_1 - 273529\,X_0 - 14395566\,(X_0)^3 \end{bmatrix}$$

$S := rkfixed(ic, t0, t1, N, D) \qquad T := S^{\langle 0 \rangle} \qquad X := S^{\langle 1 \rangle}$

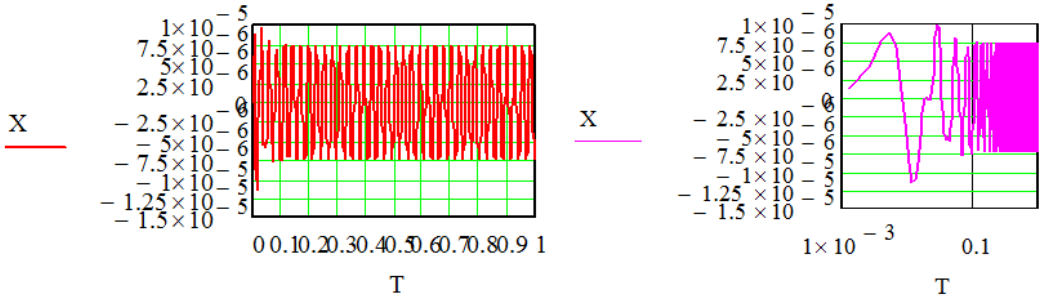


Рис. 1. Моделирование динамики работы обрабатывающего центра SL10

При этом, переходной процесс, представленный на втором фрагменте, завершается на 0,1 с работы. Такое моделирование позволяет оценить виброустойчивость, и как следствие техническое состояние станка.

Физический эксперимент

Для установления связи амплитуд компонент вибрации с акустической эмиссией инструментальные измерения проводились в процессе фрезерования анизотропного материла на горизонтальном станке модели MSP315. Режущий инструмент: ножи HSS, z=4, угол $\beta=40^0$. Скорость резания 22 м/с. Скорость подачи 8 м/мин. Заготовка: композит с размерами a=169 мм, h = 24 мм, плотность 520 кг/м^3 Измерения проводились при нормальных условиях эксплуатации оборудования в помещении. Измерительная аппаратура: виброметр марки АТТ-9002; шумомер марки Center 320; тахометр типа АКИП 9202 с точностью измерения ± 1мин$^{-1}$; штангенциркуль Guandlu с ценой деления 0,01 мм; магнитная стойка, клещи измерительные Uni-t 233. Результаты измерения при холостом ходе с включенными механизмами резания, подачи и при резании:

– SPL=75,9 ÷ 77,5 дБА – измеренный уровень звукового давления по методике ИСО 230-5-2002;

– уровень шума на месте эксплуатации по европейским нормам Lpx = 81,5 дБА при холостом ходе; Lpr=88,4 дБА при резании;

– уровень акустической мощности по EN ISO 3748-95 при холостом ходе; Lwx=88,4 дБА, Lwr=95,1 дБА при фрезеровании;

– Vsp=1,3 мм/с – пиковые значения виброскорости и Asp =4,3 м/с^2 – виброускорения при резании n=4487 мин$^{-1}$, а при рабочем ходе и исходных значениях Vs=8 м/мин при n=4487 мин$^{-1}$.

Вторая серия экспериментов проведена на обрабатывающем центре токарной группы марки SL20 в условиях действующего производства при точении винта Trap 45x7 сталь 30ХГСА, So=0,13 ÷ 0,17 мм/об, n=500; 700 мин$^{-1}$, глубина резания t=1 мм при точении и 4 мм при нарезании резьбы получены следующие значения параметров Asp = 7,9 ÷ 8,5 м/с^2; SPL = 77,6 ÷ 82,9 дБА.

4. Обсуждение результатов

Теоретические проработки вибрационных процессов с использованием уравнений движения упругой станочной системы при поперечных и угловых колебаниях показывают возможность проведения аттестации эксплуатируемого станочного парка металлорежущих станков при количественной оценке амплитуд виброскорости и виброускоения.

Кроме того, измерения акустической эмиссии, выполненные в процессе экспериментальных исследований, показали не большие расхождения численных значений амплитуд звукового давления по сравнению с европейскими регламентными значениями EN ISO 3748-95.

Такое положение свидетельствует о возможности первичной оценки технического состоянии станочной системы шумомером при непосредст-

венном обходе, что почти в 2 - 3 раза ускоряет нахождение неликвидного оборудования, требующего замены. Заслуживает внимания оценка топографии обработанной поверхности детали в процессе аттестации, как дополнительный фактор прецизионности.

Вследствие отсутствия отраслевых утвержденных норм на компоненты вибрации, можно утвердить техническим советом предприятия временные нормы, разработанные на отдельные группы станков. Здесь подспорьем является наличие нормативов на параметры шума и вибрацию рабочих мест, изложенных в государственных нормативах системы стандартов безопасности труда серии 12.0. А также возможность пересчета уровня звукового давления на амплитуду пикового виброускорения, полученного исследованиями. Без сомнения необходимы прикладные исследования в области вибрации технологических машин на государственном уровне, несмотря на наличие стандарта серии ИСО230-8 и ИСО 230-9.

Заключение

1. Количественное значение величины параметров технического состояния аттестуемых металлорежущих станков можно получить зондированием акустической эмиссии и(или) измерением амплитуд компонент вибрации в процессе их работы. При чем, трудоемкость зондирования в 2 - 3 раза меньше трудоемкости измерения параметров вибрации, вследствие ненадобности операции установки датчиков вибрации на объект исследования.

2. Функция отклика строится по измеряемой амплитуде вибрации исследуемой рабочей машины по одному из пиковых или среднеквадратичных значений амплитуды виброускорения, виброскорости, виброперемещения или их численных соотношений.

3. Ошибка измерений амплитуд компонент вибрации, работающих технологических машин не превышает 5% при нормальных условиях их эксплуатации, а при зондировании уровней звукового давления 7%, что соответствует классу точности виброметра марки АТТ-9002 и шумомера Center 320.

4. Погрешность сравнительных измеренных значений величин уровня звукового давления от рассчитанных по значению величин виброускорения составила от 6,3% до 15,3% при холостом ходе и от 5,9% до 10,2% при резании.

5. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность эффективной аттестации станочного парка при минимальных затратах с проявлением эмерджентности - качественно нового проявления атомно-молекулярного строения корпусных деталей станочной системы.

6. При аттестации электродвигателей следует руководствоваться нормативами регламента ГОСТ МЭК 60034.14-2008 с амплитудой виброускорения не более 2,5 м/с^2.

Результаты выполненных исследований используются в учебном процессе при подготовке магистрантов по специальности 15.04.05 - конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, а также при аттестации технологического оборудования на базовом предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Койетт Ж.П., Фейф К.Р. Усовершенствованный способ определения акустических собственных колебаний с помощью метода граничных элементов // Современное машиностроение Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. – 1990. – №12. – С. 133-140.
2. Кэннати-Асибу Е., Дорнфелд Д.А. Количественные соотношения для акустической эмиссии при ортогональном резании металлов // Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. – 1981. – Т.103. – №3. – С. 152-163.
3. Латюк Д.В., Раменская Е.В., Филиппов Ю.А. Расточная оправка. Патент на полезную модель RU, №129439. – 2013.
4. Лэ Д. Механика формообразования стружки при ортогональном резании // Теоретические основы инженерных расчетов. Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. – 1984. – Т.106. – №1. – С. 10-17.
5. Масори О. Оценка параметров процесса резания при токарной обработке в режиме реального времени // Конструирование и технология машиностроения. – 1984. – №3. – С.141-145.
6. Mathew J., Alfredson R.J. The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration // Конструирование и технология машиностроения. – 1984. – №3. – С.100-108.
7. Меграб Е.В., Гилсин Д.Е. Нагрузки потери устойчивости и собственные частоты перовых сверл и резцов с канавками // Конструирование и технология машиностроения. – 1984. – №3. – С.127-133.
8. Повышение стойкости режущего инструмента методом электроизоляции / В.В. Медисон [и др.] // Технология машиностроения. – 2012. – №10. – С. 13-16.
9. Раменская Е.В., Филиппов Ю.А., Амельченко Н.А. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах // Вестник СибГАУ. – 2012. – № 1 (41). – С. 132-138.
10. Раменская Е.В., Филиппов Ю.А. Управление вибрацией средств технологического оснащения: монография. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – 172 с.
11. Фрейденштейн Ф., Мейси Ж.П., Мейки Е.Р. Оптимальное одновременное уравновешивание вертикального и горизонтального моментов в быстроходных машинах // Конструирование и технология машиностроения. Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. – 1981. – Т.103. – №3. – С. 9-15.

12. Янг Ж.Н., Донат Р.С. Статистика роста трещины в жаропрочном сплаве при действии длительной нагрузки // Теоретические основы инженерных расчетов. Труды американского общества инженеров-механиков, ASME. – 1984. – Т.106. – №1. – С. 81-86.

Ramenskaja E.V., Filippov Ju.A., Amelchenko N.A.

CERTIFICATION OF THE OPERATED TECHNOLOGICAL MACHINES

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, Russia

Abstract

The problems of machine tools certification that operate in the production conditions are considered in the paper. We have proposed two new methods of certification in contrast to a basic method of the technical condition estimation by measuring values of stiffness, according to geometrical and technological precision of machines. The first method is carried out by acoustic emission quantitative assessment of the level of sound pressure and power, the second - on the amplitudes of vibrating acceleration or velocity, obtained by instrumental measurement of the local points and planes machine tool systems.

Key words: certification, vibration, acoustics, precision

REFERENCES

[1] Koyett Zh.P., Feyf K.R. An Improved Formulation for Acoustic Eigenmode Extraction from Boundary Element Models // Sovremennoe mashinostroenie. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1990. № 12. Pp. 133-140. (rus.)

[2] Kennati-Asibu E., Dornfeld D.A. Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Mettal Cutting // Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1981. Vol. 103, №. 3. Pp. 152-163. (rus.)

[3] Latjuk D.V., Ramenskaja E.V., Filippov Ju.A. Rastochnaja opravka. Patent na poleznuju model RU. № 129439. 2013.

[4] Le D. The Nature of Chip Formation in Orthogonal Machining // Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1984. Vol.106, № 3. Pp. 10-17. (rus.)

[5] Masory O. Real-Time Estimation of Gutting Process Parameters in Turning // Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1984. Vol.106, № 3. Pp.141-145. (rus.)

[6] Mathew J., Alfredson R.J. The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration // Konstruirovanie i tekhnologiya

mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1984. Vol.106, № 3. Pp.100-108. (rus.)
[7] Magrab E.B., Gilsinn D.E. Buckling Loads and Natural Freguencies of Drill Bits and Fluted Cutters // Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1984. Vol.106, № 3. Pp.127-133. (rus.)
[8] The increased resistance of the cutting tool by the method of electoisolation / Medison V.V. [i dr]. // Tehnologija mashinostroenija. 2012. № 10. Pp. 13-16. (rus.)
[9] Ramenskaja E.V., Filippov Ju.A., Amelchenko N.A. The mechanism of generation and propagation of vibration of the technological machines // Vestnik SibGAU. 2012. № 1 (41). Pp. 132-138. (rus.)
[10] Ramenskaja E.V., Filippov Ju.A. Upravlenie vibraciej sredstv tehnologicheskogo osnashhenija: monografija. Krasnoyarsk: SibGAU. 2011. 172 p. (rus.)
[11] Freydenshteyn F., Meysi Zh.P, Meyki E.R. Optimum Balancing of Combined Pitchyng and Yawing Moments in High-Speed Machinery // Konstruirovanie i tekhnologiya mashinostroeniya. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. 1981. Vol.103, № 3. Pp. 9-15. (rus.)
[12] Yang Zh.N., Donat R. S. Statistics of Crack Growth of a SuperalloyUnder Sustained Load // Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov, ASME. – 1984. – Vol.106, № 1. Pp. 81-86. (rus.)

УДК 621.431; DOI 10.1872/MMF-2016-91

С.Н. Степанов[1], Н.Ю. Видинеева[2].

ОСОБЕННОСТИ ПЛАТОХОННИНГОВАНИЯ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

[1]Сергей Николаевич Степанов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail:Stepanov56@mail.ru

[2]Надежда Юрьевна Видинеева, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail:vidineeva_n@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы взаимосвязи ряда специфических свойств поверхности необходимых для обеспечения нормальной работы двигателя до очередного капитального ремонта и микрогеометрии поверхности зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания. Результаты показали, что качество восстановления блока цилиндров двигателя при капитальном ремонте определяется не только допуском на размер, но и текстурой поверхности после механической обработки. Самыми распространенными параметрами для оценки качества поверхности зеркала цилиндра являются параметры, описывающие кривую Аббота – Файрстоуна использование которых позволит значительно улучшить качество и обеспечить функциональное назначение поверхности зеркала цилиндра.

Ключевые слова: качество поверхности, параметры шероховатости, волнистость, форма, направление неровностей, двигатель внутреннего сгорания, капитальный ремонт, блок цилиндров.

Двигатель внутреннего сгорания — это сложный агрегат, который требует квалифицированного обслуживания, а при необходимости и ремонта. Капитальный ремонт двигателя автомобиля в первую очередь связан с восстановлением поверхности зеркала цилиндров до исходного или близкого к нему состояния [2]. Каждый двигатель имеет свои особенности поэтому важно знать исходное состояние зеркала цилиндров перед тем как принимать решение по его восстановлению. Описать текстуру поверхности можно через ее параметры [6, 7, 8], однако различные производители

двигателей придерживаются своих параметров, которые не соответствуют нашему ГОСТу, а иногда и стандартам ISO.

При эксплуатации двигателя внутреннего сгорания внутренняя поверхность цилиндров постепенно изнашивается и плато-хонингованный профиль постепенно исчезает. Однако в нижней части цилиндров есть область рис 1, которая не контактировала с поршневыми кольцами и поэтому на ней сохраняется исходный профиль шероховатости поверхности. Эту узкую полоску можно использовать для оценки исходного профиля, полученного на заводе изготовителе.

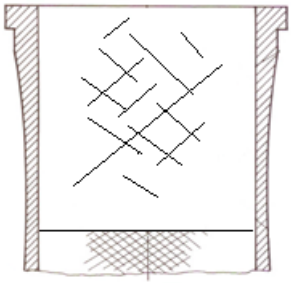


Рис.1. Вид изношенного цилиндра двигателя внутреннего сгорания перед капитальным ремонтом

В работе [1] было показано, что управление микрогеометрией поверхностей, участвующих в процессе трения является самым эффективным способом повышения моторесурса двигателя внутреннего сгорания. Поэтому воспроизведение первоначального профиля шероховатости поверхности полученного на заводе изготовителе является актуальной задачей. Отсюда целью исследований, проводимых на кафедре «Технология машиностроения» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого является разработка рекомендаций, позволяющих воспроизводить исходный профиль шероховатости поверхности цилиндров двигателей внутреннего сгорания про капитальный ремонт.

В современном машиностроении при производстве двигателей внутреннего сгорания применяется операция плато-хонингования рис. 2. Раньше вместо плато-хонингования использовалось обычное хонингование.

Поверхность цилиндров двигателя внутреннего сгорания, полученная по технологии плато-хонингования, обладает рядом специфических свойств необходимых для обеспечения нормальной работы двигателя до очередного капитального ремонта. Основным свойством такой поверхности является удержание масла. Постоянное наличие масла на поверхности цилиндра двигателя обеспечивает малый коэффициент трения, что уменьшает сопротивление при циклическом перемещении поршня тем самым увеличивает КПД двигателя и полезную мощность. Наличие смазки уменьшает трение, а, следовательно, и износ поверхности цилиндра двигателя и шатунно-поршневой группы.

В силу своей вязкости при возвратно-поступательном движении поршня масла из масляных карманов на плато-хонингованой поверхности устремляется в след за поршневым кольцом и заполняет зазор между кольцом и поверхностью цилиндра двигателя тем самым обеспечивается гидравлический затвор. Гидравлический затвор препятствует попаданию продуктов горения в картер двигателя и возникновения там избыточного давления.

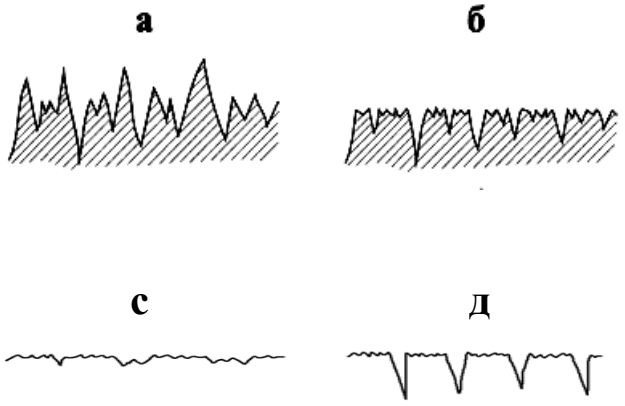


Рис. 2. Поверхность цилиндра двигателя внутреннего сгорания: а – хонингованная; б – плато-хонингованная; с – хонингованная после пробега 10000 км; д – плато-хонингованная после пробега 10000 км.

Все перечисленное выше говорит о том, что правильно выбранный профиль шероховатости внутренней поверхности цилиндра двигателя влияет не только на срок службы двигателя до капитального ремонта, но и на его мощность, расход топлива и экологическую безопасность.

Для плато-хонингования рис. 3 необходимо собственно две ступени обработки для того, чтобы достичь необходимую структуру поверхности. Однако в серийном производстве в настоящее время производится обработка в три ступени, чтобы при различной черновой обработке зеркала цилиндра. получить равномерное качество поверхности. Почти во всех случаях применения плато-хонингования предыдущая операция прецизионного растачивания проводится режущими керамическими пластинами. При этом получают, при стойкости в среднем около 180 отверстий на пластину, поверхности различной шероховатости. Если, например, с новой пластиной вначале получается шероховатость R_Z=4..5 микрон, то к концу времени стойкости данной пластины шероховатость увеличивается до R_Z=20-25 микрон. Такого рода большие различия в шероховатости оказываются, хотя и ослабленно, на работе применяемого вслед за этим алмазного хонинговального инструмента, а именно в том, что необходимая для плато-структуры получистовая шероховатость образуется недостаточно равномерно. Поэтому целесообразно выполнить операцию чернового хонинго-

вания с целью достижения равномерности шероховатости поверхности, а само получистовое плато-хонингование и чистовое плато-хонингование выполнить как вторую и третью операции. Алмазные хонинговальные бруски, успешно применяемые с инструментом чернового хонингования, имеют, таким образом, не только задачу обработки материала, но и в определенной степени должны увеличить шероховатость слишком гладкой поверхности отверстия после расточки и сделать более гладкой слишком шероховатую поверхность, с тем, чтобы создать необходимые предпосылки для оптимального результата обработки при последующем плато-хонинговании.

Припуск на обработку при данной операции чернового хонингования может, не оказывая существенного влияния на конечный результат, варьироваться в пределах 0,05-0,15 мм. Развитие шероховатости поверхности зеркала цилиндра в процессе отдельных операций обработки характерно показано на рис. 3. При получистовом плато-хонинговании, т.е. во время второй хонинговальной операции, узкими крупнозернистыми алмазными хонинговальными брусками, например, с размером: зерна Д150 и низкой концентрацией или керамическими хонинговальными брусками с зерном SC 60...80, образуются равномерные одинаково направленные хонинговальные следы. При этом снимаемый материал составляет максимально 0,015...0,02 мкм. Во время третьей ступени операции, убираются пики поверхности "плато" после получистового хонингования низко зернистыми хонинговальными брусками, например, SCG 320 или алмазными хонинговальными брусками с зерном Д30 за 3-4 рабочих хода с максимальным временем хонингования 5…8 сек. Этой операцией выполняется профиль плато рис. 4. С целью достижения лучшего эффекта обработки, а также для того, чтобы за счет изменения ориентации графитовых пластин уменьшить отслоения, которые возникают, в частности, при алмазном хонинговании с высоким давлением прижима, изменяется направление вращения хонинговальных шпинделей в каждой последующей ступени операции.

Из-за неодинакового времени получистового и чистового хонингования целесообразно проводить эти операции друг за другом в одной позиции обработки. Для этого разработаны хонинговальные инструменты с двойной системой подачи, при помощи которой обе хонинговальные операции, включая изменение направления вращения, могут проводиться в неразрывной последовательности. Возможность проводить обе операции за одно зажатие следует рассматривать как дополнительное преимущество дачного метода. С такими системами двойной подачи в настоящее время на хонинговальных станках, рассчитанных соответствующим образом, проводятся экономично другие хонинговальные операции, отличающиеся, от плато-хонингования

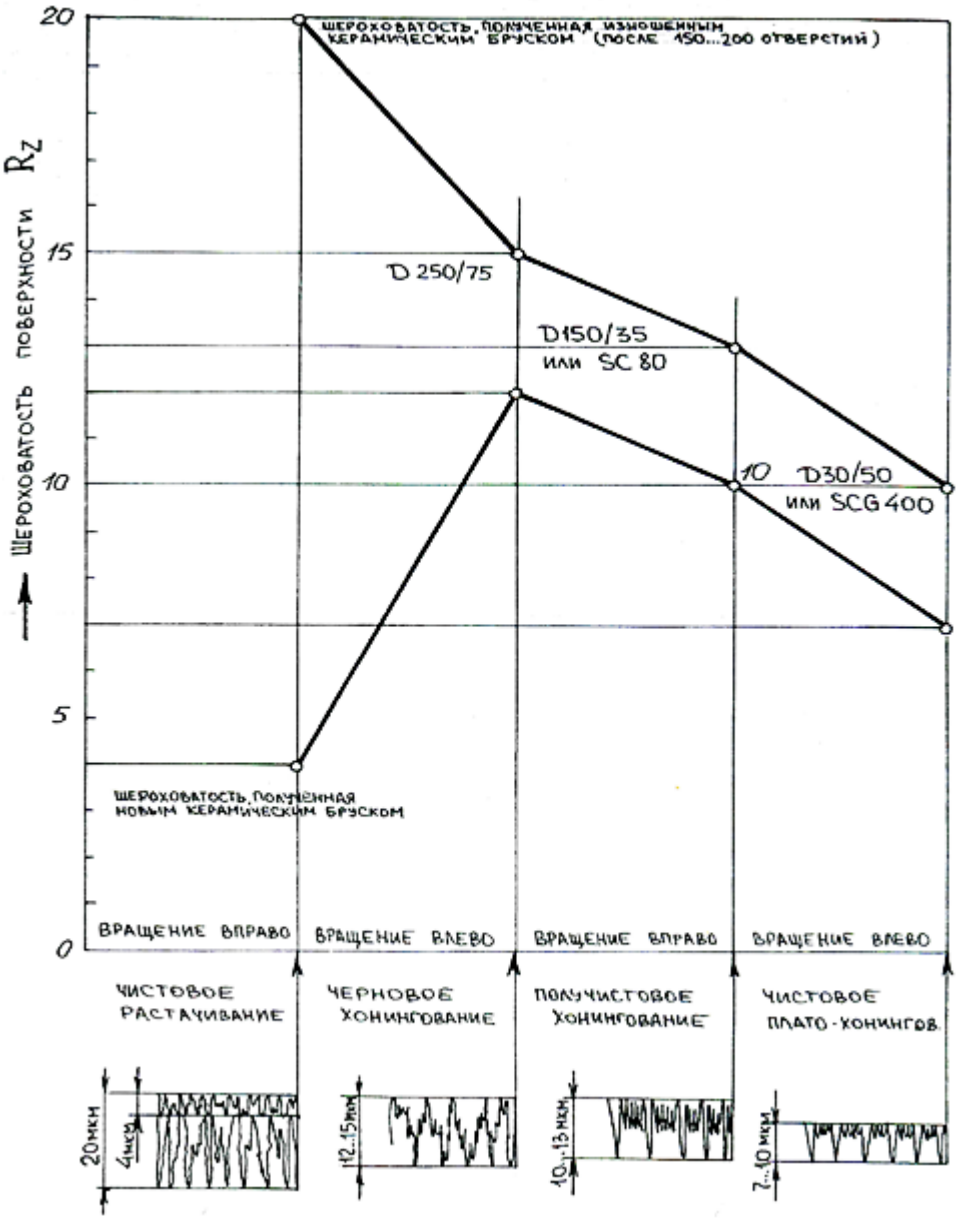


Рис. 3. Изменение шероховатости при плато-хонинговании

Для достижения точности по размерам с помощью автоматических измерительных устройств момент переключения с получистового плато-хонингования на чистовое плато-хонингование выбирается таким образом, что при достижении нижней границы заданного допуска на обработку включается вторая система подачи.

Чистовое плат-хонингование производится по регулировке времени или по счетчику ходов. Сам процесс переключения происходит в доли секунды, таким образом, хонинговальный инструмент постоянно находится в движении в отверстии и при этом не возникает неконтролируемой фазы в процессе хонингования.

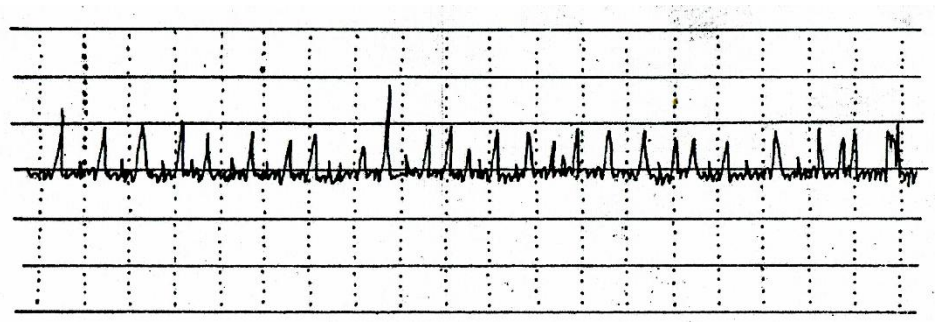


Рис. 4. Зеркало цилиндра двигателя внутреннего сгорания после чистового плато-хонингования

Для контроля шероховатости поверхности [3, 4] после плато-хонингования большинство фирм производителей двигателей внутреннего сгорания используют параметры согласно стандарту, ISO 13565-2:1998

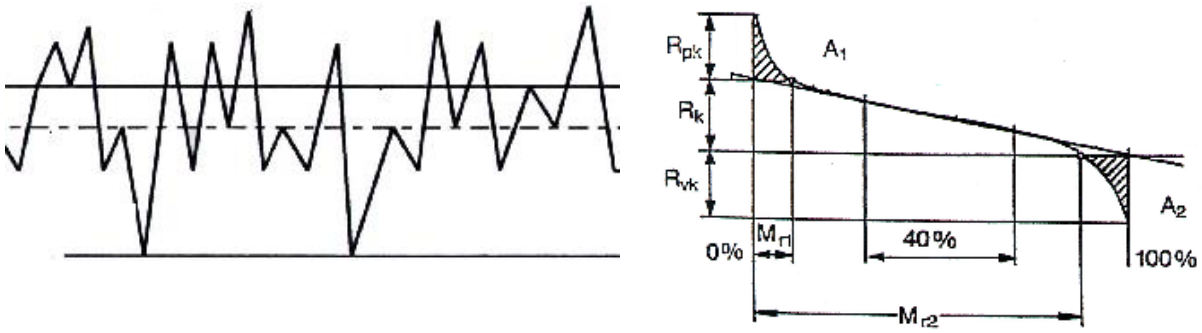


Рис. 5. Семейство R_k параметров [3]

где: A_1 - зона выступов наполнение материалом

A_2 - зона впадин наполнение маслом

R_k - середина шероховатости

R_{pk} - высота выступов

R_{vk} - глубина впадин

M_{r1}- минимальное материальное отношение

M_{r2} - максимальное материальное отношение

V0 = Rvk(100-Mr2)/200 - объем наполнения, задержания.

Из вышесказанного следует, что особенностью плато-хонингования при капитальном ремонте двигателей внутреннего сгорания является то, что необходимо как можно точнее воспроизвести профиль шероховатости поверхности зеркала цилиндров двигателя, полученного на заводе изготовителе при этом руководствоваться параметрами шероховатости поверхности согласно ISO 13565-2:1998.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов С.Н., Видинеева Н.Ю. Микрогеометрия зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания. Современное машиностроение. Наука и образование №4. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. С 1059-1065.
2. Степанов С.Н, Тарасов С.Б., Видинеева Н.Ю Диагностика, ремонт и обслуживание автомобилей: учебное пособие. Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург. 2010.
3. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург. 2007.
4. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, применяемые методы и приборы. Под ред. Мышкина Н.К. Московская обл.: Издательство Дом «Интеллект», 2009.
5. Brown Christofer. What is Roughness? An introduction to Surface metrology. Proceedings of the 2ut Seminar on Surface Metrology for the Americas. p. 2-3. Worcester Polytechnic Institute, Worcester. MA, USA, 2012.
6. Krystek M.P. ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement. Berlin: Beuth-Verlag; 2010.
7. Learn R. The Measurement of Surface Texture using Stylus Instruments. Measurement Good Practice Guide № 37. National Physical Laboratory Tedolington, Middlesex, United Kingdom. 2001.
8. Mummery L. Surface Texture Analysis. The Handbook. Hommelwerke GmbH. West Germany. 1990.
9. Sander M. A. Practical Guide to the Assessment of Surface Texture. Feinpriit Perthen GmbH.
10. Tabenkin A. Surface Finish Measurement Basics. Magazine Quality 101. USA.2004.
11. Tabenkin A. To Each This Own Parameter. Quality Digest, USA, 2001.
12. Tabenkin A. ABCs of Rz. Quality Magazine USA, 2007.

S.N. Stepanov[1], N.U.Vidineeva[2]

[1,2]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

FEATURES OF PLATO-HONINGOVANIYA AT CAPITAL REPAIRS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Abstract

In work questions of interrelation of a number of specific properties of a surface necessary for ensuring normal operation of the engine before the next capital repairs and microgeometry of a surface of a mirror of the cylinder of an internal combustion engine are considered. Results have shown that quality of restoration of the block of cylinders of the engine at capital repairs is defined not

only the admission on the size, but also texture of a surface after machining. The most widespread parameters for an assessment of quality of a surface of a mirror of the cylinder are the parameters describing Abbott's curve – Fayrstouna use of which will allow to improve considerably quality and to provide a functional purpose of a surface of a mirror of the cylinder.

Key words: quality of a surface, roughness parameters, sinuosity, form, direction of roughnesses, internal combustion engine, capital repairs, block of cylinders.

REFERENCES

[1] Stepanov S. N., Vidineeva N. Yu. The surface of the mirror cylinder of the internal combustion engine. The modern mechanical engineering. Science and education No. 4. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University, 2014. With 1059-1065.
[2] Stepanov S. N., Tarasov S. B., Vidyaeva N. Yu Diagnosis, repair and maintenance of vehicles: textbook. Publishing Poly-technical University. Saint-Petersburg. 2010.
[3] Tabenkin, A. N., Tarasov S. B., Stepanov S. N. Roughness, volny capacity, profile. International experience. Publisher politechnice the universities. Saint-Petersburg. 2007.
[4] Whitehouse D. the Metrology of surfaces. The principles applied me-Toda and devices. Edited by Myshkin N. To. Moscow region: Publications the government House "Intellect", 2009.
[5] Brown Christofer. What is Roughness? An introduction to Surface metrology. Proceedings of the 2ut Seminar on Surface Metrology for the Americas. p. 2-3. Worcester Polytechnic Institute, Worcester. MA, USA, 2012.
[6] Krystek M.P. ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement. Berlin: Beuth-Verlag; 2010.
[7] Learn R. The Measurement of Surface Texture using Stylus Instrument. Measurement Good Practice Guide № 37. National Physical Laboratory Tedolington, Middlesex, United Kingdom. 2001.
[8] Mummery L. Surface Texture Analysis. The Handbook. Hommelwerke GmbH. West Germany. 1990.
[9] Sander M. A. Practical Guide to the Assessment of Surface Texture. Feinpriit Perthen GmbH.
[10] Tabenkin A. Surface Finish Measurement Basics. Magazine Quality 101. USA.2004.
[11] Tabenkin A. To Each This Own Parameter. Quality Digest, USA, 2001.
[12] Tabenkin A. ABCs of Rz. Quality Magazine USA, 2007.

УДК 621.923; DOI 10.1872/MMF-2016-92

С.С. Степанов[1], С.Н. Степанов[2]

ЭТАЛОННЫЙ ПРИБОР С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.

[1]Степанов Сергей Сергеевич, инженер
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail: stepanov.sergey.koi@gmail.com

[2]Сергей Николаевич Степанов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail:Stepanov56@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с поверки ручного измерительного инструмента и разработкой эталонного прибора для этих целей. Представлена конструкция прибора для поверки двухточечных ручных инструментов и результаты первых испытаний изготовленной модели.

Ключевые слова: прибор, точность измерений, ручной инструмент, методика поверки, погрешность позиционирования.

Центры метрологии стандартизации и сертификации и крупные машиностроительные предприятия, особенно в оборонной промышленности имеют специализированные лаборатории по поверки средств измерений. Практически каждое предприятие, занимающееся механической обработкой, имеет в своем распоряжении много ручного измерительного инструмента. Часть инструмента находится непосредственно на рабочих местах, а часть в измерительных лаборатория. В зависимости от интенсивности эксплуатации инструмент требует поверки т.е. подтверждения своих технических характеристик [1]. Основными средствами для поверки самого распространенного ручного инструмента для линейно-угловых измерений, такого как штангенциркули, микрометры, измерительные скобы, нутромеры различных видов, толщиномеры, стенкомеры, глубиномеры и др. являются концевые меры длины, образцовые кольца и другие эталонные средства измерений. В СССР выпускали эталонные приборы, которые до сих пор находятся в эксплуатации это, как правило приборы с ручным приводом отсчетом по шкале либо с цифровым отсчетным устройством. За длительные годы эксплуатации приборы изношены и требуют частого ре-

монта либо вообще выходят из строя. Конструкция этих приборов не совершенна, требует высокой квалификации поверителей, в результате на качество поверки существенное влияние оказывает человеческий фактор. Мелкие шкалы, бледные экраны утомляют работающих на этих приборах, что приводит к допускаемым ошибкам.

Существующие импортные аналоги, выпускаемые ведущие мировые фирмы производители эталонной техники такие как Mahr (Германия), Mitutoyo (Япония), Tesa (Швейцария) и др. представляют собой портативные метрологические мини-лаборатории, предназначенные как для поверки высокоточного, так и более грубого измерительного инструмента. К сожалению, в России такие приборы не выпускаются, поэтому разработка и внедрение отечественных приборов с системой автоматического управления представляет собой огромный интерес.

Востребуемость данного прибора объясняется еще и тем, что он предназначен для широко распространенной группы двухточечных измерительных инструментов таких как штангенциркули, микрометры, нутромеры, скобы и др. Таким образом, прибор позволяет заменить импортные дорогостоящие аналоги, что в связи с современной международной политической и экономической обстановкой, а также курсом государства на импортозамещение придает ему ещё большую актуальность.

Применение приборов с автоматическим управлением позволит снизить утомляемость поверителей, повысить точность и производительность поверки, исключить человеческий фактор и автоматизировать процесс распечатки протокола поверки [2].

Цель данной научной работы является разработка и проведение государственных испытаний эталонного прибора с автоматической системой управления для поверки широко распространенного на машиностроительных предприятиях ручного измерительного инструмента. Данный прибор разрабатывается на кафедре «Технология машиностроения» Санкт-Петербургского университета Петра Великого.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана конструкция прибора;
- выбран тип системы управления и тип привода;
- разработана принципиальная схема системы управления приводом;
- изготовлен опытный образец.

В результате проведенного анализа технической литературы [6,7] и предварительных расчетов была выбрана система управления с обратной связью по положению рабочего органа измерительного прибора. Данная система наиболее полно удовлетворяет требованиям по точности позиционирования измерительной каретки прибора, а также позволяет контролировать положение в реальном режиме времени.

Сервопривод данной системы состоит из шагового двигателя с встроенным редуктором и шариковой винтовой пары. Шаговый двигатель позволяет обеспечить достаточно высокую точность углового поворота выходного вала, а встроенный редуктор обеспечивает достаточную мощность на выходном валу. Шариковая винтовая пара благодаря предварительному натяга обеспечивает высокую жёсткость передачи и малую зону нечувствительности при реверсе.

Автоматическая система управления прибором для поверки двухточечного ручного измерительного инструмента изображена на рис. 1. Для обеспечения точности позиционирования измерительной каретки система снабжена линейным датчиком обратной связи. Применение линейного датчика в отличие от кругового позволяет выполнять прямые измерения положения каретки, что повышает точность позиционирования [3, 5].

Система состоит из: управляющего компьютера где находится программа управления прибором, контроллера, который преобразует сигналы управления в управляющие импульсы, шагового двигатель, шариковая винтовая пара, которая преобразует вращательное движение винта в поступательное движение измерительной каретки и линейного датчика обратной связи.

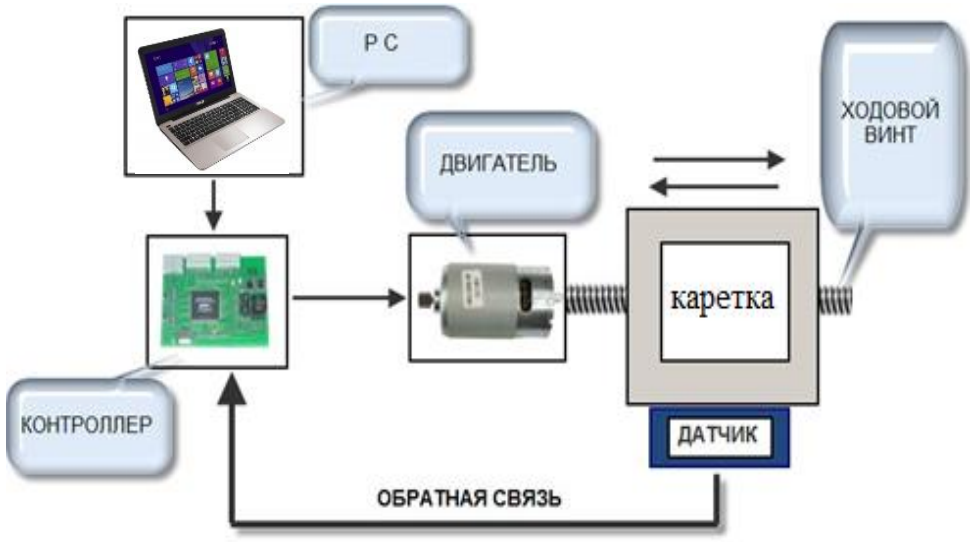


Рис. 1 Автоматическая система управления прибором для поверки ручного двухточечного инструмента

При применении автоматической системы управления измерительная каретка с помощью силового привода автоматически воспроизводит движение, заданное управляющим устройством в данном случае персональным компьютером. Сигнал управления вырабатывается контроллером, получающим информацию о требуемом положении измерительной каретки от PC и о ее действительном положении от датчика обратной связи.

Сигнал управления является разностным сигналом, характеризующим соответственно заданное и действительное перемещение измерительной каретки [4].

Преобразование электрических сигналов в перемещение каретки осуществляется приводом прибора, состоящим из приводного двигателя, передаточных механизмов и системы обратной связи. Привод является одним из основных элементов прибора, определяющим его производительность, точность, надежность.

В данном приборе рис.2 в качестве приводного двигателя используется шаговый двигатель со встроенным редуктором. При применении такого привода точность перемещения измерительной каретки будет определяться погрешностью отработки ШД командных импульсов, а также зазорами и упругими деформациями кинематической цепи от двигателя до измерительной каретки.

Рис. 2. Внешний вид прибора.

Применяемый в данной системе линейный датчик обратной связи обеспечивает непосредственное измерение перемещения измерительной каретки. Это позволяет охватить обратной связью все передаточные механизмы привода, что обеспечивает высокую точность перемещений.

Основной погрешностью прибора будет погрешность позиционирования [1]. Величину погрешности позиционирования **А** определяют методом статистической оценки рис.3. Погрешность позиционирования **А** складывается из погрешностей отдельных устройств, входящих в состав прибора:

Δэ – погрешность электронных блоков;

Δдв – погрешность двигателя;

Δк – кинематическая погрешность;

Δг – геометрическая погрешность;

Δизм – погрешность датчика линейных перемещений.

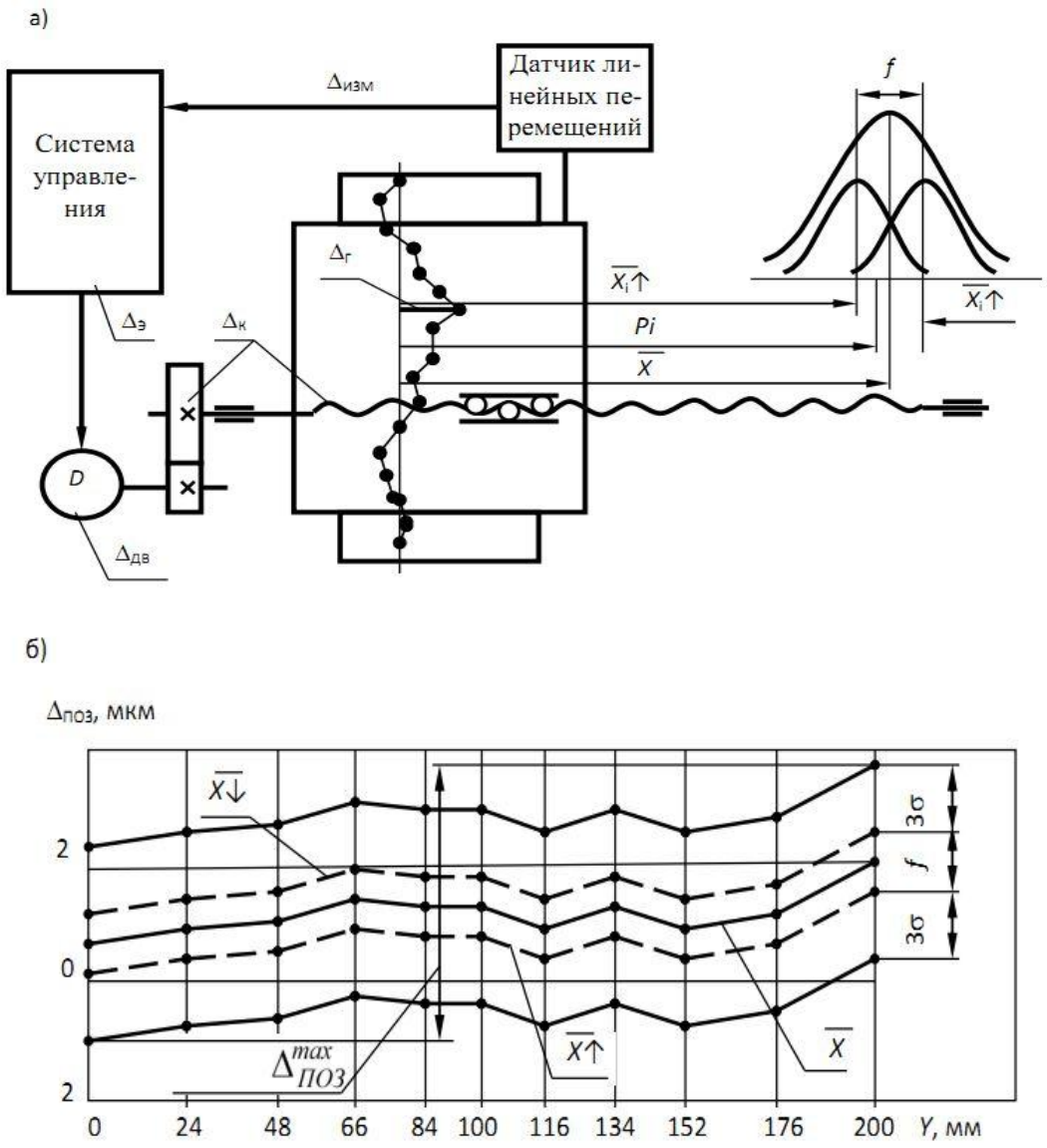


Рис. 3. Определение погрешности позиционирования прибора:
а) Схема формирования погрешности позиционирования; б) График погрешности при двустороннем позиционировании измерительной каретки прибора.

Для проведения экспериментальных исследований по определению точности позиционирования необходима специальная установка, состоящая из испытуемого прибора и эталонного средства измерения. В качестве эталонного средства измерения будем использовать лазер-интерферометр (излучатель и интерферометр), а также оптический отражатель и средства для установки и закрепления измерительной системы. Общая схема измерений приведена на рис. 4.

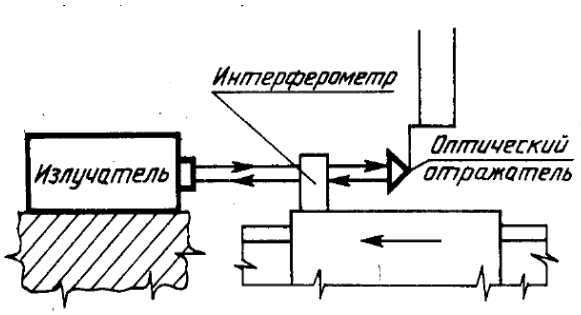


Рис.4. Схема измерения точности позиционирования.

В конструкции прибора используются материалы с различными коэффициентами линейного расширения. Различная температурная деформация отдельных частей прибора может повлиять на его точность. Поэтому необходимо провести исследования, чтобы оценить ее величину или убедится в отсутствии температурной погрешности.

Исследования, проведенные на опытном образце, показали, что применение системы обратной связи значительно повышают точность позиционирование измерительной каретки прибора. Как видно из графиков 1 и 2 рис. 5. погрешность позиционирования измерительной каретки при прямом и обратном ходе на максимальной длине 1000 мм при отключенном датчике обратной связи составляет более 100 мкм, а зона нечувствительности 14 мкм.

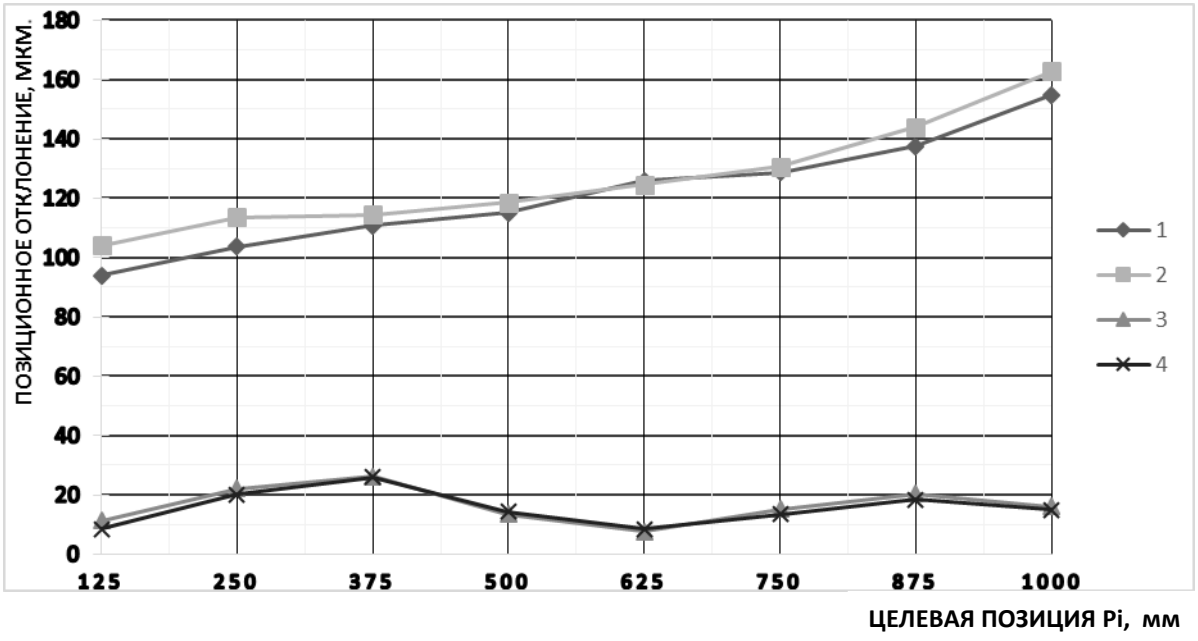


Рис. 5. Погрешность позиционирования прибора: 1 – max позиционное отклонение без ДОС; 2 – min позиционное отклонение без ДОС; 3 - max позиционное отклонение при использовании ДОС; 4 – min позиционное отклонение при использовании ДОС.

Такая величина погрешности недопустима для данного вида измерений. При подключении датчика обратной связи величина погрешности позиционирования при прямом и обратном ходе графики 3 и 4 рис. 5. уменьшилась в 4 раза, а зона нечувствительности в 3 раза. Это связано с тем, что датчик обратной связи охватывает ряд элементов привода вносивших существенную погрешность и компенсирует ее. Для еще большего повышения точности позиционирования необходимо разработать программу, позволяющую компенсировать погрешности линейного датчика обратной связи в точках, наиболее удаленных от требуемых. В данный момент это программное обеспечение находится в стадии разработки.

Выводы

- разработанная конструкция прибора и системы автоматического управления себя оправдала;
- точностные характеристики прибора приближаются к требуемым;
- для обеспечения заданной точности необходима разработка программного обеспечения, позволяющего частично или полностью компенсировать оставшиеся погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метрологическое обеспечение производства, Учебник / Любомудров С. А., Степанов С. Н., Тарасов С. Б — Санкт-Петербург, СПбПТУ, 2008
2. Методы и средства измерения в машиностроении Учеб. пособие / С.А. Любомудров, Т.А. Макарова, С.Б. Тарасов. — Санкт-Петербург, СПбГПУ. 2011
3. Тишков А.А., Степанов С.С. Повышение эффективности поверки ручного инструмента за счет применения нового эталонного прибора. Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. – 432 с.
4. Степанов С.С., Степанов С.Н. Применение системы автоматического управления в приборах для линейно-угловых измерений. Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. – 344 с.
5. Степанов С.С., Тарасов С.Б. Эталонный прибор для поверки 2х точечных средств измерений. Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт

металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – 366 с.
6. Современные технологии с использованием оборудование с ЧПУ / Четвериков И.А. — Издательство СПбГПУ, 2011
7. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система. /Ловыгин А. А., Теверовский Л. В. – М.: ДМК Пресс, 2012.
8. Глухов В.И. Расчет точности измерительных устройств. Учебное пособие. Новосибирск: НИСИ, 1977.
9. Марков Н.Н., Ганевский Г.Н. Конструкция и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов. М.: Машиностроение. 1993.
10. Координатно-измерительные машины, автоматы, приборы размерного контроля. М.: ЦНИТИ, 1992.
11. ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия. М.: Изд-во. ИПК издательство стандартов. 1990.

S.S. Stepanov, S.N. Stepanov

THE REFERENCE DEVICE WITH SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The questions connected from checking of the manual measuring tool and development of the reference device for these purposes are considered. The device design for checking of point-to-point manual tools and results of the first tests of the made model is presented.

Key words: Device, accuracy of measurements, manual tool, checking technique, positioning error.

REFERENCES

[1] Metrological assurance of production, the Textbook / A. Lyubomudrov, S., Stepanov S. N., Tarasov, S. B — St. Petersburg, SPbSPU, 2008
[2] Methods and means of measurement in engineering Studies. the grant / S. A. Lyubomudrov, T. A. Makarova, S. B. Tarasov. St. Petersburg, SPbSPU. 2011
[3] Tishkov A. A., Stepanov S. S. improving the efficiency calibration of hand tools through the use of the new reference device. Scientific forum with international participation "science Week SPbSPU": materials of scientific-practical conference. Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport of SPbSPU. Part 2. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University press, 2015. – 432 p.

[4] Stepanov S., Stepanov S. N. The use of automatic control systems in devices for linear and angular dimensions. Scientific forum with international participation "science Week SPbSPU": mother-Ala scientific-practical conference. Institute of metallurgy, mA-sinestrari and transport of SPbSPU. Part 1. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University press, 2015. – 344 p.
[5] Stepanov S. S., Tarasov S. B. Reference instrument for calibration of 2-Chechnya measuring instruments. Science week SPbSPU: proceedings of scientific-practical conference with international participation. Institute of metallurgy, mechanical engineering and transport of SPbSPU. Part 1. – SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University, 2014. – 366 p.
[6] Modern technology using CNC equipment / Chetverikov I. A. — Publishing house of SPbSPU, 2011
[7] Modern CNC and CAD/CAM system. /Lovigin A. A., Teverovsky V. L. – Moscow. DMK Press, 2012.
[8] Glukhov, V. I. Calculation of precision measuring devices. Training is the expedient. Novosibirsk: NISHI, 1977.
[9] Markov N. N., Kanevski G. N. Design and operation of the control and measuring instruments and devices. Moscow. Mashinostroenie. 1993.
[10] Coordinate measuring machine, machines, devices dimensional control. Moscow. CNITI, 1992.
[11] GOST 9038-90. Linear measures plane-parallel limit. Specifications. Moscow. Publishing house. IPK publishing house of standards. 1990.

СТАНКОСТРОЕНИЕ

УДК 669.14: 621.787+621.926.3; DOI 10.1872/MMF-2016-93

В.И. Болобов[1], В.С. Бочков[2], С.А. Чупин[3]

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

[1]Виктор Иванович Болобов, д.т.н., профессор
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)328-8271, E-mail: boloboff@mail.ru

[2]Владимир Сергеевич Бочков, к.т.н., ассистент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)328-8271, E-mail: bochkof@list.ru

[2]Станислав Александрович Чупин, ассистент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)328-8271, E-mail: staseg-88@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментов по изучению влияния механической и термомеханической упрочняющих обработок на износостойкость материалов зубьев ковшей экскаваторов и поворотных резцов при изнашивании образцов по различным горным породам. На примере стали 110Г13Л (стали Гадфильда) показано, что механическое упрочнение (наклеп) является эффективным средством повышения (до 10 раз) износостойкости деталей, контактирующих с абразивными средами, уступающими данной стали в состоянии наклепа по твердости. В случае же изнашивания по породам с твердостью, превышающей твердость стали, влияние наклепа практически не сказывается. Обнаружено, что высокотемпературная термомеханическая обработка стали 35ХГСА (сжатие-растяжение металла при 900 ^{0}C до достижения истинной деформации ~1,5, закалка в воде, отпуск при 230 ^{0}C) приводит к существенному повышению ее твердости (на 23 %) и износостойкости (на 38 %) при изнашивании образцов о песчаник ($\sigma_{сж}$=110 МПа, абразивность a=21 мг), как материал попутной породы, наиболее часто встречающийся при работе проходческих угольных комбайнов, по сравнению с типовой термической обработкой (изотермическая закалка с 900 - 950 ^{0}C и отпуск

при 230 °С), используемой при изготовлении резцов на заводах изготовителях. Сделано заключение о целесообразности применения того или иного вида упрочняющей обработки для повышения абразивной износостойкости материалов породоразрушающего инструмента в зависимости от твердости разрушаемой породы.

Ключевые слова: материалы рабочего инструмента, наклеп, термомеханическая обработка, горные породы, скорость изнашивания.

Введение

Известно, что механическая и термомеханическая упрочняющие обработки являются эффективным средством повышения прочностных и усталостных характеристик металлов и сплавов [1, 2]. В то же время влияние этих обработок на стойкость металлических конструкционных материалов к абразивному изнашиванию, являющемуся основной причиной выхода из строя породоразрушающего инструмета горных машин, изучено не достаточно. В настоящей работе представлены результаты экспериментов по влиянию механической упрочняющей (наклепа) и высокотемпературной термомеханической (ВТМО) обработок на абразивную износостойкость сталей 110Г13Л (стали Гадфильда) и 35ХГСА, как материалов, широко применяемых в горном машиностроении для изготовления породоразрушающего инструмета.

Принято считать [1, 3], что при чисто абразивном воздействии породы сталь 110Г13Л демонстрирует низкое сопротивление изнашиванию, в то время как в условиях больших удельных нагрузок и ударных воздействий, когда металл поверхностного слоя подвергается интенсивному наклепу, сталь приобретает исключительно высокую износостойкость. По этой причине до настоящего времени сталь 110Г13Л продолжает оставаться основным конструкционным материалом для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с высокими нагрузками и ударными воздействиями. Из нее делают крестовины и стрелки железнодорожных и трамвайных путей, траки гусеничных машин, зубья ковшей экскаваторов, футеровки шаровых мельниц, била и броню дробилок и др.

В то же время, как показывает практика, в ряде случаев конструкции из стали 110Г13Л демонстрируют в условиях эксплуатации явно недостаточную износостойкость, хотя и работают в условиях больших нагрузок и ударных воздействий. Так, при эксплуатации одних и тех же конструкций шаровых мельниц, срок службы их брони из стали Гадфильда при работе на известняке превышает 10 лет. В то время как на железной руде он не достигает и 2-х лет, хотя в обоих случаях броня подвергается воздействию примерно одних и тех же ударных нагрузок.

В работе [4] обнаружено, что предварительное упрочнение образцов за счет пластической деформации не приводит к повышению износостойкости стали 110Г13Л при ее абразивном изнашивании по

породам с твердостью минералов, превышающей твердость самой стали. В то же время, вопрос о влиянии наклепа на износостойкость стали Гадфильда при ее работе по более мягким породам не получил должного освещения в литературе.

Имеющиеся данные о влиянии термомеханической обработки на абразивную износостойкость металлических материалов весьма ограничены и сводятся, практически только к работам [5], проведенным на хромистых сталях. Авторы [5] выявили, что образцы сталей 45Х, 45Х3, 45Х5, подвергнутые ВТМО и низкому отпуску, имеет такую же ударную вязкость, что и образцы после обычной закалки и высокого отпуска, при этом износостойкость деформированных образцов оказалась выше на 60%.

Методика эксперимента

Эксперименты по изучению влияния наклепа проводились на цилиндрических образцах (D = 8 мм) стали 110Г13Л с глухим отверстием (d = 4 мм) по модифицированной авторами методике [6], на установке, собранной на основе вертикального сверлильного станка (рис. 1).

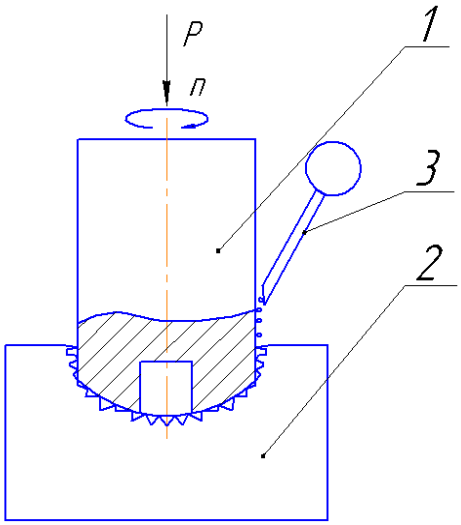


Рис. 1. Схема испытаний образцов на абразивный износ:
1 – вращающийся образец; 2 – пластина из абразивного материала; 3 - устройство подачи охлаждающей жидкости

В зажимах установки устанавливали пластину абразивного материала. В патроне шпинделя станка фиксировали испытуемый образец и прижимали к пластине под заданной нагрузкой (500 Н) в течение 10-90 с при частоте вращения шпинделя 685 об/мин. Образцы перед испытанием подвергали обычно принятой [7] для стали 110Г13Л термической обработке (закалке с 1100 ^{0}С в воде), в результате чего они получали исходную твердость ~ 170 *HB* (эквивалентную 4,5 по шкале Мооса). Для предотвращения разогрева и возможного изменения структуры стали, в процессе испытаний зону контакта образца с абразивом непрерывно смачивали водой.

В качестве абразивного материала использовали 3, различающиеся по твердости, породы. Две из них - гранит и габбро с агрегатной твердостью по Моосу 6-6,5 и 5-6, соответственно, превышали по твердости сталь Гадфильда, третья - мрамор по этому показателю ей уступала (2,5-5 по шкале Мооса). По результатам замера массы образцов до и после воздействия среды определяли потерю их массы Δm, которую относили к площади контакта образца с абразивом ($S \sim 50$ мм^2). Полученные экспериментальные точки зависимости $\Delta m/S = f(t)$ экстраполировали прямой линией, тангенс угла наклона которой принимали за скорость изнашивания V. Установленные значения V сопоставляли с величинами скорости V', полученными в сравнительных экспериментах на аналогичных наклепанных образцах. Для этого перед каждым испытанием по изнашиваемой поверхности образца наносили удар одинаковой интенсивности металлическим ударником, в результате чего твердость стали в поверхностном слое повышалась до 220 *HB*.

Эксперименты по изучению влияния ВТМО проводили на образцах (рис. 2) с диаметром рабочей (утонченной) части d из стали 30ХГСА, обладающей после типовой термической обработки (ТТО) резцов (изотермическая закалка с 900 - 950^{0}С, отпуск при 230°С) [8] недостаточной стойкостью к абразивному воздействию горных пород [9].

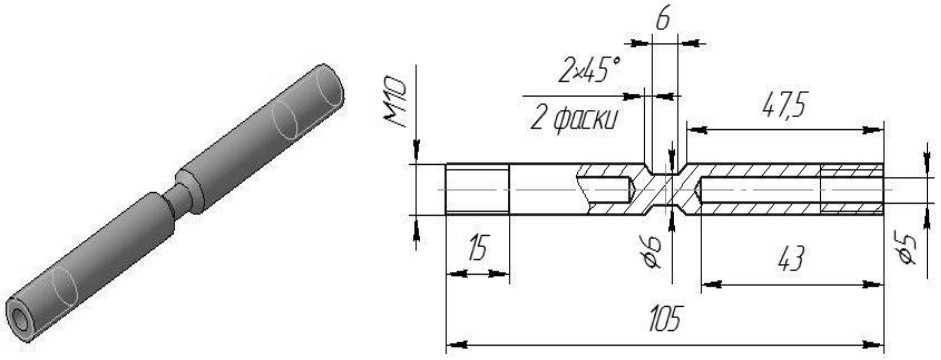


Рис. 2. Исходный образец для термомеханической обработки

Рабочую часть образцов стали подвергали циклической деформации сжатием-растяжением [10, 11] при 900 ºС с последующей закалкой в воде. Для каждого цикла сжатие-растяжение фиксировали изменение диаметра Δd рабочей части образца, по которому рассчитывали истинную деформацию металла $\varepsilon_{ИСТ} = 2 \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d_0 + \Delta d}\right)$, суммарная величина которой для всех циклов составляла ~ 1,5. Другую часть аналогичных образцов вида рис. 2 подвергали только типовой термической обработке - закалке с 900 ºС в воде без предварительного высокотемпературного деформирования.

Затем образцы обеих видов подвергали низкому отпуску (при 230°С) и разрезали поперек по центру их рабочей (деформированной) части.

Торцевую поверхность одной из полученных половинок образцов в виде шлифа использовали для определения величины зерна металла (микроскоп Leica DM ILM HC), другой – для измерения твердости *HV* (универсальный твердомер Zwick/Roell ZHU) и проведения экспериментов по изнашиванию на установке рис. 1. В качестве абразива 2 (рис. 1) использовали песчаник ($\sigma_{сж}$=110 МПа, абразивность a = 21 мг), как материал попутной породы, наиболее часто встречающейся при работе проходческих угольных комбайнов.

При постоянной статической нагрузке (500 Н) торцевую поверхность половинок образцов изнашивали при экспозициях t от 10 до 50 с. По результатам замера массы образца до и после воздействия породы определяли потерю массы металла Δm, из временной зависимости которой определяли скорость изнашивания V.

Результаты эксперимента

Результаты сравнительных испытаний по изучению влияния наклепа на износостойкость стали 110Г13Л представлены на рис. 3.

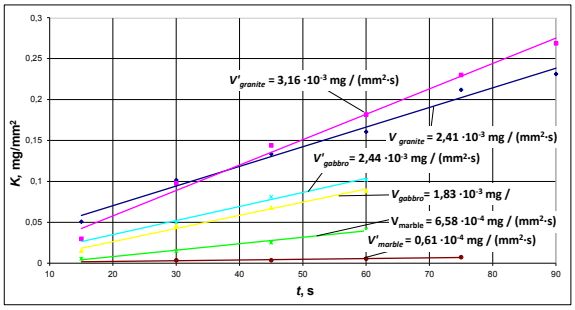
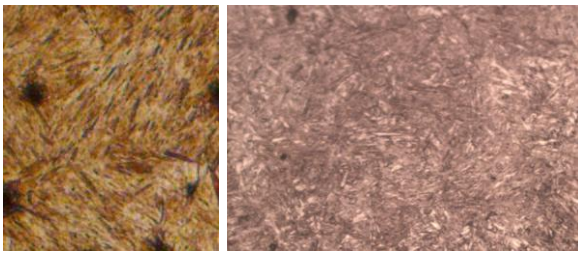


Рис. 3. Изменение относительной потери массы исходных (кривые *V*) и наклепанных (кривые *V`*) образцов из стали Гадфильда при их абразивном изнашивании по породам различной твердости

Как можно заключить из вида графика, влияние сопутствующего ударного воздействия (наклепа) на износостойкость стали Гадфильда сказывается по-разному в зависимости от твердости абразивной среды: если в случае пород (гранит, габбро), превышающих по твердости эту сталь в наклепанном состоянии, его влияние практически не заметно ($V' \approx V$), то в случае более мягкой породы (мрамор) - сказывается весьма существенно, уменьшая скорость изнашивания примерно в 10 раз.

Результаты металлографического анализа образцов стали 35ХГСА, подвергнутых ТТО и ВТМО иллюстрируют рис. 4.



а) *б)*

Рис. 4. Микроструктура стали 35ХГСА после типовой термической, Х100, (*а*) и термомеханической, Х500, (*б*) обработок

Видно (рис. 4, *а*, *б*), что основной структурной составляющей стали, как после термического, так и после термомеханического видов обработки является игольчатый мартенсит. В тоже время размер кристаллов (длина игл) этого соединения в зависимости от вида обработки существенно различается: если после ТТО он достигает 20 мкм (балл 9 по ГОСТ 8233-56), то после ВТМО – только 2 мкм (балл 2), т.е. сдвигается в субмикронную область. Полученный эффект измельчения зерна мартенсита объясняется измельчением зерна аустенита в результате пластической деформации при ВТМО и, как следствие, соответствующим уменьшением размеров кристаллов мартенсита, образующихся внутри зерен аустенита в процессе последующей закалки.

Как показали результаты измерения *HV*, указанное изменение в структуре стали находит свое отражение в изменении ее твердости: при переходе от термического к термомеханическому виду обработки твердость материала возрастает с 4340 до 5339 МПа, т.е. в 1,25 раза.

Результаты испытаний стали 35ХГСА на абразивное изнашивание иллюстрирует рис. 5.

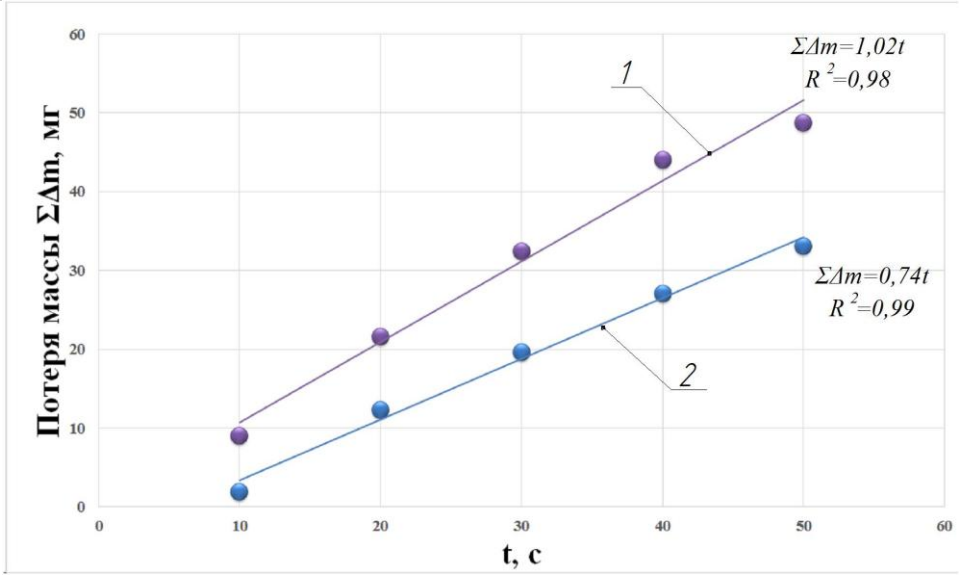


Рис. 5. Зависимость потери массы образцов от времени для процесса абразивного изнашивания образцов стали 35ХГСА после типовой термической (1) и термомеханической (2) обработок

Видно (рис. 5), что временные зависимости, соответствующие установившейся стадии процесса изнашивания, для всех образцов с достаточной степенью достоверности аппроксимируются прямыми вида $\Sigma\Delta m = Kt$ с коэффициентами пропорциональности K (скоростями изнашивания), отличающимися для каждого вида обработки материала: для образцов, подвергнутых ВТМО, скорость изнашивания (K = 0,74 мг/с) в 1,4 раза меньше, чем в случае термически обработанных образцов (K = 1,02 мг/с).

Таким образом, термомеханическая обработка стали 35ХГСА, как материала породоразрушающего инструмента, приводит к увеличению ее твердости (в 1,25 раза) и износостойкости (в 1,4 раза) при работе по типичным разрушаемым породам по сравнению со сталью, подвергнутой термической обработке.

На основании полученных результатов, с учетом выводов [12], можно сделать следующее заключение о целесообразности применения того или иного метода упрочняющей обработки для повышения абразивной износостойкости материалов породоразрушающего инструмента и другого горного оборудования.

В случае абразивного воздействия сравнительно мягкой породы с твердостью $H_П$, меньшей или незначительно превышающей твердость $H_С$ использованной в оборудовании стали в наклепанном состоянии ($H_П / H_С \leq$ 1,3 [12]), упрочняющую механическую обработку изнашиваемых деталей использовать целесообразно. Например, при работе зубьев из стали Гадфильда ковшей экскаваторов по известняку (HV = 1350 – 1800 МПа). При вдавливании в деталь зерна такой породы не способны царапать металл, но оказывая многократную упругую деформацию, приводят к усталостному разрушению поверхностного слоя детали. В результате износ носит не абразивный, а усталостный характер и наклеп, как показывают представленные выше результаты экспериментов (кривые V' и V рис. 2 для мрамора), является эффективным способом повышения износостойкости изнашиваемых деталей.

При работе по твердым породам ($H_П$ / $H_С$ > 1,3), когда зерна оказывают режущее действие на металл, операцию механического упрочнения деталей проводить не целесообразно (кривые V' и V рис. 2 для гранита и габбро). Как показано в [13, 14], при микрорезании металла твердыми абразивными частицами материал дна и наплывов борозд подвергается наклепу, интенсивность которого превышает уровень, который может быть достигнут при любом пластическом деформировании образца. Поэтому осуществление предварительного наклепа деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания по твердой породе, не может способствовать повышению износостойкости их материала.

В случае же термомеханической обработки ее проведение следует считать целесообразным для повышения износостойкости деталей вне зависимости от твердости, контактирующей с ними породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение/Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. М.: Машиностроение, 1990. – 407 с.
2. William D. Callister. Materials Science and Engineering. USA. Willey. 2014. – 939 p.
3. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учебное пособие / Елагина О. Ю. – Москва: Логос, 2009. – 488.
4. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы : (к 120-летию со дня рождения) / М.М. Хрущов – М.: Красанд, 2012. – 500 с.
5. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. Т. 1-2. – 1172 с.
6. Болобов В. И. О износостойкости стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.С. Бочков, Сюй Цинянь // Записки горного института. Т. 209. 2014. С. 17-22.
7. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. / Н.Г. Давыдов. – М.: «Металлургия», 1979. – 176 с.
8. Крапивин М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И Сысоев // М.: Недра, 1990. – 256 с.
9. Болобов В. И. Причина быстрого износа тангенциальных резцов / В.И. Болобов, В.С. Бочков, В.В. Бобров, М.П. Талеров // Записки горного института. Т. 195. 2012. С. 238 - 240
10. Колбасников Н. Г. Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали / Н. Г. Колбасников, О.Г. Зотов, В.В. Дураничев, А.А. Наумов, В.В. Мишин, Д.А. Рингинен // Санкт-Петербург. Металлообработка. 2009. №4 (52). с. 25-31.
11. A.A. Naumov, Y.A. Bezobrazov, N.G. Kolbasnikov and E.V. Chernikov. Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing, Materials Science Forum. Vols. 762 (2013), p. 62-69.
12. Хрущов М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Износостойкость. М.: изд-во «Наука», 1975. – 192 с.
13. Львов П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. – М.: Машгиз, 1962. – 89 с.
14. Хрущов М.М. Исследования изнашивания металлов. /М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. М.: изд-во АН СССР, 1960. – 352 с.

V.I. Bolobov, V.S. Bochkov, S.A. Chupin

THE POSSIBILITY OF INCREASING WEAR RESISTANCE OF ROCK CUTTING TOOL BY MECHANICAL AND THERMOMECHANICAL HARDENING TREATMENT

all: National Mineral Resources University (Mining University), Russia

Abstract

The results of experiments on the effect of mechanical and hydro-mechanical hardening treatments on the wear of the teeth materials bucket excavators and rotary cutters with different wear patterns on the rocks. For example 110G13L steel (Hadfield steel) it is shown that the mechanical reinforcement (hardening) is an effective means of increasing (up to 10 times), wear resistance of parts coming into contact with abrasive media, inferior to the steel in a state of hardening hardness. In the case of wear on rocks with a hardness greater than the hardness of steel, the effect of work hardening has practically no effect. It has been found that the high temperature thermomechanical processing 35HGSA steel (metal compression-tension at 900 °C until the true strain of 1.5 ~, water quenching, tempering at 230 0C) leads to a substantial increase of its hardness (23%) and abrasion resistance (38 %) for the wear patterns on the sandstone ($\sigma_{compression}$ = 110 MPa, the abrasiveness of a = 21 mg) as a passing rock material, the most common during the sinking of coal combines, in comparison with the standard heat treatment (isothermal hardening from 900 - 950 ^{0}C and tempering at 230 °C) used in the manufacture of cutting tools for the manufacturing plants. The conclusion about the appropriateness of a particular type of hardening treatment to improve the abrasive wear resistance of materials rock-breaking tool, depending on the hardness of the rock.

Key words: material working tools, hardening, thermomechanical treatment, rocks, wear rate.

REFERENCES

[1] Lahtin Y.M. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov (Metallurgy and heat treatment of metals). Moscow: Metallurgija, 1976. 407 p.

[2] William D. Callister. Materials Science and Engineering. USA. Willey. 2014. 939 p.

[3] Elagina O.Ju. Tehnologicheskie metody povyshenija iznosostojkosti detalej mashin (Technological methods of improving the wear resistance of machine parts) / Elagina O. Ju. – Moscow: Logos, 2009. 488 p.

[4] Hrushhov M.M. Trenie, iznos i mikrotverdost' materialov: izbrannye raboty: (k 120-letiju so dnja rozhdenija) (Friction, wear and micro-hardness materials: selected works (to the 120th anniversary of the birth) / M.M. Hrushhov. Moscow: Krasand, 2012. 500 p.
[5] Bernshtejn M.L. Termomehanicheskaja obrabotka metallov i splavov (Thermomechanical treatment of metals and alloys) / M.L. Bernshtejn. – Moscow: Metallurgija, 1968. Vol. 1-2. 1172 p.
[6] Bolobov V.I., Batalov A.P., Bochkov V.S., Xu Qingyan O iznosostojkosti stali 110G13L v razlichnyh abrazivnyh sredah (About wear resistance of steel 110G13L in a variety of abrasive media). Zapiski gornogo instituta. Vol. 209, 2014, pp. 17-22.
[7] Davydov N.G. Vysokomargancevaja stal' (Manganese steels). Moscow: Metallurgija, 1979. 176 p.
[8] Krapivin M.G., Rakov I.Ja., Sysoev N.I. Gornye instrumenty (Mining tools) Moscow. Nedra, 1990.
[9] Bolobov V.I., Bochkov V.S., Bobrov V.V., Talerov M.P. Prichina bystrogo iznosa tangencial'nyh rezcov (The cause rapid wear of tangential cutters). Zapiski gornogo instituta. Vol. 195. 2012, pp. 238 - 240
[10] Kolbasnikov N.G., Zotov O.G., Duranichev V.V., Naumov A.A., Mishin V.V., Ringinen D.A. Vlijanie bol'shih deformacij v gorjachem sostojanii na strukturu i svojstva nizkouglerodistoj stali (Influence large deformation in the hot condition on the structure and properties of low-carbon steel). St.Petersburg. Metalloobrabotka. 2009, №4 (52), pp. 25-31.
[11] Naumov A.A., Bezobrazov Y.A., Kolbasnikov N.G., Chernikov E.V. Novel Physical Simulation Technique Development for Multistage Metal Plastic Deformation Processing, Materials Science Forum. Vols. 762 (2013), pp. 62-69.
[12] Hrushhov M.M. Zakonomernosti abrazivnogo iznashivanija (The regularities abrasive wear). Iznosostojkost'. Moscow: publishing «Nauka», 1975. 192 p.
[13] L'vov P.N. Iznosostojkost' detalej stroitel'nyh i dorozhnyh mashin (Wear resistance parts of building and road machines). Moscow: Mashgiz, 1962, 89 p.
[14] Khrushchev M.M., Babichev M.A. Issledovanija iznashivanija metallov (Researches of wear metals). Moscow: publishing House of AN SSSR, 1960, 352 p.

УДК 621.822.5.001.5; DOI 10.1872/MMF-2016-94

М.С. Бундур[1], Н.А. Пелевин[2], В.А. Прокопенко[3]

ДИНАМИКА ШПИНДЕЛЬНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИВЕДЕННОЙ МАССЫ

[1]Михаил Семенович Бундур, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

[2]Никита Александрович Пелевин, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: twic@inbox.ru

[3]Вячеслав Алексеевич Прокопенко, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

Аннотация

Обработка заготовок крупных размеров на расточных станках осуществляется с использованием возможностей выдвижного шпинделя, при этом для различных вылетов меняется нагрузка на переднюю несущую опору подшипника, жесткость и динамические показатели которой определяют качество обрабатываемой поверхности.

В работе рассмотрены вопросы влияния изменяемой приведенной массы шпинделя расточного станка на показатели динамического качества. Приведен алгоритм программы ее расчета в зависимости от применяемых оправок и выдвигаемой части шпинделя. Представлен циклический алгоритм программы определения динамических параметров системы автоматического регулирования в зависимости от величины варьируемой приведенной массы. Получены номограммы для определения запаса устойчивости по фазе при различных вылетах шпинделя и массах оправок для корректированного *RC*-цепью и некорректированного вариантов системы управления несущих опор. Даны соответствующие выводы и рекомендации.

Ключевые слова: станок, гидростатический подшипник, система управления, приведенная масса, динамическое качество, коррекция, энергетические параметры, запас по фазе.

Динамические характеристики гидростатических подшипников (ГСП) являются основой повышения общей виброустойчивости металлорежущих станков (МРС), качества обработки и ее производительности [1]. Для расточных МРС, конструкция которых позволяет выдвигать шпиндель при обработке и применять различные оправки (фрезерные, расточные и т.д.), необходимо проведение исследований динамики работы их шпиндельного узла (ШУ), при этом важное место занимает учет влияния приведенной массы шпинделя ($M_{пр}$) на показатели динамического качества [2] системы автоматического регулирования (САР) ГСП, такие как запас устойчивости по фазе ($\Delta\varphi$), частот среза ($\omega_{ср}$) и собственных колебаний (ω) САР (по переходным процессам) [3]. В качестве исследуемого станка рассмотрен гибкий расточной модуль модели ЛР400ПМФ-4 с диаметром выдвижного шпинделя 125 мм, имеющий ГСП с дроссельной системой управления (СУ) опорами [4].

Определение $M_{пр}$ с учетом величины выдвижения ($L_к$) шпинделя производятся в соответствии с методикой [5] по расчетной схеме, приведенной на рис. 1, на которой обозначены:

$M_ш$ – масса шпинделя между задней и передней опорами ($M_ш$=19 кг);

$M'_ш$ – масса части шпинделя между передней опорой ШУ и торцом шпиндельной бабки ($M'_ш$=6 кг);

$M_к$ – масса консольной части шпинделя выдвигаемой из шпиндельной бабки;

$M_{оп}$ – масса оправки;

l_1, l_2, l_3, l_4 – соответственно расстояния от задней опоры ШУ до центра масс частей шпинделя и оправки;

l_0=2·l_1 – расстояние между опорами (l_0=440 мм).

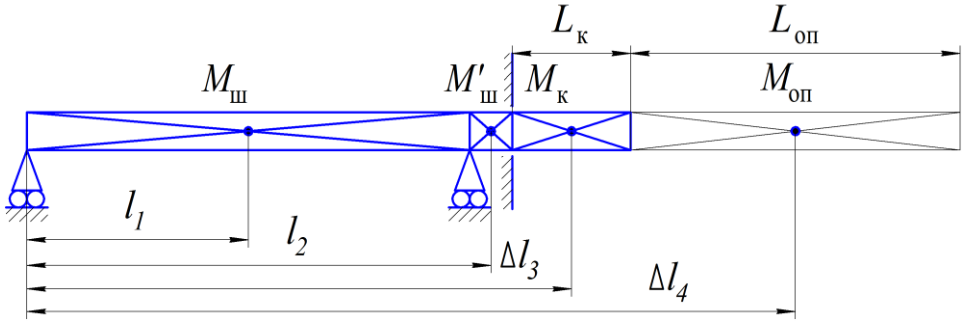


Рис. 1. Расчетная схема определения $M_{пр}$

Расчет $M_{пр}$ двухопорной схемы шпинделя при отмеченных центрах масс производится по следующей зависимости:

$$M_{пр} = M_ш \cdot \left(\frac{l_1}{l_0}\right)^2 + M'_ш \cdot \left(\frac{l_2}{l_0}\right)^2 + M_к \cdot \left(\frac{l_3}{l_0}\right)^2 + M_{оп} \cdot \left(\frac{l_4}{l_0}\right)^2$$

Для автоматизированного расчета $M_{пр}$ используется алгоритм (рис. 2), на основе которого в пакете MATLAB [6] реализована соответствующая программа ***p_Mpr***. Структура алгоритма включает цикл расчета $M_{пр}$ для каждой величины $L_к$, которая изменяется с заданным его шагом.

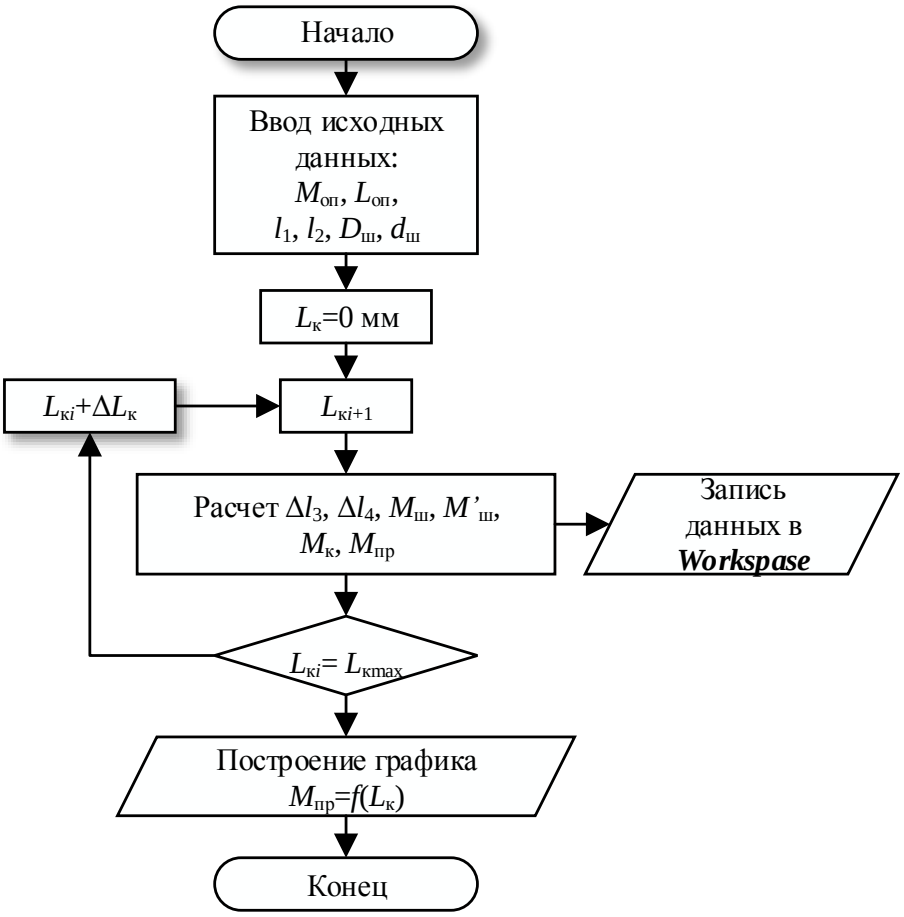


Рис. 2. Алгоритм программы определения $M_{пр}$

При исполнении программы для исследуемого станка согласно назначенной паспортной массе оправки по приведенной формуле рассчитываются значения $M_{пр}$ и строится соответствующая кривая $M_{пр}=f(L_к)$ (рис. 3) в рабочем диапазоне выдвижений ($L_к$=0…710 мм, рис. 1).

Применение МРС аналогичного типоразмера допускает возможность использования оправок до $M_{оп}$=30 *кг*, которые определяют величину $M_{пр}$ ШУ для ГСП. Расчет выполнен для оправок с условными массами в диапазоне от 0 до 30 *кг*, их шаг принят 5 *кг*. Значение $M_{пр}$ шпинделя без оправки при положении шпинделя $L_к$=0 мм составляет 15 *кг*, а с оправкой наибольшей массы – 125 *кг*. Из анализа полученных зависимостей следует, что полный диапазон изменения $M_{пр}$ для МРС ЛР400ПМФ-4 составляет 15…530 *кг*.

Как установлено ранее [7], для различных СУ ГСП без использования коррекции САР имеет низкое динамическое качество [2]. Кроме того, на его показатели оказывает влияние приведенная масса. Для дроссельной СУ при $M_{оп}$=30 *кг* при начальном положении шпинделя ($L_к$=0 мм, $M_{пр}$=130 *кг*) на максимальной частоте вращения n_{max}=4000 об/мин ГСП не работоспособен, т.к. $\Delta\varphi<0°$. При введении *RC*-коррекции с параметрами гидравлической емкости $C_A=21\cdot10^{-14}$ м^3/Па (Сильфон 18х10х25 – 36НХТЮ

ГОСТ 21482-76 [8]) и гидравлического сопротивления R_A=9·10^9 Па·с/м^3 у модернизированного варианта МРС на n_{max} динамическое качество САР повышается и процесс резания возможно совершать до $M_{пр}$=350 *кг* ($\Delta\varphi$>5°) [9].

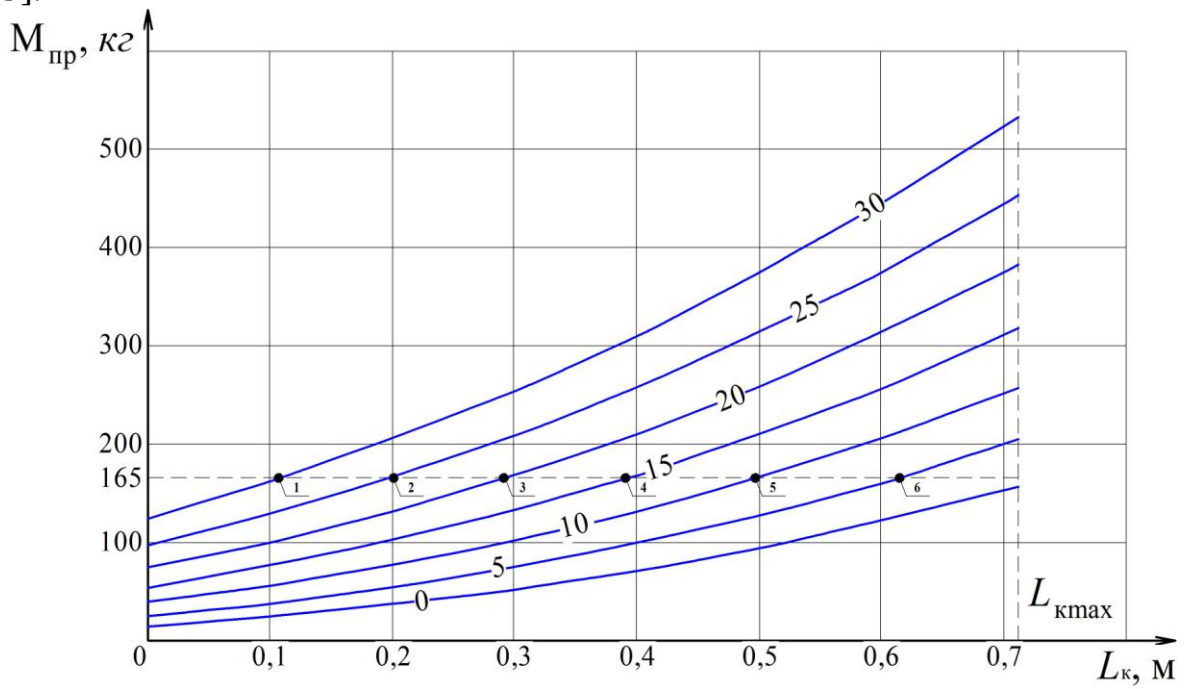


Рис. 3. График зависимости $M_{пр}=f(L_к)$ при оправках разной массы

Принимая во внимание вышесказанное, требуется проводить более глубокий анализ влияния $M_{пр}$ на динамику САР ГСП с учетом энергетических процессов [10].

В пакете MATLAB реализована программа для определения показателей динамического качества $\Delta\varphi$ и $\omega_{ср}$ в зависимости от $M_{пр}$. Перед запуском программы необходимо ввести исходные параметры ГСП МРС в основную программу ввода данных из библиотеки ***HSB*** [10] и исполнить ее. Все параметры записываются в рабочее пространство MATLAB – ***Workspace*** [11].

Программа выполняется по циклическому [12] алгоритму, который представлен на рис. 4. Первоначально вызывается внешняя вспомогательная программа ***sp_SC*** (подпрограмма из библиотеки ***HSB*** [13]). Затем в зависимости от подставляемой величины $M_{пр}$ при помощи обращения к программе ***p_LH*** из упомянутой библиотеки рассчитываются параметры САР: $\Delta\varphi$ и $\omega_{ср}$.

Без учета энергетических процессов (при n=0 об/мин) по окончании всех расчетов на экран монитора выводятся зависимости $\Delta\varphi=f(M_{пр})$ и $\omega_{ср}=f(M_{пр})$ (рис. 5) для исследуемого варианта СУ [14] и определенных условий и режимов работы ШУ. На рис. 5 слева находится ось ординат, соответствующая $\Delta\varphi$, а справа – $\omega_{ср}$. В случае необходимости получения аналогичных зависимостей для максимальной частоты вращения шпинделя

(n_{max}) следует после исполнения упомянутой основной программы (которая требует ввода величины n_{max}) дополнительно выполнить программу ***p_En*** [10].

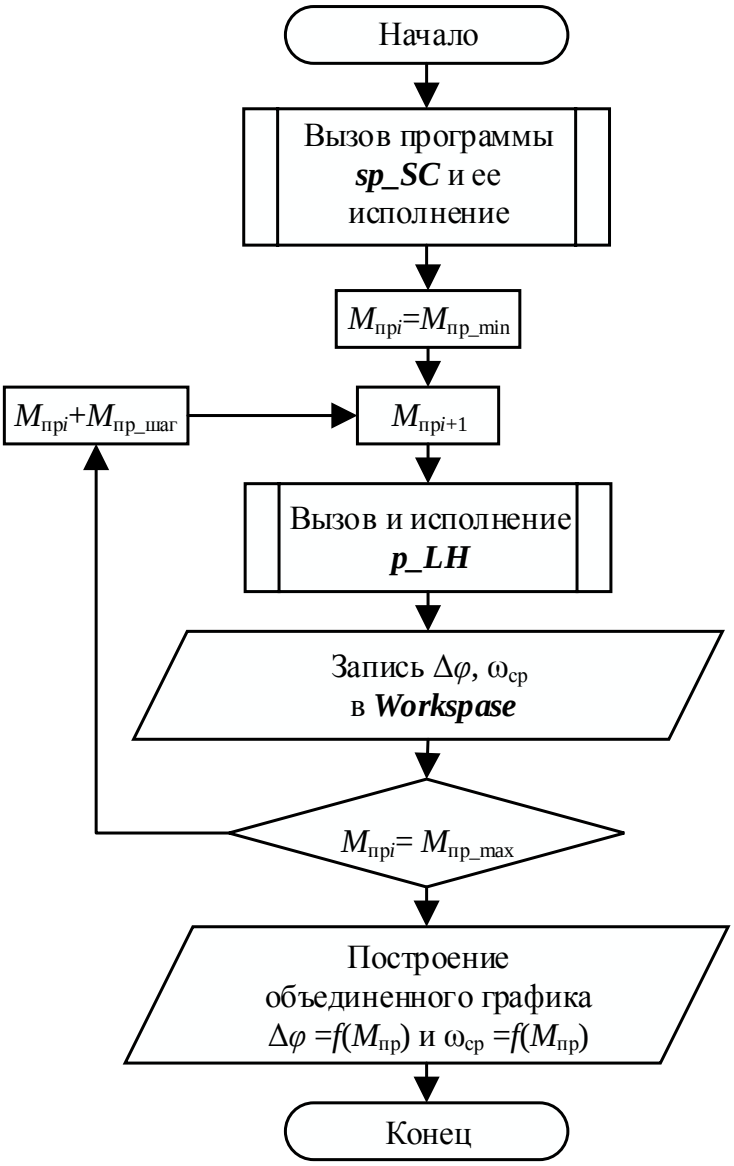


Рис. 4. Алгоритм программы

Из полученного графика можно для ГСП МРС определять значения $\Delta\varphi$ и $\omega_{ср}$ по величине $M_{пр}$, найденной, например, из зависимости $M_{пр}=f(L_к)$ (рис. 3). В свою очередь, по $\Delta\varphi$ и $\omega_{ср}$ устанавливается динамическое качество САР [2], а также оценивается виброустойчивость ГСП. Для исходного некорректированного ГСП модуля ЛР400ПМФ-4 САР попадает в область неустойчивости при $M_{пр}\geq 165$ *кг*, т.к. $\Delta\varphi<0°$ (рис. 5) и процесс резания практически невозможен. На рис. 3 показаны соответствующие точки комбинаций вылета и масс оправок для $M_{пр}=165$ *кг*. При этом без оправки и на паспортном вылете $L_к=710$ мм САР ГСП по динамическим показателям находится на границе области устойчивости.

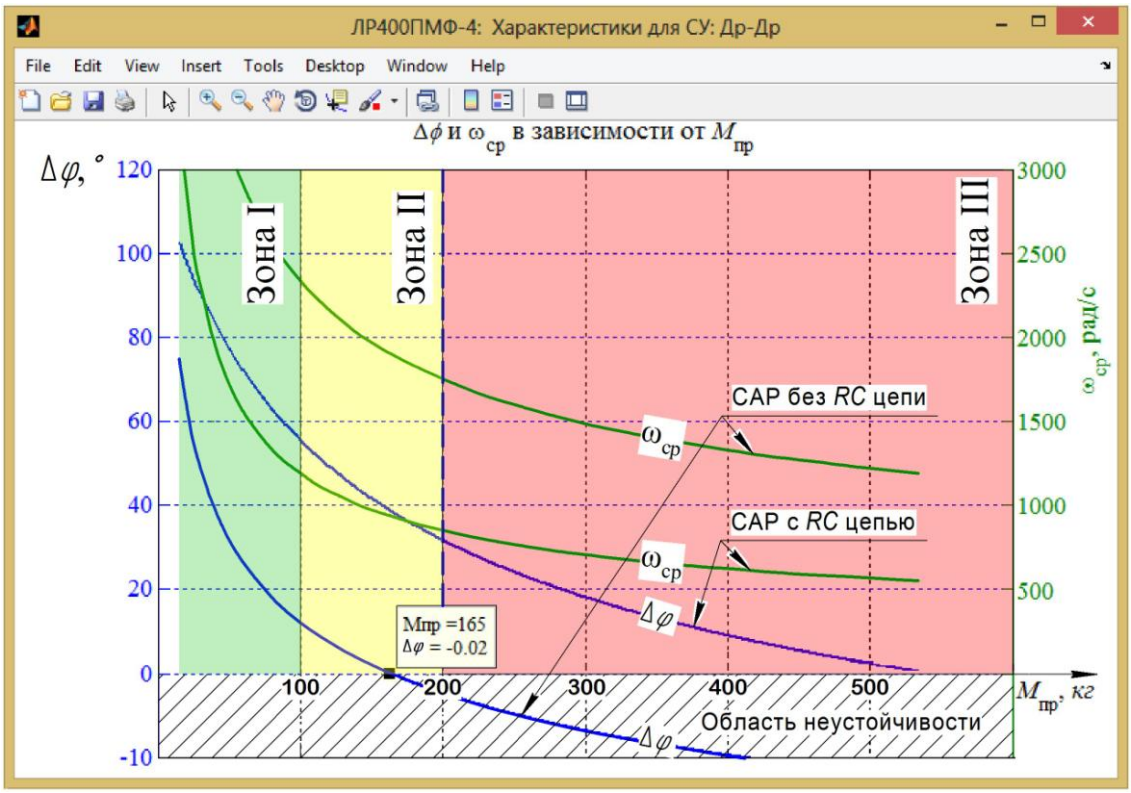


Рис. 5. Окно с зависимостями $\Delta\varphi=f(M_{пр})$ и $\omega_{ср}=f(M_{пр})$ для исходного варианта САР ГСП при n=0 об/мин

В диапазоне 15 *кг*<$M_{пр}$<165 *кг* динамическое качество ГСП низкое ($\Delta\varphi$<30°), но значения его собственной частоты, определяемой, например, по переходным процессам [3] превышают ω=400 Гц, что близко к нормативам виброустойчивости [15]. При этом требуется проверка по частоте возмущающей силы резания (например, при наибольших частотах вращения шпинделя и использовании многолезвийного инструмента). В случае введения упомянутой *RC*-коррекции потери устойчивости САР не происходит. Однако весь диапазон $M_{пр}$ при этом можно разделить на три зоны (рис. 5).

В зоне I при 15 *кг*<$M_{пр}$<100 *кг* динамическое качество ГСП высокое и никакие проблемы обработки не возникают, за исключением тонкого фрезерования торцевой поверхности [16].

В зоне II при 100 *кг*<$M_{пр}$<200 *кг* ГСП обладает невысоким динамическим качеством, значения собственной частоты лежат в диапазоне 130 Гц<ω<190 Гц. При этом следует проводить проверку назначаемых режимов резания с точки зрения возможного резонанса по совпадению вынужденных и собственных частот колебаний [9].

В зоне III ($M_{пр}$>200 *кг*) динамическое качество САР такое же, как у ГСП без коррекции. Однако собственные частоты в несколько раз ниже и составляют ω<130 Гц, что не удовлетворяет нормативам виброустойчивости [15]. Поэтому необходимо при разработке техпроцесса

также тщательно проверять соотношение частот с возмущающей силой резания.

Применительно к расточным станкам с выдвижным шпинделем (аналогичным рассматриваемому модулю ЛР400ПМФ-4) для подробного анализа динамики ГСП, возможностей и условий обработки удобно производить построение номограмм, позволяющих только по двум технологическим параметрам - величине $L_к$ и весу оправки $M_{оп}$ – не только определять значения $\Delta\varphi$ и $\omega_{ср}$, не прибегая к использованию компьютерных средств, но и $M_{пр}$, ω, а также производить общую оценку динамического качества. На основе рис. 3, 5 с учетом энергетических процессов в ГСП [10] построена номограмма I (рис. 6) для МРС ЛР400ПМФ-4, включающая с себя кривые $M_{пр}=f(M_{оп})$, $\Delta\varphi=f(M_{пр})$. Согласно номограмме I, например, для корректированного ГСП при оправке $M_{оп}$=11 *кг* и $L_к$=300 мм соответствующие значения составляют: $M_{пр}$=108 *кг*, $\Delta\varphi$=53°.

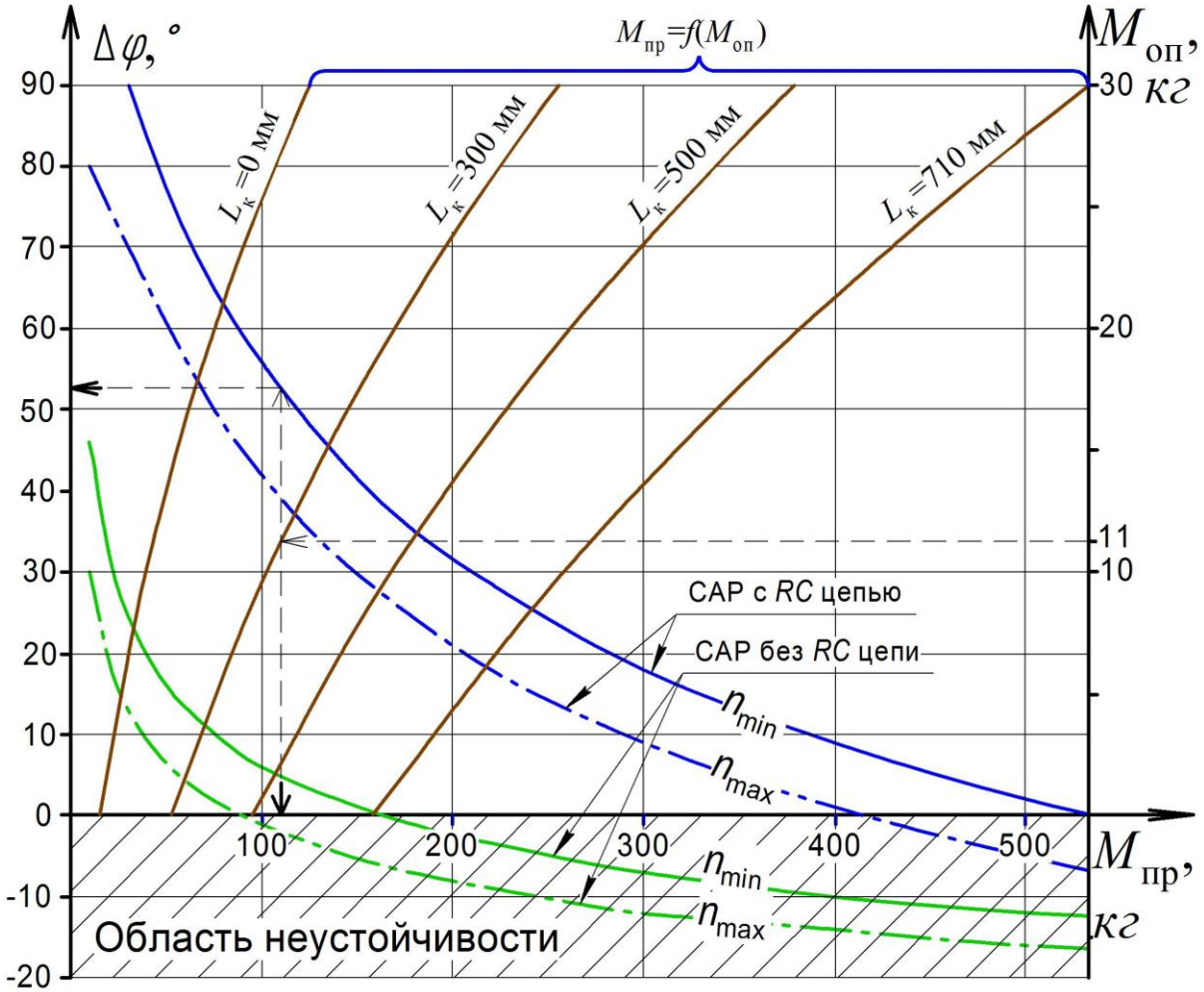


Рис. 6. Номограмма I для определения $M_{пр}$, $\Delta\varphi$, при различных вылетах шпинделя и массах оправок станка ЛР400ПМФ-4
(ключ номограммы: $M_{оп} – L_к – M_{пр} – \Delta\varphi$)

Для определения $\omega_{ср}$ аналогичным способом построена номограмма II (рис. 7) $\omega_{ср} = f(M_{пр})$, на которой ось частот – совмещенная и включает в себя диапазон собственных частот системы ω (слева) и диапазон частот среза $\omega_{ср}$. При этом для указанных $M_{оп}$ и $L_к$ значения $\omega_{ср}$=1140 рад/с и ω=187 Гц.

Определение значений параметров $\Delta\varphi$ и ω имеет большое значение при назначении тех или иных режимов. По первому параметру следует судить о динамическом качестве [2] САР ГСП. При наличии колебательности ухудшается качество обрабатываемой поверхности в процессе резания. По второму параметру можно оценивать частоту собственных колебаний системы ГСП для того, чтобы исключить такие режимы и операции резания, при которых возможно возникновение резонансных колебаний.

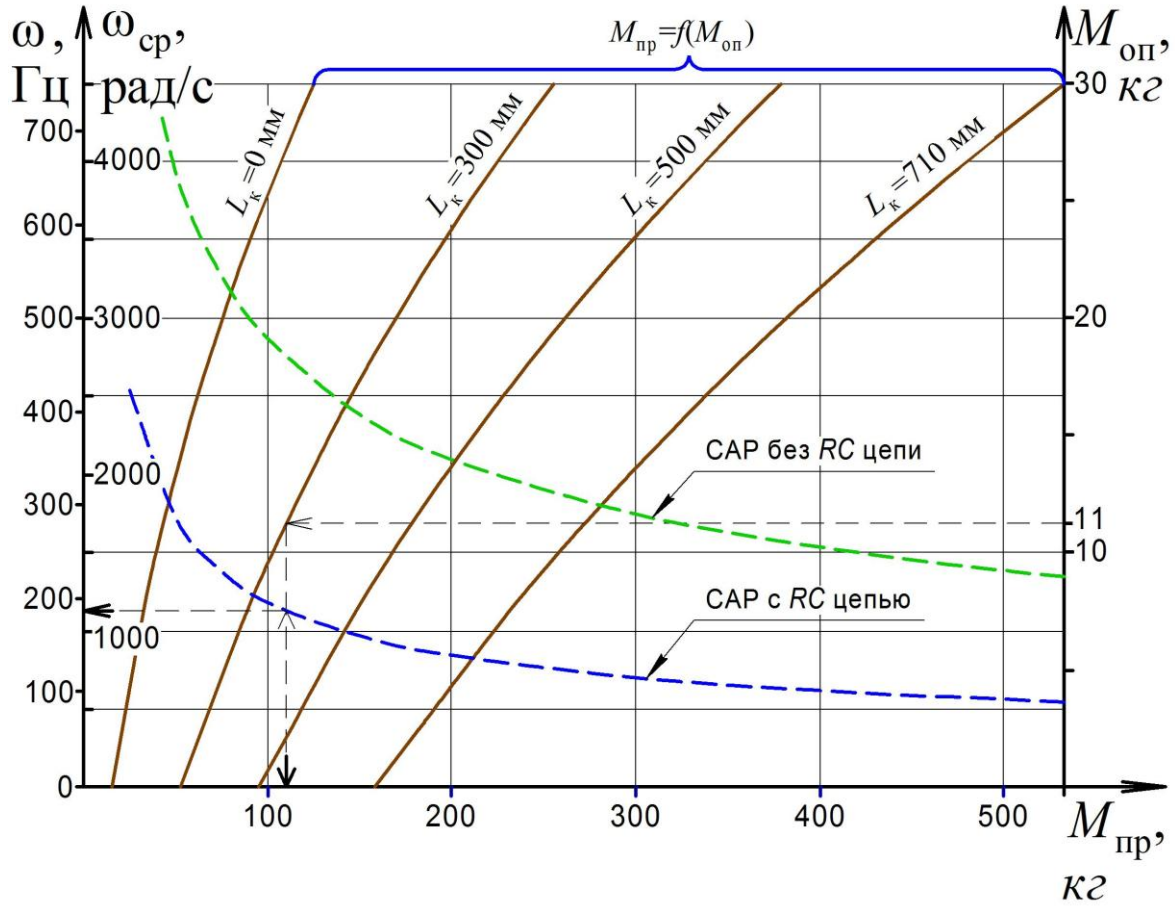


Рис. 7. Номограмма II для определения $M_{пр}$, $\omega_{ср}$ и ω при различных вылетах шпинделя и массах оправок станка ЛР400ПМФ-4
(ключ номограммы: $M_{оп}$–$L_к$–$M_{пр}$ – $\omega_{ср}$– ω)

Таким образом, максимальная степень реализации возможностей ГСП для каждого станка, имеющего ГСП или подлежащего модернизации, требует подготовки соответствующих описанных выше номограмм. С их помощью должны при разработке техпроцесса обработки каждой детали устанавливаться и назначаться режимы либо в областях высокого динамического качества САР ГСП, либо исключающие близость

соответствующих собственных частот ГСП с частотами вынуждающих колебаний, обусловленных условиями резания.

Особое значение выполнение аналогичных проверок имеет в случаях исполнения ШУ на опорах качения, обладающих более низкой виброустойчивостью.

Предложенная методика учета приведенной массы шпинделя с применением номограмм существенно упрощает оценку параметров виброустойчивости МРС в практике эксплуатации станочного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Повышение виброустойчивости процесса резания путем улучшения динамических характеристик шпиндельных гидростатических подшипников // Металлообработка, № 1(49), 2009. С. 10-15.
2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М: Машиностроение, 1983. 608 с.
3. Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Моделирование динамических процессов прецизионных шпиндельных опор металлорежущего оборудования в программном пакете MATLAB // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Лучшие доклады –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 53-56.
4. Прокопенко В.А. Гидростатические подшипники для станков // РИТМ Машиностроения, № 3, 2016. С. 10-11.
5. Иовлев Ю.А., Троцкая З.В. Крутильные и изгибные колебания элементов машин: Учебное пособие. Л: ЛПИ, 1985. 76 с.
6. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Совершенствование расчетно-вычислительной базы для повышения уровня подготовки специалистов-станкостроителей // Материалы 3-й Международной научно практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование».–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 896 - 904.
7. Бундур М. С., Прокопенко В. А., Чернов И. А. Сравнительные исследования динамического качества при выборе системы управления шпиндельных гидростатических подшипников // Теория механизмов и машин, № 2(14), 2009. С. 19-27.
8. Государственный стандарт союза СССР ГОСТ 21482-76 Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по стандартам. 1976.
9. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Динамика высокоскоростных шпиндельных узлов тяжелого станочного оборудования // Научн-технические ведомости СПБГПУ, Т. 238, № 1, 2016. С. 145-154.

10. Пелевин Н.А. Компьютерное моделирование энергетических процессов в шпиндельных гидростатических подшипниках // КОМОД 2015: труды международной научно-технической конференции. 1-3 июля 2015 года, 2015. С. 74-82.
11. Brian D. Hahn, Daniel T. Valentine. Essential MATLAB® for Engineers and Scientists. Third edition ed. Oxford: Elsevier, 2007. 449 pp.
12. Колдаев В.Д. Основы алгоритмизации и программирования: Учебное пособие / Под ред. проф. Л. Г. Гагариной. М: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2006. 416 с.
13. Пелевин Н.А., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Графо-аналитический метод выбора параметров коррекции гидростатических подшипников с помощью среды MATLAB // Теория механизмов и машин, № 2, 2015. С. 13-22.
14. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Возможности и особенности пакета MATLAB Simulink при моделировании систем управления гидростатическими несущими узлами // Материалы 4-й Международной научно практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2014. С. 815 - 825.
15. Пуш В.Э. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных втузов. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
16. Прокопенко В.А., Чернов И.А. Исследование технологических режимов обработки для определения требуемых технических характеристик станков // Materials of the XI international scientific and practical conference « Prospects of world science – 2015» July 30 – August 7, Vol. 10, Sheffield, 2015. pp. 64-66.

M.S.Bundur, N. A.Pelevin, V.A.Prokopenko

THE DYNAMIC OF SPINDLE HYDROSTATIC BEARING TAKING INTO ACCOUNT CHANGE OF THE EQUIVALENT MASS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Treatment of workpieces of the large sizes on boring machines is carried out with use of opportunities of a moving-out spindle. At the same time loading which affects a forward bearing of a spindle changes for various departures of a spindle. Stiffness and dynamic parameters of the bearings define quality of the treatment part.

Questions of influence of the changeable equivalent mass of a spindle of the boring machine on parameters of dynamic quality are considered in work. The algorithm of the program of its calculation depending on the used holders and the moving-out part of a spindle is given. The cyclic algorithm of the

program of determination of dynamic parameters of automatic control system depending on the size of the varied equivalent mass is presented. Nomograms for estimation of a phase margin for various moving-out put of the spindle and mass of holders for corrected by a RC chain and not corrected variants of a control system of the bearing are received. The corresponding conclusions and recommendations are given.

Key words: hydrostatic bearing, control system, equivalent mass, dynamic quality, correction, energy parameters, phase margin,

REFERENCES

[1] Bundur M.S., Prokopenko V.A., Chernov I.A. Povyshenie vibroustojchivosti processa rezanija putem uluchshenija dinamicheskih harakteristik shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov // Metalloobrabotka, № 1(49), 2009. pp. 10-15. (rus.)

[2] Ivashhenko H.H. Avtomaticheskoe regulirovanie. Teorija i jelementy sistem. M: Mashinostroenie, 1983. 608 p. (rus.)

[3] Pelevin N.A., Prokopenko V.A. Modelirovanie dinamicheskih processov precizionnyh shpindel'nyh opor metallorezhushhego oborudovanija v programmnom pakete MATLAB // XLI Nedelja nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Luchshie doklady – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. pp. 53-56. (rus.)

[4] Prokopenko V.A. Gidrostaticheskie podshipniki dlja stankov // RITM Mashinostroenija, № 3, 2016. pp. 10-11. (rus.)

[5] Iovlev Ju.A., Trockaja Z.V. Krutil'nye i izgibnye kolebanija jelementov mashin: Uchebnoe posobie. L: LPI, 1985. 76 p. (rus.)

[6] Bundur M.S., Pelevin N.A., Prokopenko V.A. Sovershenstvovanie raschetno-vychislitel'noj bazy dlja povyshenija urovnja podgotovki specialistov-stankostroitelej // Materialy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoj konferencii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie».–SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. pp. 896 - 904. (rus.)

[7] Bundur M. S., Prokopenko V. A., Chernov I. A. Sravnitel'nye issledovanija dinamicheskogo kachestva pri vybore sistemy upravlenija shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov // Teorija mehanizmov i mashin, № 2(14), 2009. pp. 19-27. (rus.)

[8] Gosudarstvennyj standart sojuza SSSR GOST 21482-76 Sil'fony odnoslojnye izmeritel'nye metallicheskie. Tehnicheskie uslovija. M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam. 1976. (rus.)

[9] Bundur M.S., Pelevin N.A., Prokopenko V.A. Dinamika vysokoskorostnyh shpindel'nyh uzlov tjazhelogo stanochnogo oborudovanija // Nauchn-tehnicheskie vedomosti SPBGPU, T. 238, № 1, 2016. pp. 145-154. (rus.)

[10] Pelevin N.A. Komp'juternoe modelirovanie jenergeticheskih processov v shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikah // KOMOD 2015: trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii. 1-3 ijulja 2015 goda, 2015. pp. 74-82. (rus.)

[11] Brian D. Hahn, Daniel T. Valentine. Essential MATLAB® for Engineers and Scientists. Third edition ed. Oxford: Elsevier, 2007. 449 pp.
[12] Koldaev V.D. Osnovy algoritmizacii i programmirovanija: Uchebnoe posobie / Pod red. prof. L. G. Gagarinoj. M: ID «FORUM»: INFRA-M, 2006. 416 p. (rus.)
[13] Pelevin N.A., Prokopenko V.A., Chernov I.A. Grafo-analiticheskij metod vybora parametrov korrekcii gidrostaticheskih podshipnikov s pomoshh'ju sredy MATLAB // Teorija mehanizmov i mashin, № 2, 2015. pp. 13-22. (rus.)
[14] Bundur M.S., Pelevin N.A., Prokopenko V.A. Vozmozhnosti i osobennosti paketa MATLAB Simulink pri modelirovanii sistem upravlenija gidrostaticheskimi nesushhimi uzlami // Materialy 4-j Mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoj konferencii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie». SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 2014. pp. 815 - 825. (rus.)
[15] Push V.Je. Metallorezhushhie stanki: Uchebnik dlja mashinostroitel'nyh vtuzov. M.: Mashinostroenie, 1985. 256 p. (rus.)
[16] Prokopenko V.A., Chernov I.A. Issledovanie tehnologicheskih rezhimov obrabotki dlja opredelenija trebuemyh tehnicheskih harakteristik stankov // Materials of the XI international scientific and practical conference « Prospects of world science – 2015» July 30 – August 7, Vol. 10, Sheffield, 2015. pp. 64-66.

УДК 669.295.5.018:621.91.02 ; DOI 10.1872/MMF-2016-95

Ю.Б. Егорова[1], Л.В. Давыденко[2], Е.Н. Егоров[3], С.Б. Белова[4]

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ РЕЗАНИЕМ α+β- И ПСЕВДО β-ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

[1]Юлия Борисовна Егорова, д.т.н., профессор
Ступинский филиал МАИ, Россия, г. Ступино,
E-mail: egorova_mati@mail.ru.

[2]Людмила Васильевна Давыденко, к.т.н., доцент
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), Россия , г. Москва
E-mail: mami-davidenko@mail.ru.

[3]Евгений Николаевич Егоров, к.т.н., доцент
Ступинский филиал МАИ, Россия, г. Ступино,
E-mail: aravir_ene@mail.ru.

[4]Светлана Борисовна Белова, к.т.н., доцент
Ступинский филиал МАИ, Россия, г. Ступино,
E-mail: sb-belova@rambler.ru.

Аннотация

Обобщены литературные данные и результаты собственных исследований по влиянию различных режимов термической обработки на структуру, фазовый состав, механические свойства и обрабатываемость резанием α+β- и псевдо β-титановых сплавов. Показано, что термическая обработка является эффективным средством, обеспечивающим разные уровни механических свойств сплавов и определяющим их различную обрабатываемость резанием.

Ключевые слова: титановые сплавы, термическая обработка, структура, механические свойства, обрабатываемость резанием.

Одним из эффективных способов улучшения обрабатываемости резанием современных труднообрабатываемых материалов, в том числе и титановых сплавов, является термическая обработка [1-3]. Это связано с

тем, что структура титановых сплавов характеризуется большим разнообразием в зависимости от способа изготовления полуфабрикатов, вида и режимов термической обработки, что в свою очередь определяет разные механические свойства и обрабатываемость их резанием. Вместе с тем необходимо отметить, что в настоящее время масштабы промышленного применения упрочняющей термической обработки полуфабрикатов из титановых сплавов недостаточно высоки, что не в последнюю очередь связано с низкой обрабатываемостью резанием титановых сплавов в термоупрочненном состоянии. Между тем применение определенных режимов термической обработки может обеспечить оптимальное сочетание требуемых механических свойств и хорошей обрабатываемости резанием титановых сплавов [1 - 10]. Однако влияние термической обработки и параметров структуры исследовано до сих пор крайне недостаточно и, прежде всего, слабо отражена связь между режимами термической обработки, фазовым составом, параметрами структуры и характеристиками обрабатываемости резанием. Основная цель настоящей статьи состоит в том, чтобы проанализировать результаты, полученные ранее разными авторами, обобщить данные собственных исследований и обосновать обрабатываемость титановых сплавов резанием с металловедческой точки зрения.

В одной из наиболее ранних работ [4] исследовали обрабатываемость сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ15 в состоянии поставки, после ковки, отжига, закалки и старения. Для α+β-сплава ВТ8 самые низкие значения стойкости Т инструмента были обнаружены при точении после закалки из β-области и после деформации в β-области и отжига при 880^0С (режимы 4 и 6, табл. 1). Можно полагать, что ухудшение обрабатываемости после закалки из β-области обусловлено повышением прочности и резким снижением пластичности из-за образования мартенсита α'. Отжиг в β-области при 1000^oС с последующим охлаждением на воздухе привел к значительному снижению прочности, что, скорей всего, и может объяснить более высокую обрабатываемость (режим 3, табл.1).

Для α+β-сплава ВТ3-1 (табл. 1) наилучшая обрабатываемость наблюдается для заготовки с мелкозернистой, глобулярной структурой, сформировавшейся после деформации при 900–950^oС. Достаточно хорошую обрабатываемость имеет также заготовка после закалки с температур, близких к критической (~840^oС), когда в структуре образуется максимальное количество метастабильной $\beta_м$-фазы (30-40%). По данным работ [11, 12] в интервале температур нагрева под закалку 830–850°С для сплава ВТ3-1 наблюдается минимум предела прочности (1050 МПа) и предела текучести (780 МПа), что может повлиять на улучшение условий механической обработки.

Таблица 1

Стойкость резца ВК2 при точении сплавов ВТ8 и ВТ3-1 [4]

№	Режим обработки	T*, мин	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	Структура, фазовый состав**
Сплав ВТ8						
1	Пруток прессованный (состояние поставки)	19 27	-	-	-	Пластинчатая; $\alpha+\beta$
2	Ковка $\alpha+\beta$-области при 900-950°С	14 -	1200	12	60	Мелкозернистая структура; $\alpha+\beta$
3	Ковка в $\alpha+\beta$-области при 900-950°С +отжиг в β-области при 1000°С, 1 час, воздух	25 -	1080	10	30	Мелкопластинчатая структура, границы зерен слабо выражены; $\alpha+\beta$
4	Ковка в $\alpha+\beta$-области: 900-950°С + закалка с 1000 °С, 1час, вода	6 13	1400	2	4	Крупнопластинчатая структура; границы зерен ярко выражены; мартенсит α'
5	Ковка в $\alpha+\beta$-области при 900-950°С + отжиг: 800°С, 1 час, воздух; 590° С, 1час, воздух	13 19	1125	14	50	Пластинчатая структура; $\alpha+\beta$
6	Ковка в β-области при 1050-1110 °С + отжиг: 880 °С, 1 час, воздух	4,4 8	-	-	-	Пластинчатая структура, $\alpha+\beta$
Сплав ВТ3-1						
7	Пруток прессованный (состояние поставки)	15 20	-	-	-	Крупнопластинчатая структура, границы зерен с α-оторочкой; $\alpha+\beta$
8	Ковка $\alpha+\beta$-области при 900-950°С	22 -	1130	11	38	Мелкозернистая глобулярная; $\alpha+\beta$
9	Закалка 840 °С, вода	15 22	1050	18	40	Пластинчатая структура; $\alpha+\beta_{мет}$
10	Закалка с 840° С, вода + старение 400°С, 1час, воздух	10 -	1270	2	10	Пластинчатая структура, $\alpha+\beta$
11	Закалка с 840°С, вода + старение 550°С, 3 часа, воздух	16 21	1100	10	20	Пластинчатая структура, $\alpha+\beta$
12	Отжиг: 870°С, 1 час, охлаждение с печью до 650°С, 2часа, воздух	16 20	1030	15	40	Пластинчатая структура, $\alpha+\beta$

Примечание: * V= 125м/мин; S = 0,11мм/об; t =0,5мм; в числителе при износе по задней грани $h_з$=0,2 мм, в знаменателе – при $h_з$=0,3 мм; **- характеристика структуры дана нами по фотографиям, приведенным в работе [4], механические свойства по данным работ [11, 12]

Наиболее низкие показатели обрабатываемости резанием наблюдаются после закалки и старения при 400°С, 1 ч, приводящим к значительному упрочнению сплава ВТ3-1 при минимальной пластичности (δ≈2%, ψ≤10%). Повышение температуры старения до 550°С и длительности выдержки до 3 часов приводит к снижению прочностных свойств и повышению пластических, что, скорее всего, обуславливает более высокую обрабатываемость резанием сплава ВТ3-1 после термической обработки по режиму 11 по сравнению с режимом 10.

В работах [5, 6] было обнаружено, что α+β-сплав ВТ14 имеет наиболее высокие характеристики обрабатываемости резанием также после закалки с температуры 890°С, лежащей немного выше критической, когда структура представлена α-фазой, мартенситом α'' и метастабильной $\beta_м$-фазой (30-35%). В этом же интервале температур нагрева под закалку наблюдается провал предела текучести (табл. 2). Последующее старение

при 500°С в течение 16 часов приводит к распаду метастабильных фаз, упрочнению материала и ухудшению обрабатываемости резанием.

Таблица 2

Механические свойства* сплава ВТ14 и стойкость Т** резца ВК6М [5, 6]

№	Режим обработки	Т, мин	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$k = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_в}$	Фазовый состав **
1	Состояние поставки	15	-	-	-	-	α+β
2	Отжиг 750°С, 1 час, воздух	9	900-1100	850-1000	6-14	0,9-0,99	α+β
3	Закалка 890°С,1 час, охлаждение в воде	19	1000-1050	700-750	14	0,7-0,75	α+α′+$\beta_м$
4	Закалка 890°С,1 час, вода + старение 500°С, 16 часов, воздух	6	1150-1400	1080-1300	6-10	0,77-0,97	α+β

Примечание: * по данным работ [11, 12]; *** при точении: V=80м/мин; S=0,17мм/об; t=1,0мм, $h_з$=0,3 мм.

Обрабатываемость псевдо β-сплава ВТ15 исследовали в состоянии поставки, после отжига, после закалки и старения по различным режимам [5, 6] (табл. 3). Наиболее высокие значения стойкости резца ВК6М обнаружены при точении заготовок, подвергнутых закалке в воду с температур 800-850°С. В этом случае фиксируется метастабильная $\beta_м$-фаза (100%), обеспечивающая более низкий уровень прочностных свойств, чем в состоянии поставки. Зафиксированный путем закалки в воде β-твердый раствор при старении распадается с выделением дисперсных частиц α-фазы, что вызывает значительное увеличение прочности и твердости сплава и, соответственно, ухудшение обрабатываемости.

Таблица 3

Механические свойства* сплава ВТ15 и стойкость Т** резца ВК6М [5, 6]

№	Режим обработки	Т, мин	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
1	Состояние поставки	60	-	-	-	-
2	Отжиг: 800°С, 1 час, воздух;	60	950	-	18	-
3	Закалка с 800°С, 1 час, вода	70	900	850	20	40
4	Закалка с 850°С, 1 час, вода	80	850-950	830-940	20	60
5	Закалка при 800°С, 1 час, вода +старение 500°С, 15 ч, воздух	19	400	-	8	15
6	Закалка с 800°С, 1 час, воде + старение 450 °С, 25 ч, воздух	3	1300-1500	1200-1400	3-6	-
7	Закалка с 850°С, 1 час, воде +старение 450 °С, 25 ч, воздух	2	1300-1500	1200	1400	3-6
8	Закалка с 850°С, 1 час, воде +старение 500°С, 15 часов, воздух	20	1380	-	9	15

Примечание: * по данным работ [11, 12]; ** - V=30м/мин; S=0,21мм/об; t =1,5мм, $h_з$=0,4 мм.

Наиболее низкие значения стойкости резца обнаружены после закалки с температур 800-850°С и старения при 450°С в течение 25 часов. Этот режим обеспечивает наиболее высокую прочность сплава ВТ15. Старение при 500°С, 15 ч приводит к незначительному снижению прочности, повышению пластичности и улучшению обрабатываемости по сравнению со старением при 450°С, 25 ч. Достаточно высокой обрабатываемостью

резанием обладают не только закаленные заготовки сплава ВТ15, но и заготовки в состоянии поставки и после отжига. Авторы [5, 6] отмечают, что эти заготовки (1-4) имеют приблизительно одинаковую мелкозернистую структуру. Необходимо отметить, что в сплаве ВТ15 β-твердый раствор можно зафиксировать не только после закалки в воду с температур 800-850°С, но и при охлаждении на воздухе (режим 2), причем механические свойства и структура будут мало отличаться [11, 12].

По данным зарубежных источников наиболее низкие показатели обрабатываемости резанием α+β- и псевдо β-сплавы имеют после закалки и старения (табл. 4) [13 - 17]. Относительная стойкость твердосплавного инструмента при точении закаленных заготовок в 3-5 раз выше по сравнению с термически упрочненном состоянием. Закалка из α+β-области сплава Ti-6Al-4V приводит к повышению обрабатываемости резанием не только при точении, но и при электроэрозионной обработке [15].

Таблица 4

Влияние термической обработки на силы резания и относительную стойкость инструмента при точении титановых сплавов [13, 14]

Сплав	Термическая обработка	HV	P_x,* Н	P_y,* Н	P_z,* Н	Отн. стойкость, %
α+β-сплав Ti-6Al-4V	Отжиг 705^{0}С, 2 ч, воздух	313	4	6	11	132
	Закалка 950^{0}С, 2 ч, вода + старение при 538^{0}С, 6ч, воздух	358	4	6,5	11	100
Псевдо β-сплав Ti-15Mo-5Zr-3Al	Закалка 800^{0}С, 1 ч, вода	302	4	9	14	20
	Закалка 800^{0}С, 1 ч, вода + старение при 500^{0}С, 15 ч, воздух	415	7	10,5	14	3
Псевдо β-сплав Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	Закалка 800^{0}С, 1 ч, вода	255	7,5	12	16	18
	Закалка 800^{0}С, 1 ч, вода + старение при 510^{0}С, 14 ч, воздух	415	8,5	12	17	5

Примечание: * - точение по режиму: V=100 м/мин; S=0,1мм/об; t =0,5мм.

В работе [17] была исследована обрабатываемость резанием сплава Ti54M с различной структурой, полученной в результате отжига при 750^{0}С; β-отжига (990^{0}С, вода + 730^{0}С, 2 ч, воздух) и закалки при 920^{0}С, вода + старения при 500^{0}С, 4 ч, воздух. Снижение усилий резания и коэффициента трения было обнаружено при точении образцов после отжига при 750^{0}С, что, по мнению авторов, обусловлено более мелкой структурой, а также невысокой прочностью (935 МПа) и более высокой пластичностью (δ=23%) по сравнению с β-отжигом ($\sigma_в$=940 МПа, δ=11%) и закалкой + старением ($\sigma_в$=1070 МПа, δ=19%).

В наших работах [7 - 10, 18] обобщены результаты исследований по влиянию на режущие свойства инструмента различных режимов термической обработки α+β-титановых сплавов ВТ6, ВТ3-1 и ВТ23. В качестве материалов для исследований использовали прутки, откованные при температурах 950-1180^{0}С. Для сплава ВТ6 температура отжига составляла 800^{0}С, температура нагрева под закалку $t_з$=800-1050^{0}С, температура старения $t_с$=400-600^{0}С, продолжительность τ=1-6 ч. Для

сплава ВТ23 - $t_з$=700-900^{0}С, $t_с$=300-600^{0}С, τ=1-14 ч. Прутки сплава ВТ3-1 подвергали отжигу при 750-1000^{0}С. Режимы резания при точении: V=25-100 м/мин, S=0,078-0,2 мм/об, t=0,5-1,0 мм. Были исследованы корреляционные связи и установлены регрессионные зависимости стойкости инструмента (стойкость резца Т, удельная размерная стойкость $T_{ур}$), составляющих сил резания (P_x, P_y, P_z), температуры в зоне резания $\theta_р$ с режимами ковки и термической обработки, механическими свойствами сплавов и параметрами их структуры (количество β-фазы n_β, размер β-зерна D, толщина b_α и длина l_α α-пластин, размер α-колоний d_α).

Для сплава ВТ6 после ковки при различных температурах более высокие показатели обрабатываемости резанием наблюдаются для образцов с мелкой структурой, сформировавшейся в процессе деформации при 950^{0}С (табл. 5). В состоянии поставки сплав ВТ23 с k_β=0,75 имеет более низкие показатели обрабатываемости резанием, чем сплав ВТ23 с k_β=0,66 и сплавы ВТ6 с k_β=0,25 и ВТ3-1 с k_β=0,6.

Таблица 5

Параметры обрабатываемости резанием сплавов ВТ6, ВТ3-1 и ВТ23 после ковки и закалки

Сплав	k_β	$t_к$, ^{0}С	$t_з$, ^{0}С	HRC	P_x,* Н	P_y,* Н	P_z,* Н	$\theta_р$, * ^{0}С	Т, мин	
									I*	II**
ВТ6	0,25	950	-	30	140	140	210	595	35	118
		1010	-	30	240	360	590	712	16	78
		1180	-	31	100	130	110	690	30	105
		950	800	30	-	-	-	-	-	165
			875	29	-	-	-	-	-	182
			930	31	100	220	160	738	-	95
			1050	36	-	-	-	-	-	62
ВТ3-1	0,6	1000	-	36	-	-	-	-	21	-
ВТ23	0,66	1040	-	37	161	343	837	-	17	32
			850	33	110	311	797	-	-	98
	0,75	1040	-	35	170	358	935	-	12	25

Примечания: * - V=80 м/мин; S=0,075 мм/об; t=0,8 мм;** - V=25 м/мин; S=0,2 мм/об; t=1,0 мм; $h_з$=0,3 мм.

Нагрев заготовок в β-области вызывает сильный рост β-зерна и размеров внутризеренных составляющих. В зависимости от температуры отжига средний размер зерна изменялся от ~50 до ~600 мкм. Корреляционный анализ зависимости характеристик обрабатываемости резанием сплавов от параметров структуры показал, что в большей степени на стойкость резца и усилия резания влияет размер β-зерна, в то время как роль других факторов менее существенна. Однако во всех случаях наблюдается уменьшение стойкости $T_{ур}$ инструмента с увеличением размеров структурных составляющих (табл. 6), в частности размера зерна в соответствии с соотношением: $T_{ур}=3{,}85 - 5{,}6\cdot10^{-3}D$.

Таблица 6

Характеристики обрабатываемости резанием* сплава ВТ3-1с различной структурой после отжига при температурах 750-1000^{0}С

Характеристика структуры	$T_{ур}$, 10^3см^2/мкм	P_x, Н	P_y, Н	P_z, Н
Грубая пластинчатая, крупное β-зерно	0,4-0,6	620	700	750
Мелкопластинчатая, крупное β-зерно	0,5-0,7	610	650	730
Мелкоглобулярная , крупное β-зерно	1,5-2,5	600	670	750
Мелкоглобулярная, мелкое β-зерно	3,0-5,0	480	650	700

Примечание: * - при V=60 м/мин; S=0,21 мм/об; t=1,0 мм, резец ВК8.

Наиболее высокие показатели обрабатываемости резанием наблюдаются после закалки заготовок с критических температур (870-880^{0}С для сплава ВТ6 и 840-850^{0}С для сплава ВТ23), когда в структуре образуется максимальное количество метастабильной β-фазы, обеспечивающее низкую твердость сплавов (табл. 5 и 7). Эти образцы имеют минимальные значение прочностных свойств HRC, σ_b, $\sigma_{0,2}$ и коэффициента $k=\sigma_{0,2}/\sigma_b$, который характеризует пластичность материала и способность к деформационному упрочнению. В состоянии после закалки и старения обрабатываемость резанием сплавов ВТ6 и ВТ23 в целом хуже, чем после ковки и закалки (табл. 7, 8).

Таблица 7

Влияние термической обработки на фазовый состав, механические свойства и обрабатываемость резанием сплава ВТ23 (k_β=0,75)

Режим термической обработки	Фазовый состав	n_β %	Механические свойства						$T_{ур}$,* $\frac{10^3\text{см}^2}{\text{мм}}$
			$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	δ, %	ψ, %	HRC	
Состояние поставки	α+β	31	1133	1009	0,89	12	37	37	0,6
Отжиг 775^{o}С, 1ч	α+β	32	1100	935	0,85	14	38	36	0,63
Закалка 800^{o}С	$\alpha+\beta_м$	47	1090	910	0,83	11	36	35	0,7
Закалка 850^{o}С	$\alpha+\beta_м$	64	1000	340	0,34	11	25	33	1,51
Закалка 880^{o}С	$\alpha+\beta_м+\alpha''$	46	1100	700	0,64	11	20	34	0,75
Закалка 800-880^{o}С + старение 400-550^{o}С, 10ч	α+β	24-34	1200-1550	1080-1380	0,8-0,96	1-12	2-22	35-44	0,5-0,62

Примечание: * - режимы точения: V=60 м/мин, S=0,2 мм/об, t=0,5 мм; резец ВК6ОМ.

Повышение температуры нагрева под закалку сопровождается увеличением размера зерна, толщины α-пластин и оторочки по границам зерна. После старения эти факторы обуславливают более низкие показатели обрабатываемости резанием. Так, для сплава ВТ6 стойкость резца уменьшается с 102 до 90 мин соответственно для образцов, подвергнутых закалке с 800 и 930^{0}С. С повышением температуры старения с 400 до 600^{0}С стойкость резца увеличивается в 1,6 раза (с 102 до 169 мин при V=25 м/мин; S=0,21 мм/об; t=1,0 мм), что обусловлено снижением твердости из-за перестаривания.

Таблица 8

Результаты регрессионного анализа зависимости стойкости резца ВК8 от структурных факторов, режимов закалки и старения сплавов ВТ6 и ВТ23

Сплав	Регрессионная модель	R*	S*
ВТ6	$T = \frac{12{,}0226 \cdot 10^4}{D^{0,69} V^{2,82} S^{2,48} t^{0,89}}$	0,82	0,61
	$T = \frac{2805{,}43}{b_{от}^{0,19} V^{2,88} S^{2,51} t^{1,04}}$	0,79	0,61
	$T = \frac{14{,}4 \cdot t_k^{0,22} \cdot t_{ст}^{1,26}}{V^{2,69} S^{2,44} t^{0,7} t_з^{0,33} \tau_{ст}^{0,2}}$	0,92	0,42
ВТ23	$T = \frac{475}{D^{0,39} V^{2,77} S^{4,12} t^{0,57}}$	0,97	1,86
	$T = \frac{166}{b_\alpha^{0,22} V^{3,24} S^{4,6} t^{0,13}}$	0,97	1,73
	$T = \frac{264 t_{ст}^{0,24}}{V^{2,81} S^{4,48} t^{0,4} t_з^{0,1} \tau_{ст}^{0,1}}$	0,95	2,38

Примечание: * R - коэффициент множественной корреляции; S - статистическая ошибка, мин.

Проведенные исследования показывают, что, меняя режимы термической обработки, можно существенно влиять на обрабатываемость резанием α+β- и псевдо β-титановых сплавов. Механическую обработку сплавов желательно проводить после такой термической обработки, которая обеспечивает невысокий уровень прочности обрабатываемого материала и не очень низкую пластичность. При этом необходимо учитывать, что титановые сплавы с грубой пластинчатой структурой значительно хуже обрабатываются резанием по сравнению с обрабатываемостью материала с тонкопластинчатой или глобулярной структурой. Это обусловлено более высокой пластичностью, меньшими значениями вязкости разрушения, критической длины трещины при стружкообразовании, адгезионной связи на срез и адгезионной составляющей коэффициента трения [16, 18]. При проектировании технологических процессов изготовления деталей из α+β- и псевдо β-титановых основной объем механической обработки следует рекомендовать после закалки, а чистовые операции – после старения. Необходимо отметить, что закалка из β-области, приводящая к формированию упрочняющего мартенсита α', не может быть рекомендована, во-первых из-за ухудшения обрабатываемости резания, во-вторых из-за того, что фаза α' не дает упрочнения при старении. Поэтому температуры нагрева под закалку должны быть подобраны таким образом, чтобы фиксировались фазы α'' и (или) $\beta_{мет}$. Оптимальное сочетание механических свойств состаренных сплавов наблюдается после закалки с температур между критической и Ac_3 [11, 12]. Поэтому для повышения эффективности механической обработки температуры нагрева под закалку α+β-сплавов должны быть близки к критическим. В этом случае скорость

резания сплавов (например, ВТ6, ВТ23, ВТ14, ВТ3-1) можно повысить в 1,2-1,5 раза по сравнению с отожженным состоянием.

Псевдо β-сплавы обычно закаливают с температур β-области, в результате чего фиксируется 100%-ная $\beta_{мет}$ (без ω- или с ω-фазой внутри нее). Так как ω-фаза приводит к значительному повышению прочности и крайне низкой пластичности, то механическую обработку после закалки можно рекомендовать только для сплавов, у которых образование ω-фазы подавляется из-за наличия алюминия и нейтральных упрочнителей или при достаточно большом содержании β-стабилизаторов (сплавы ВТ15, ВТ19, ВТ32, ВТ35, Ti-15Mo-5Zr-3Al, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al). Необходимо также отметить, что высоколегированные псевдо β-сплавы могут самозакаливаться даже при довольно медленном охлаждении. При охлаждении на воздухе после отжига возможно образование метастабильной β-фазы, приводящей к снижению прочности и повышению пластичности сплавов, так что их обрабатываемость резанием сильно зависит от технологических условий охлаждения.

Проведенные исследования показывают, что эффективность механической обработки после закалки зависит, в конечном итоге, не только от температуры нагрева под закалку и скорости охлаждения, но и от химического состава (марки) сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloys/ Egorova Y.B. [and other]//Inorganic Materials: Applied Research. - 2013. - Vol. 4 - N. 1. - P. 46-51.
2. Достижения в механической обработке титана и его сплавов за 50 лет/ Егорова Ю.Б [и др.]// Технология металлов.- 2015.- №10.- С. 2-10
3. Егорова Ю.Б., Давыденко Р.А., Давыденко Л.В. Классификация отечественных и зарубежных титановых сплавов по обрабатываемости резанием // Материаловедение. – 2014. - №4.- С. 14-20.
4. Кривоухов В.А., Чубаров А.В. Обработка резанием титановых сплавов.- М.: Машиностроение, 1970.- 183 с.
5. Резание труднообрабатываемых материалов./Петруха П.Г. [и др.].- М.: Машиностроение, 1972.- 175 с.
6. Жучков Н.С., Беспахотный П.Д., Чубаров А.Д. Повышение эффективности обработки резанием заготовок из титановых сплавов. - М.: Машиностроение, 1989.-152 с.
7. Egorova Y.B., Mamonova F.S., Davidenko L.V. The substantiation of quenching and aging conditions of VT23 alloy ensuring enhanced machining //Titanium’99. Science and Technology. Proceedings of 9th World Conf. On Titanium, Saint-Petersburg, 7-11 June. - 1999. - V.3. - P.1675-1678.
8. Влияние структуры титановых сплавов ВТ6 и ВТ23 на их обрабатываемость резанием / Егорова Ю.Б. [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологи-

ческого и энергетического оборудования, 2004. № 1. - С. 63-66.
9. Оптимизация механической обработки титановых сплавов / Егорова Ю.Б., [и др.] // Вестник Тверского государственного технического университета.- 2004 - №4 - С.167-171.
10. Егорова Ю.Б., Мамонов И.М., Давыденко Л.В. Исследование корреляционных связей между механическими свойства и обрабатываемостью резанием сплава ВТ23 // Научные труды (Вестник МАТИ). - 2001. - № 4 (76). - С.123-128.
11. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н.. Конструкционные титановые сплавы.-М.: Металлургия, 1974.- 368 с.
12. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. /Борисова Е.А [и др.] - М: Металлургия, 1980.- 464 с.
13. Асиура Ясуюки, Мотониси Хидэ. Обрабатываемость титановых сплавов резанием // Титаниуму дзирукониуму. Titanium and zirconium. - 1987.- №3. - С. 131-141.
14. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys / Boyer R. [and other]//ASM International. The Material Information Society. - 1994. 1176 p.
15. Altug M., Erdem M., Ozay C.. Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm [Электронный ресурс] // http://www.scientific.net/MSF.770.179 (дата обращения 23.03.2015).
16. Khanna N., Sangwan K. S.. Comparative machinability study on Ti54M titanium alloy in different heat treatment conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.- 2013, January 1. - V.227. - P. 96-101.
17. Khanna N., Sangwan K. S.. Machinability study on α/β and β-titanium alloys in different heat treatment conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. - 2013, March 1. - V.227. - P. 357- 361.
18. Effect of the Structure on the Cutability of Titanium Alloys / Egorova Yu.B., Il´in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. // Metal Science and Heat Treatment. - 2003. - V.45. - №3-4. - P.134-139.

J.B. Egorova[1], L.V.Davidenko[2], E.N. Egorov[3] , S.B. Belova[4]

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE MACHINABILITY OF α+β- AND NEAR β-TITANIUM ALLOYS

[1,3,4]MAI Stupinsky branch, Russia;
[2]Moscow state machine-building university (MAMI), Russia.

Abstract

Dates of literature and results of own researches on influence of various regimes of heat treatment on structure, phase structure, mechanical properties and a machinability of α+β- and near β-titanium alloys are generalized. It is shown that heat treatment is an effective method, the mechanical properties of

alloys providing different levels and determining their various machinability.

Key words: titanium alloys, heat treatment, structure, mechanical properties, machinability.

REFERENCES

[1] Methods of increasing efficiency of machinability of titanium and titanium alloys/ Egorova Y.B. [and other]//Inorganic Materials: Applied Research. - 2013. - Vol. 4 - N. 1. - P. 46-51.(rus.)

[2] Dostigeniya v mehanicheskoy obrabotke titana I titanovih splavov za 50 let. / Egorova Yu.B. [i dr.]//Technologiy metallov. - 2015. – N. 10. – P. 2-10.(rus)

[3] Egorova Yu.B., Davydenko R. A., Davydenko L.V. Klassifikaciy otechestvennih zarubeghnih titanovih splavov po obrabativaemosti rezaniem//Materialovedenie. - 2014. - №4.- P. 14-20. (rus.)

[4] Krivouhov V.A., Chubarov A.B. Obrabotka rezaniem titanovih splavov.- M.: Mashinostroenie. - 1970.- 183 p. (rus.)

[5] Rezanie trudnoobrabativaemih materialov./ Petrukha P. G. [i dr.]. - M.: Mashinostroenie. -1972.- 175 p. (rus.)

[6] Ghuchkov N.S., Bespakhotny P.D., Chubarov A.D. Povishenie effektivnosti obrabotki rezaniem zagotovok iz titanovih splavov. - M.: Mashinostroenie. -1989.- 152 p. (rus.)

[7] Egorova Y.B., Mamonova F.S., Davidenko L.V. The substantiation of quenching and aging conditions of VT23 alloy ensuring enhanced machining //Titanium'99. Science and Technology. Proceedings of 9th World Conf. On Titanium, Saint-Petersburg, 7-11 June. - 1999. - V.3. - P.1675-1678.

[8] Vliyanie strukturi titanovih splavov VT6 и VT23 na ih obrabativaemost rezaniem / Egorova Yu.B. [i dr.]// Mehanika I fizika processov na poverhnosti I v kontakte tverdih tel, detaley tehnologicheskogo I energeticheskogo oborudovaniya, 2004. - № 1. - P. 63-66. (rus.)

[9] Optimizaciya mehanicheskoy obrabotki titanovih splavov/ Egorova Yu.B. [i dr.]//Vestnik TGTU, 2004 - №4 - P.167-171.

[10] Egorova Yu.B., I.M., Davydenko L.V. Mammons. Issledovanie korrelyacionnih svyazey meghdu mehanicheskimi svoystvami I obrabativaemostyu rezaniem splava VT23// Nauchnie trudi (Vestnik MATI). 2001. - № 4 (76). - P.123-128. (rus.)

[11] Glazunov S.G., Moiseyev V. N. Konstrukcionnie titanovie splavi [Constructional titanic alloys]. M.: Metallurgy, 1974. 368 pages (Russ).

[12] Titanovie splavi.Vttallografiya titanovih splavov./ Borisova E.A. [i dr.]// - M: «Metallurgiya», 1980.- 464 p.

[13] Asiura Yasuyuki, Motonisi Hide. Obrabativaemost titanovih splavov rezaniem // Titanium and zirconium. - 1987.- №3. - P. 131-141.

[14] Materials Properties Handbook. Titanium Alloys / R.Boyer [and other]//ASM International. The Material Information Society. - 1994. – P. 1176.

[15] M. Altug, M.Erdem, C. Ozay. Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm [Электронный ресурс] // http://www.scientific.net/MSF.770.179
[16] N. Khanna, K. S. Sangwan. Comparative machinability study on Ti54M titanium alloy in different heat treatment conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.- 2013, January 1. - V.227. - P. 96-101.
[17] N. Khanna, K. S. Sangwan. Machinability study on α/β and β-titanium alloys in different heat treatment conditions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. - 2013, March 1. - V.227. - P. 357- 361.
[18] Effect of the Structure on the Cutability of Titanium Alloys / Egorova Yu.B., Il´in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. // Metal Science and Heat Treatment. - 2003. - V.45. - №3-4. - P.134-139.

УДК 621.752; DOI 10.1872/MMF-2016-96

Ю.А. Семенов[1], Н.С. Семенова[2]

АНАЛИЗ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОСНОВАНИЕ

[1] Юрий Алексеевич Семенов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.; (812)345-1622, E-mail: tmm-semenov@mail.ru

[2] Надежда Сергеевна Семенова, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.; (812)345-1622, E-mail: tmm-nss@yandex.ru

Аннотация

Колебания, возникающие при обработке деталей на металлорежущем станке, приводят к нарушению его правильной работы, преждевременному износу инструмента. Разнообразие источников вибраций и вызываемых ими воздействий требует использования различных средств виброзащиты. С этой целью станки устанавливают непосредственно на пол цеха, на различные фундаменты и на виброопоры. В статье рассматриваются вопросы эффективности виброзащитных устройств.

Ключевые слова: вибрация, виброзащита, фундамент, виброопора, металлорежущий станок

Вибрации, возникающие при обработке деталей на металлорежущем станке, приводят к нарушению его правильной работы, преждевременному износу инструмента и ухудшению качества обрабатываемых деталей, т.е. являются нежелательными.

Разнообразие источников вибраций и вызываемых ими воздействий требует использования различных средств виброзащиты. С этой целью станки устанавливают непосредственно на пол цеха, на различные фунда-

менты и на виброопоры. Вопросы эффективности виброзащитных устройств рассматривались в научной и учебной литературе $[1-6]$.

На рис. 1, *а* показана условная схема установки станка на виброопорах. В первом приближении станок с основанием будем рассматривать как абсолютно твердые тела. Пусть в станке имеется механизм, приводящий в движение массу μ (например, суппорт). Создание этого движения связано с действием силы P, возникающей в механизме. В рассматриваемой модели не учитываются силы, прикладываемые к основанию со стороны какого-либо постороннего источника (например, соседнего станка).

Уравнения движения рассматриваемой системы

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = P,$$
$$\mu(\ddot{y} + \ddot{u}) = -P,$$

где m – масса неподвижных частей станка; $y(t)$ – закон движения корпуса станка; $u(t)$ – заданный закон движения массы μ относительно корпуса станка; c, b – жесткость и коэффициент сопротивления виброопоры.

Сила, действующая на основание,

$$R = cy + b\dot{y}.$$

Переходя к операторной форме записи, получаем

$$(mp^2 + bp + c)y = P; \quad \mu p^2 y = -P - \mu\ddot{u}(t); \quad R = (bp + c)y.$$

Решая эти операторные уравнения, находим

$$R = -w_R(p)\mu\ddot{u}(t); \quad P = -w_P(p)\mu\ddot{u}(t),$$

где передаточные функции, связывающие силы R и P, характеризующие внешнюю виброактивность станка, с заданным законом движения $u(t)$:

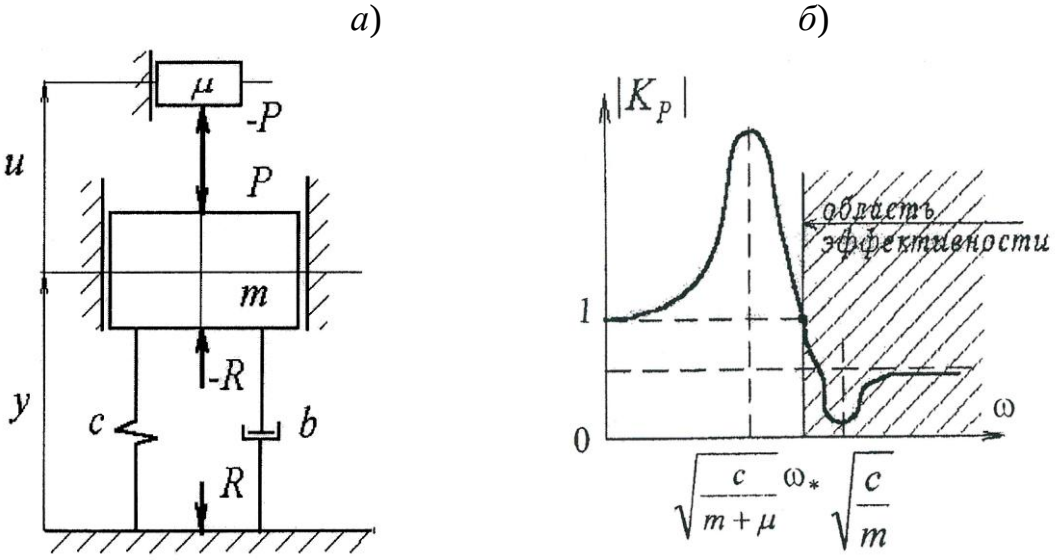


Рис. 1

$$w_R(p)=\frac{bp+c}{(m+\mu)p^2+bp+c};\quad w_P(p)=\frac{mp^2+bp+c}{(m+\mu)p^2+bp+c}.$$

При жестком креплении станка к основанию имеем

$$R^0=P^0=-\mu\,\ddot{u}(t).$$

Очевидно, что передаточные функции $K_R(p)=R/R^0$, $K_P(p)=P/P^0$ совпадают соответственно с $w_R(p)$ и $w_P(p)$. Если принять, что закон движения $u(t)$ является гармоническим, то коэффициенты $|K_R(j\omega)|$ и $|K_P(j\omega)|$ могут служить мерой эффективности на частоте ω. Примерный вид графика $|K_P(j\omega)|$ показан на рис. 1, *б*. Значения ω, для которых $|K_R(j\omega)|<1$ и $|K_P(j\omega)|<1$, определяют области эффективности. Из графика, показанного на рис. 1, *б*, и анализа амплитудно-частотной характеристики $|K_R(j\omega)|$ следует, что виброопоры могут снижать силы R и P только в высокочастотной области. При этом сила P снижается незначительно, поскольку зависит от отношения $m/(m+\mu)$.

Область эффективности для $P(t)$ определяется из условия $\left|c-m\omega^2\right|<\left|c-(m+\mu)\omega^2\right|$. Виброизоляция эффективна, если $\omega>\omega_*=\sqrt{c/(m+0{,}5\mu)}$. Область эффективности для $R(t)$ записывается в виде: $\omega>\sqrt{2c/(m+\mu)}$.

Далее предположим, что основание (грунт), на которое устанавливается станок, является податливым. Этому случаю соответствует условная схема, показанная на рис. 2, *а*.

а) *б*)

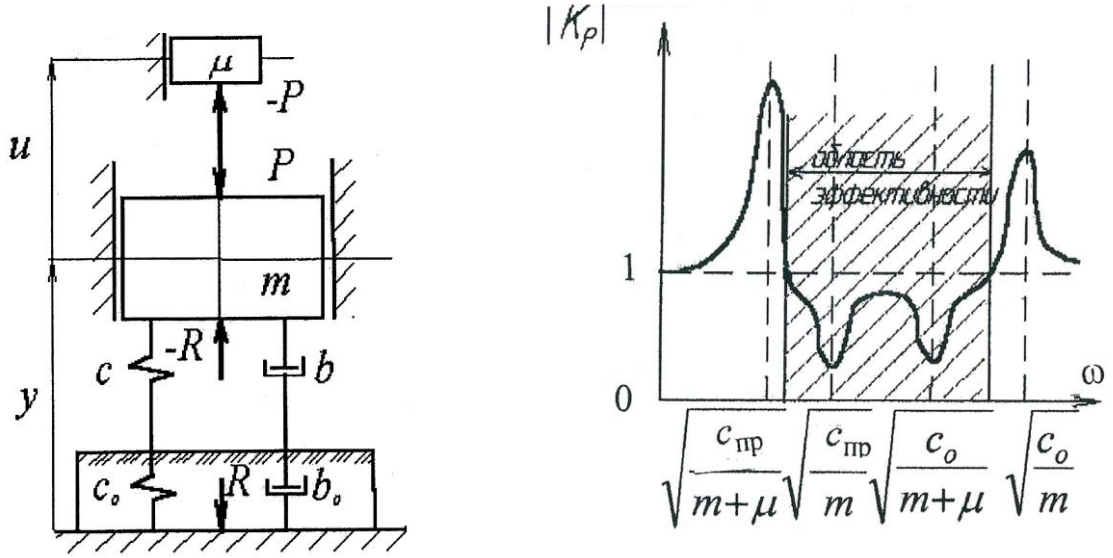


Рис.2

Здесь c_0 и b_0 – жесткость и коэффициент сопротивления упругого основания. Обозначив $c_{\text{пр}} = cc_0/(c+c_0)$; $b_{\text{пр}} = bb_0/(b+b_0)$ и заменив в выражениях, полученных для предыдущего случая, c на $c_{\text{пр}}$ и b на $b_{\text{пр}}$, найдем

$$R = -\frac{b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}}{(m+\mu)p^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}}\mu\ddot{u}(t), \quad P = -\frac{mp^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}}{(m+\mu)p^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}}\mu\ddot{u}(t).$$

При жестком креплении станка к упругому основанию ($c_{\text{пр}} = c_0, b_{\text{пр}} = b_0$) имеем

$$R^0 = -\frac{b_0p + c_0}{(m+\mu)p^2 + b_0p + c_0}\mu\ddot{u}(t), \quad P^0 = -\frac{mp^2 + b_0p + c_0}{(m+\mu)p^2 + b_0p + c_0}\mu\ddot{u}(t).$$

Следовательно, в этом случае

$$K_R(p) = \frac{R}{R^0} = \frac{(b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}})[(m+\mu)p^2 + b_0p + c_0]}{(b_0p + c_0)[(m+\mu)p^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}]},$$

$$K_P(p) = \frac{P}{P^0} = \frac{(mp^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}})[(m+\mu)p^2 + b_0p + c_0]}{[(m+\mu)p^2 + b_0p + c_0][(m+\mu)p^2 + b_{\text{пр}}p + c_{\text{пр}}]}.$$

Примерный график зависимости $|K_P(j\omega)|$ для этой схемы установки показан на рис. рис. 2, *б*.

В данном случае область эффективности охватывает зону средних частот между $\sqrt{c_{\text{пр}}/m}$ и $\sqrt{c_0/(m+\mu)}$. Очевидно, что для роста эффективности нужно увеличивать отношение $c_0/c_{\text{пр}} = 1 + c_0/c$ т.е. жесткость виброизолятора должна быть меньше жесткости основания ($c < c_0$).

Для некоторых видов станков такая их установка на основание действительно возможна и целесообразна. Однако для большой группы станков такой метод установки приводит к отрицательным последствиям. В частности, повышается чувствительность станка к статическим воздействиям, вызванных, например, смещением отдельных масс, увеличиваются перекосы и т.д.

Станки устанавливают на индивидуальные и ленточные фундаменты, снабженные резиновыми ковриками и пружинами. Рассмотрим схему установки станка на обычном индивидуальном фундаменте, расположенном на упругом основании.

Уравнения движения такой системы запишем в операторной форме

$$\left.\begin{aligned}[(m+m_\Phi)p^2 + b_0p + c_0]y &= P,\\ \mu p^2 y &= -P - \mu\ddot{u},\\ R &= (b_0p + c_0)y,\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где m_Φ – масса фундамента.

Из (1) найдем усилие, передаваемое на основание,

$$R = -\frac{b_0 p + c_0}{(m + \mu + m_\Phi) p^2 + b_0 p + c_0} \mu \ddot{u}(t).$$

При $m_\Phi = 0$, т.е. при установке станка непосредственно на упругое основание, получим

$$R^0 = -\frac{b_0 p + c_0}{(m + \mu) p^2 + b_0 p + c_0} \mu \ddot{u}(t).$$

Передаточная функция

$$K(p) = \frac{R}{R^0} = \frac{(m + \mu) p^2 + b_0 p + c_0}{(m + \mu + m_\Phi) p^2 + b_0 p + c_0},$$

связывающая усилие, передаваемое на основание, при наличии фундамента с усилием при $m_\Phi = 0$, характеризует эффективность фундамента как виброзащитного средства. При гармоническом воздействии частоты ω коэффициент

$$|K_R(j\omega)| = \sqrt{\frac{[c_0 - (m + \mu)\omega^2]^2 + b_0^2 \omega^2}{[c_0 - (m + \mu + m_\Phi)\omega^2]^2 + b_0^2 \omega^2}}$$

является мерой эффективности фундамента.

Область эффективности, определяемая условием $|K_R(j\omega)| < 1$, находится из соотношения

$$\omega > \omega_* = \sqrt{\frac{c_0}{m + \mu + 0{,}5 m_\Phi}}. \qquad (2)$$

Чем больше m_Φ, тем ниже ω_*, т.е. тем меньше частота, начиная с которой фундамент обеспечивает виброзащиту.

При $\omega < \omega_*$ коэффициент $|K_R(j\omega)| > 1$. При $\omega_{**}^2 = c_0/(m + \mu + m_\Phi)$ достигается приблизительно его максимальное значение

$$|K_R(j\omega)|_{\max} = \sqrt{\frac{m_\Phi^2 c_0}{(m + \mu + m_\Phi) b_0^2} + 1} \approx \frac{m_\Phi}{b_0} \sqrt{\frac{c_0}{m + \mu + m_\Phi}}.$$

Таким образом, с ростом m_Φ возрастает $|K_R(j\omega)|_{\max}$. Поэтому частота ω_{**} должна располагаться вне зоны спектра внешних воздействий.

При $\omega^2 >> c_0/(m + \mu)$ коэффициент $|K_R(j\omega)|$ практически не зависит от ω и с ростом ω стремится к $(m + \mu)/(m + \mu + m_\Phi)$. Для уменьшения передачи сил в N раз требуется выполнение условия

$$\frac{m + \mu + m_\Phi}{m + \mu} > N.$$

Из (2) определим

$$m_{\Phi} > 2(m+\mu)\left[\left(\frac{\omega_{***}}{\omega}\right)^2 - 1\right],$$

где $\omega_{***}^2 = c_0/(m+\mu)$. Таким образом, для полной отстройки системы от внешних воздействий масса фундамента должна в $2[(\omega_{***}/\omega)^2 - 1]$ раз превышать массу станка.

Если между фундаментом и основанием установить пружины или резиновые коврики, то можно уменьшить нижнюю границу диапазона эффективности без увеличения массы фундамента. В некоторых случаях установка станка на фундаменте осуществляется при помощи виброизоляторов. Схема такой установки показана на рис. 3. В данном случае система имеет две степени свободы; в качестве обобщенных координат выберем перемещения y и y_{Φ}.

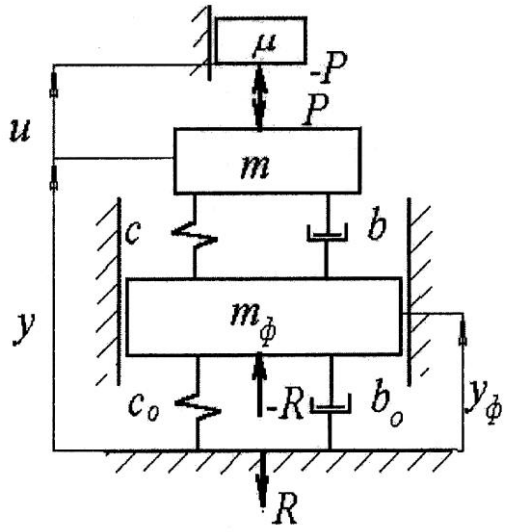


Рис. 3

Тогда уравнения движения системы запишутся в виде:

$$\left.\begin{aligned} \mu(\ddot{y}+\ddot{u}) &= -P, \\ m\ddot{y} + b(\dot{y}-\dot{y}_{\Phi}) + c(y-y_{\Phi}) &= P, \\ m_{\Phi}\ddot{y}_{\Phi} + b(\dot{y}_{\Phi}-\dot{y}) + c(y_{\Phi}-y) &= -R, \\ b_0\dot{y}_{\Phi} + c_0 y_{\Phi} &= R. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Переходя к операторной форме и решая уравнения (3), находим

$$R = -\frac{(bp+c)(b_0p+c_0)}{[m_{\Phi}p^2 + (b+b_0)p + c + c_0][(m+\mu)p^2 + bp + c] - (bp+c)^2}\mu\ddot{u}.$$

Если виброизоляторы заменить жестким соединением станка с фундаментом, то получим

$$R^0 = -\frac{(b_0p+c_0)}{[(m+\mu+m_{\Phi})p^2 + b_0p + c_0]}\mu\ddot{u}.$$

Тогда оператор эффективности

$$K_R(p) = \frac{(bp + c)[(m + \mu + m_\Phi)p^2 + b_0 p + c_0]}{[m_\Phi p^2 + (b + b_0)p + c + c_0][(m + \mu)p^2 + bp + c] - (bp + c)^2}.$$

Из анализа амплитудно-частотных характеристик следует, что внешняя виброактивность снижается в зоне средних частот. Система виброзащиты эффективна при $\sqrt{c/m + \mu} \le \omega \le \sqrt{c + c_0/m_\Phi}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кудинов В.А*. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. *Решетов Д.Н.* Методы снижения колебаний в металлорежущих станках, М.: Машиностроение, 1970. 324 с.
3. *Коловский М.З.* Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Наука, 1976. 320 с.
4. *Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V.* Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Berlin.: Springer, 2000. 394 p.
5. *Семенов Ю.А.* Динамика машин. ч. 2. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 252 с.
6. *А.Н. Евграфов, Г.Н. Петров*. Компьютерная анимация кинематических схем в программах EXCEL и MathCAD. Теория механизмов и машин. 2008. №6(1). С. 71-80.
7. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Теория механизмов и машин в примерах и задачах, ч. 2. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 282 с.
8. *Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Д.Н.* Станины и корпусные детали металлорежущих станков. М., Машгиз, 1980. 363 с.
9. *Пуш В.Э*. Малые перемещения в станках. М., Машгиз, 1961, 124 с..
10. *Кедров С.С*. Колебания металлорежущих станков. М., Машиностроение, 1978. 346 с.

Yu.A.Semenov, N.S. Semenova

ANALYSIS OF THE INSTALLATION OF MACHINE TOOLS ON THE BASIS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Vibrations occurring during the machining of parts on metal cutting machines, lead to the violation of its proper operation, premature wear of the tool. The diversity of sources of vibrations and impacts caused by them requires the use of various means of vibration protection. To this end, the machines are

placed directly on the floor of the shop, on the various foundations and supports. The article considers issues of efficiency of vibration protection devices.

*Key words***:** vibration, vibration isolation, Foundation, vibrator, cutting machine.

REFERECES

[1] Kudinov V. A. Dynamics of machines. Moscow: Mashinostroenie, 1967. 359 p (rus).
[2] Reshetov D. N. Methods to reduce vibrations in metal-cutting machines, Moscow: Mashinostroenie, 1970. 324 p (rus).
[3] Kolovsky M. Z., Automatic control of vibration protection systems. M.: Nauka, 1976. 320 p (rus).
[4] Kolovsky M. Z., Evgrafov A. N., Semenov Yu.A., Slousch V. A. the Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Berlin.: Springer, 2000. 394 p.
[5] Semenov Y. A. Dynamics of machines. part 2. SPb.: Publishing house of the Polytechnical Institute. University press, 2012. 252 p (rus).
[6] A. N. Evgrafov, G. N. Petrov. Computer animation cinematice the-sky schemes in the programs EXCEL and MathCAD. Theory of mechanisms and machines.2008 No. 6(1), Pp. 71-80 (rus).
[7] Semenov Y. A., Semenova N.S. Theory of machines and mechanisms in actions and tasks, part 2. SPb.: Publishing house of the Polytechnical Institute. University press, 2016. 282 p(rus).
[8] Kaminskaya, V. V., Levina Z. M., Reshetov D. N. The frame and body parts of machine tools. M., Mashgiz, 1980. 363 p.
[9] Push V. E. Small displacements in machine tools. M., Mashgiz, 1961, 124 p.
[10] Kedrov, S. S., Vibrations of machine tools. M., Machine-building, 1978. 346 p.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.771; DOI 10.1872/MMF-2016-97

Л.Б.Аксенов[1], С.Н.Кункин[2]

КОМБИНИРОВАННАЯ ХОЛОДНАЯ ТОРЦЕВАЯ РАСКАТКА УТОЛЩЕННЫХ ПОЛЫХ ФЛАНЦЕВ

[1] Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия.
E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru.

[2]Сергей Николаевич Кункин, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия. Тел. (812) 552-9530
E-mail: kunkin@spbstu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования двух технологий холодной торцевой раскатки, представляющих собой комбинации торцевой раскатки с многоступенчатой осадкой и боковым выдавливанием. Технологии предназначены для изготовления утолщенных фланцев, т.е. фланцев толщиной более толщины стенки исходной трубной заготовки, когда процесс ограничен потерей устойчивости заготовки. Предложенные технологии обеспечивают устойчивость заготовок в процессе обработки и позволяют получить фланцы в диапазоне размеров DN 150 - DN 450, соответствующих европейским стандартам 42.05.04, 42.05.07. Раскатка может осуществляться как коническим валком, так и цилиндрическими валками. Приведены результаты моделирования технологий в комплексе Deform 3D. Предложенные технологии особенно эффективны для производства фланцев из труб, для соединения которых они предназначены, в том числе из нержавеющих сталей.

Ключевые слова: торцевая раскатка, многоступенчатая высадка, радиальное выдавливание, устойчивость заготовки, полые фланцы, конический валок, цилиндрические валки, компьютерное моделирование.

Введение

В различных отраслях промышленности используется большое количество деталей типа фланцев. Номенклатура этих деталей весьма многообразна и регламентируется различными стандартами, как в нашей стране, так и за рубежом. Производство фланцевых деталей осуществляется по различным технологиям, но большинство из них не отличаются высоким коэффициентом использования металла [1]. Многие технологии производства фланцев основаны на использовании технологии горячей штамповки с последующей дополнительной обработкой [2]. В этом случае пластичность металла выше, формообразование происходит при малом технологическом усилии. Однако процессы горячего деформирования требуют значительных расходов на нагрев, а получаемые детали покрыты окалиной и требуют последующей механической обработки. Поэтому применение этих процессов не столь эффективно в промышленности.

Технология торцевой раскатки предназначена для изготовления осесимметричных деталей из прутковых или трубных заготовок (Рис. 1). Торцевая раскатка является представителем процессов с локальной деформацией обрабатываемого металла [3-6] и имеет более чем столетнюю историю [7,8]. При этом в контакте с деформирующим инструментом находится только часть заготовки, что снижает площадь контакта, величину контактных напряжений и, соответственно, необходимое усилие деформирования.

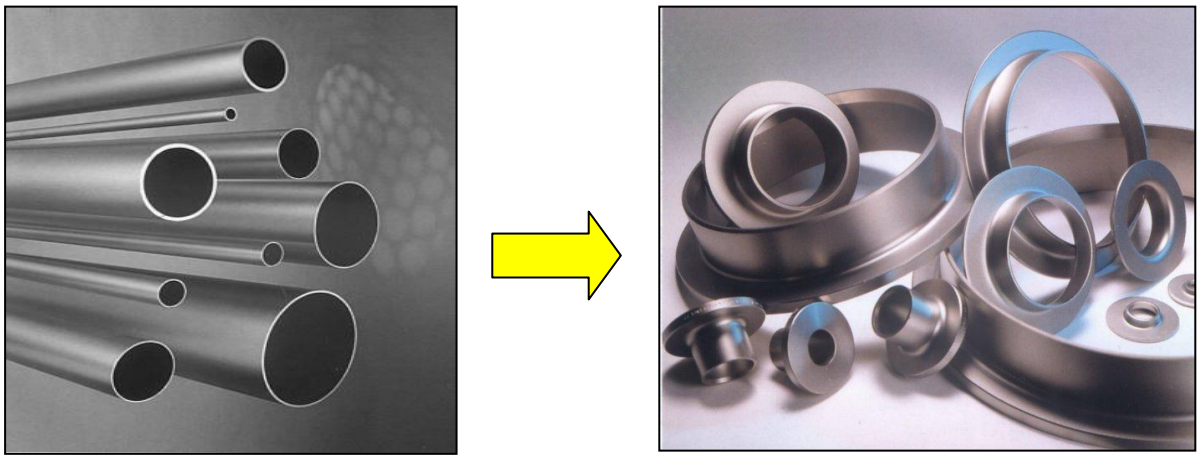
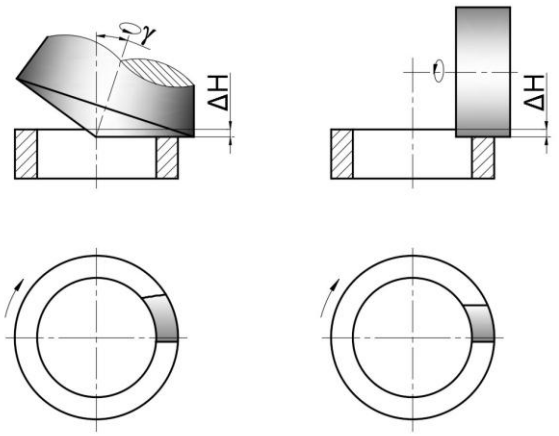


Рис. 1. Исходный материал для торцевой раскатки и раскатанные детали

Большими преимуществами обладает холодная торцевая раскатка, не требующая нагрева и характеризуемая высокой точностью и хорошим качеством обрабатываемых поверхностей. Естественно, что при холодной раскатке технологическое усилие будет выше, чем при горячей раскатке, а

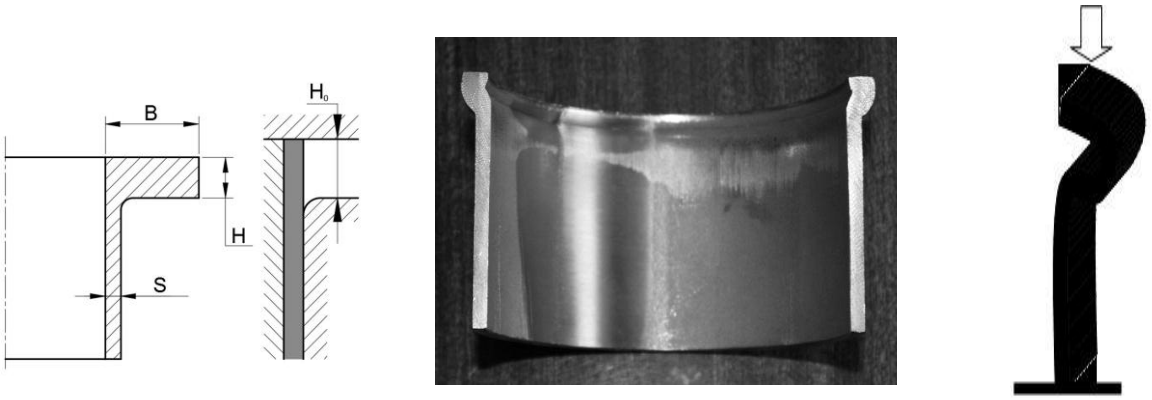
пластичность деформируемого металла ниже, что предъявляет более высокие требования к их анализу [9]. В настоящее время процессы раскатки распространены по всему миру, а машины для их реализации производятся во всех промышленно развитых странах [10, 11]



а. *б*.

Рис. 2. Схемы процесса торцевой раскатки коническим (а) и цилиндрическим валком (б)

В настоящей работе рассматривается изготовление фланцев с толщиной фланцевой части больше толщины стенки заготовки. Фланцы с толщиной фланцевой части около толщины исходной заготовки могут быть успешно получены с применением технологии раскатки с отбортовкой [12]. Утолщенные фланцы с незначительной шириной фланца (менее двух толщин стенки исходной заготовки) могут быть изготовлены раскаткой с осадкой выставленной части заготовки [13-14]. Проблему представляет получение утолщенных фланцев с достаточно развитой шириной фланца. Рекомендуемая величина выставляемой части H_0 определяется устойчивостью заготовки и не превышает величины $2S$, где S – толщина стенки заготовки (Рис. 3, *а*). При такой величине выставленной части ее объема не хватает для формирования требуемой геометрии фланца, а высота выставляемой части заготовки не может быть увеличена из-за потери устойчивости заготовки, которая приводит к образованию складки и закатке трещины на внутреннюю часть фланца (Рис. 3, *б*). Картина потери устойчивости весьма схожа с потерей устойчивости стержня под действием продольной силы (Рис. 3, *в*). Следует отметить, что для формообразования фланца толщиной H_0=1,5S и шириной фланца B=4S, требуется объем металла эквивалентный выставленной части заготовки H_0=4S, что практически при традиционных технологиях раскатки не реализуемо.



а *б* *в*

Рис. 3. Потеря устойчивости заготовки в начальный момент раскатки: *а* – заготовка в начальный момент раскатки; *б* – вид заготовки при потере устойчивости; *в* – деформация стержня под действием осевой силы.

В работе представлены результаты исследования двух технологий холодной торцевой раскатки, сочетающих основной принцип торцевой раскатки с многоступенчатой осадкой и радиальным выдавливанием.

Использованный инструмент для раскатки

Схемы раскатки утолщенных фланцев могут быть реализованы с использованием, как конического раскатного валка, так и цилиндрических валков (Рис. 4). Рекомендуемая величина единичной подачи заготовки зависит от толщины стенки заготовки и составляет $\Delta L \leq (0{,}5...0{,}6)S$, где S – толщина стенки заготовки.

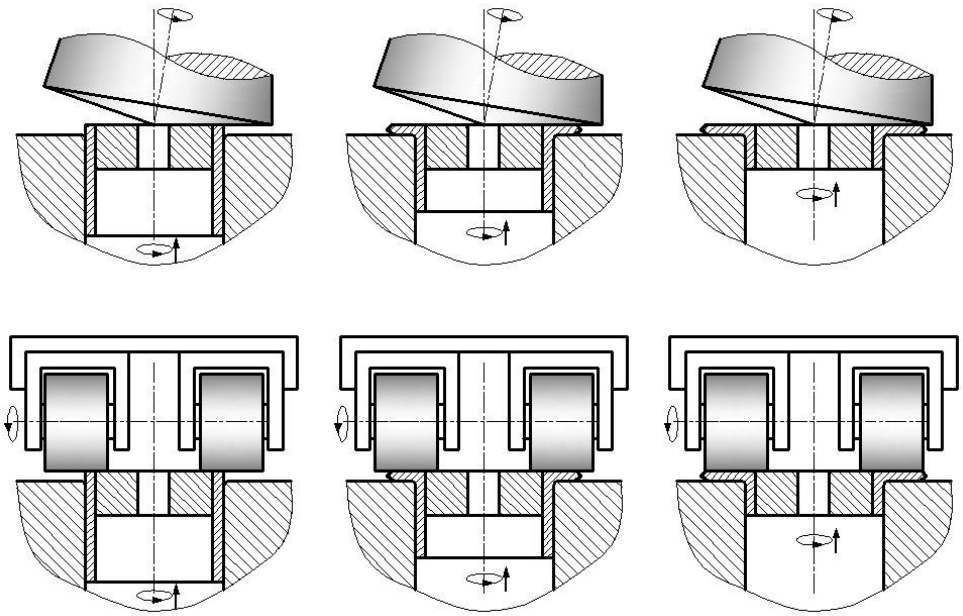


Рис. 4. Схема раскатки утолщенных фланцев коническими и цилиндрическими валками

Конические валки имеют более сложную геометрию, и их размер связан с размерами раскатываемых деталей. Диаметр цилиндрических валков не зависит от размеров раскатываемой детали, а только от конструктивных особенностей раскатной машины. Вращательное движение заготовки осуществляется приводом машины, в то время как раскатной валок может приводиться в движение от раскатываемой заготовки благодаря трению или иметь собственный привод. Для реализации технологического процесса раскатки заготовка помещается в матрицу с радиальным зазором не более 0,3 мм, необходимым для фиксирования заготовки в период раскатки. На начальной стадии раскатки заготовка фиксируется благодаря трению между заготовкой и раскатным роликом. Далее заготовка запрессовывается в матрице, что обеспечивает передачу необходимого крутящего момента для вращения раскатного валка. При раскатке профиль детали формируется в пространстве между матрицей, оправкой и раскатным валком. Матрица и раскатной валок изготавливаются из инструментальной стали и закаливаются до твердости *HRC*=56-63. Шероховатость инструмента определяет качество поверхности раскатываемых деталей и должна быть не хуже 0,63 *Ra*.

Технология раскатки, совмещенной с многостадийной осадкой

При этой технологии заготовка выставляется над матрицей на некоторую величину H_0, далее раскаткой осуществляется деформирование заготовки с образованием фланца толщиной – H (Рис. 5). Поскольку за один этап добиться формирования фланца требуемой ширины не удается, то заготовка вновь поднимается и вновь раскатывается. Так повторяется несколько раз, пока не будет получен фланец требуемой ширины.

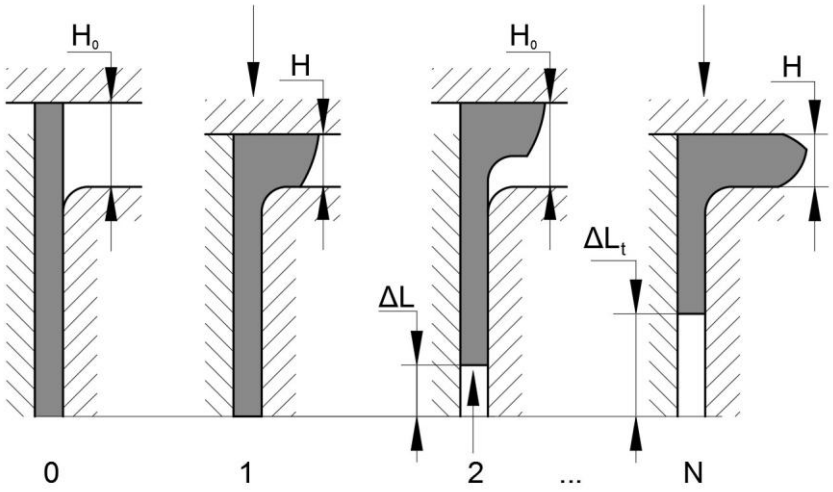
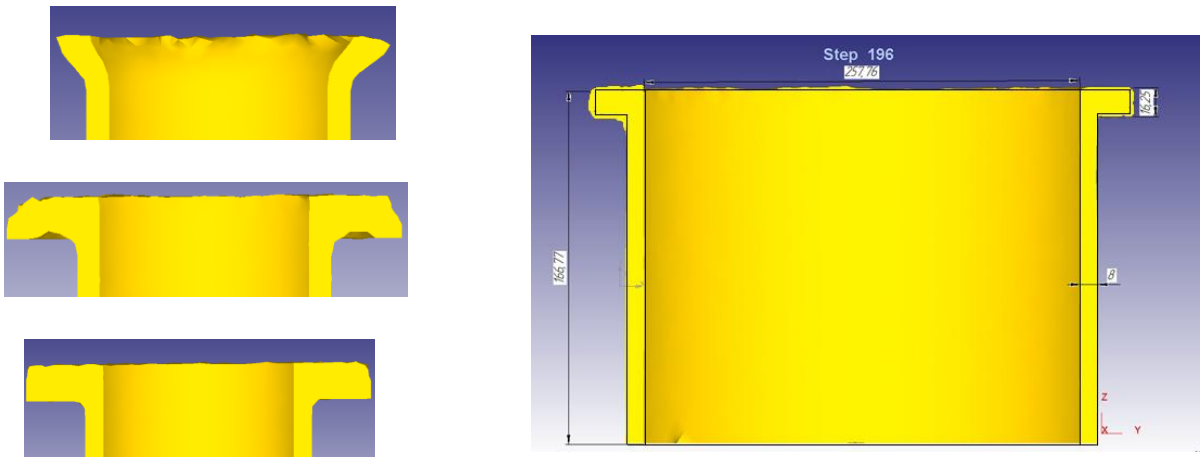


Рис. 5. Схема раскатки утолщенных фланцев с многостадийной осадкой: ΔL – подача заготовки на каждом этапе осадки; ΔL_t - суммарная подача заготовки

Таким образом, приведенная технология является дискретной. После каждой осадки требуется остановка раскатки и подъем заготовки на новую высоту. При этом физический контакт заготовки с валком может сохраняться, но раскатка не производится. Число ступеней осадок определяется геометрией изготавливаемого фланца и составляет 5-15. Время раскатки на одной стадии – 5-10 сек. Первоначально заготовка выставляется на небольшую высоту (1,5-2,0)*S*, при которой исключается потеря устойчивости заготовки. На дальнейших стадиях, когда набрана часть фланца, эта высота может быть увеличена до (2,0-2,5)*S*, что обеспечивает получение фланцев с размерами H=(1,2 – 1,3)S и B=(5-7)S.

Моделирование процесса раскатки в программном продукте Deform 3D, что позволило проанализировать напряженно-деформированное состояние заготовки в течение всего процесса раскатки. Конечно-элементное моделирование процесса торцевой раскатки эффективно использовалось многими учеными [16-18], однако оно имеет некоторые особенности, увеличивающие время расчетов [19]. На рис. 6 представлены различные стадии процесса формообразования фланца из трубной заготовки диаметром 250 мм, с толщиной стенки 7 мм раскатанной коническим валком с углом наклона $\gamma = 10^0$. Величина единичной подачи ΔL= 0,3 мм. Скорость вращения матрицы с установленной в ней заготовкой n=100 об/мин. Моделирование показало устойчивость процесса формообразования фланцевой части требуемых размеров и достаточный резерв пластичности металла для деформации без разрушения.



а *б*

Рис. 6. Моделирование формообразования фланца при раскатке с многостадийной осадкой трубной заготовки (*а*) и сопоставление раскатанного профиля с требуемым профилем фланца (*б*)

Технология раскатки, совмещенной с радиальным выдавливанием

Эта технология, в отличие от предшествующей, является непрерывной. На первой стадии она идентична технологии раскатки,

совмещенной с многоступенчатой осадкой, т.е. выставляется некоторая величина заготовки, обеспечивающая ее однократную осадку без потери устойчивости. Далее устанавливается постоянный зазор между раскатным валком и матрицей, а заготовка непрерывно подается (подталкивается) навстречу валку, обеспечивая заполнение металлом фланцевой части детали (Рис. 7). Технология требует устройства осевой подачи заготовки достаточно большого усилия, так как оно должно обеспечивать осевое продвижение заготовки, преодолевая силы трения в оснастке, но и быть достаточным для радиального выдавливания заготовки в канал, образованный валком и матрицей.

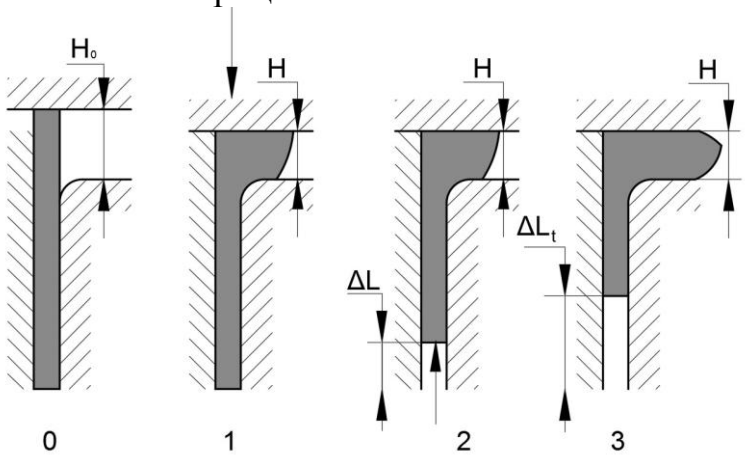
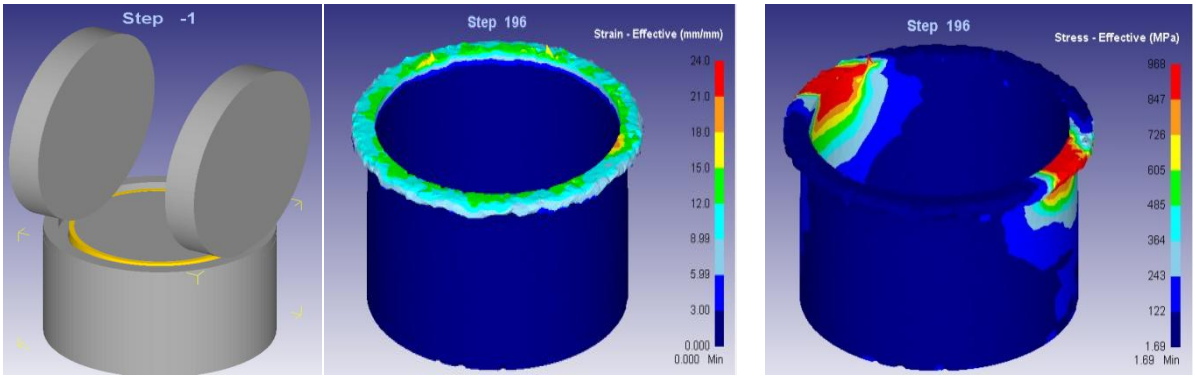


Рис. 7. Схема раскатки утолщенных фланцев с выдавливанием: ΔL–подача заготовки на один оборот заготовки; ΔL_t – суммарная подача; H– толщина фланца; стадии раскатки: 0 – начальная, 1,2 – промежуточные, 3 – окончательная

Моделирование процесса раскатки в программном продукте *Deform 3D* позволило проанализировать напряженно-деформированное состояние заготовки в течение всего процесса раскатки. На Рис. 8. представлена информация о моделировании процесса формообразования фланца из трубной заготовки (бесшовная труба ГОСТ 9941-81 из материала 10Х23Н18) с внутренним диаметром 250 мм, с толщиной стенки 7 мм, раскатанной двумя цилиндрическими валками. Величина подачи ΔL=4,0 мм/об. Скорость вращения матрицы с установленной в ней заготовкой n=60 об/мин. Моделирование показало устойчивость процесса формообразования фланцевой части требуемых размеров и достаточный резерв пластичности металла для формообразования фланцев.



а *б* *с*

Рис. 8. Моделирование раскатки фланца двумя цилиндрическими валками при непрерывной подаче трубной заготовки: *а* – расчетная схема; *б* – значения интенсивности деформаций; *в* – интенсивности напряжений.

Обсуждение полученных результатов

Представленные технологии позволили раскатать различные фланцы в диапазоне размеров DN 150 - DN 450, соответствующих европейским стандартам 42.05.04 и 42.05.07. Пример раскатанного фланца из трубной заготовки диаметром 219,1 мм и толщиной стенки – 7,8мм приведен на Рис. 9. Толщина фланца – 9,5 мм, ширина фланца – 31 мм, радиус перехода от трубной части к фланцевой *R*=12,7 мм, материал AISI 316. Кинематическая схема раскатной машины, обеспечивающей реализацию технологий комбинированной раскатки, приведена на Рис. 10.

Рис. 9. Фланец, раскатанный из трубной заготовки диаметром 219,1 мм

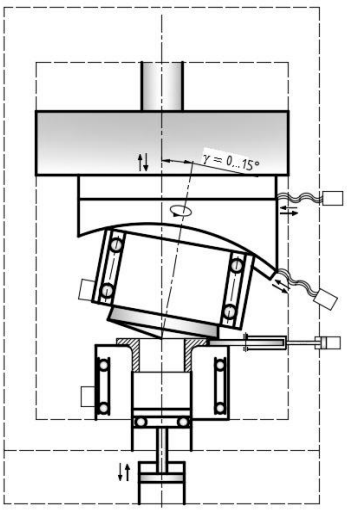


Рис. 10. Кинематическая схема машины для комбинированной раскатки

Исследованиями было установлено, при раскатке некоторых типов фланцев, в основном толстых, но не широких, возникают две проблемы

точного формирования геометрии фланца. Первая это формирование наружного среза фланца. Эта проблема успешно решается при использовании раскатных валков с ребордой, которая останавливает течение металла от центра фланца к его периферии и способствует формированию ровной боковой поверхности фланца. Вторая проблема связана с формированием внутреннего прямого угла фланца (перехода торцевой поверхности фланца во внутренний диаметр трубной заготовки). Этот угол иногда формируется не полностью, так как основное течение металла при раскатке направлено во внешнюю сторону фланца. Этот внутренний угол может быть сформирован на последней стадии процесса, когда деформируемый металл находится в замкнутом пространстве, ограниченным инструментом – раскатным валком с ребордой, матрицей и оправкой. Однако формирование внутреннего угла в условиях неравномерного всестороннего сжатия требует значительного увеличения потребного усилия деформирования. При компьютерном моделировании процесса было использовано именно такое решение, и оно показало хорошее формообразование фланца.

Другим возможным путем формирования внутреннего угла фланца является изменение направления течения металла на последних этапах раскатки путем смещения валков относительно оси заготовки [20, 21]. При этом первоначально добиваются полного формообразования наружной части фланца, а затем течение металла перенаправляется во внутреннюю зону фланца. Потребное усилие раскатки в этом случае меньше, но требуется реализовать перемещение раскатного валка (или валков) в процессе раскатки.

Раскатанные фланцы в дальнейшем подвергаются незначительной механической обработке по торцевой и боковой поверхностям фланцевой части. Коэффициент использования металла при технологии раскатки с выдавливанием, многостадийной осадки или их комбинации составляет около 95%. Комбинированные технологии раскатки могут быть успешно реализованы на раскатных машинах современного поколения, имеющих числовое программное управление и, в том числе, многокоординатное движение инструмента [22].

Выводы

- Комбинированные технологии торцевой раскатки позволяют существенно расширить технологические возможности торцевой раскатки и получать утолщенные фланцы из трубных заготовок.
- Технология торцевой раскатки с многоступенчатой высадкой эффективная для изготовления утолщенных фланцев в диапазоне размеров DN 150 - DN 450, соответствующих европейскому стандарту 42.05.07. Технология предназначена для современных раскатных машин с программным управлением.

- Технология торцевой раскатки с радиальным выдавливанием обеспечивает получение изготовления утолщенных фланцев в диапазоне размеров DN150 – DN 300, соответствующих европейскому стандарту 42.05.04. Для реализации этой технологии требуется выталкиватель заготовки повышенного усилия.
- Геометрия раскатываемых фланцев может быть значительно улучшена при применении раскатных валков с ребордой и активным управлением течением металла в процессе раскатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han X., Hua L. Comparison between cold rotary forging and conventional forging, Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2009, pp. 2668-2678.
2. Plancak M. E., Vilotic D.Z., Stefanovic M.C., Movrin D.Z., Kacmarcik I.Z. Orbital forging – a plausible alternative for bulk metal forming. Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 35-38.
3. Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology, *International Journal Material Forming*, Supp. 1, 2008, pp.387-390.
4. Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R. Incremental bulk metal forming. *Annals of the CIRP*, 56, 2007, pp.635-656.
5. Standring P.M. The significance of nutation angle in rotary forging. *Advanced Technology of Plasticity*, *Proceeding of the 6th ICTP*, Vol. III, 1999, pp.1739-1744.
6. Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology. International Journal Material Forming, Supp. 1, (2008), pp.387-390.
7. Slick E.E. The Slick Wheel Mill, *The Iron Age, Vol. 102, # 9*, pp.491-498, 1918.
8. Massey H.F. British Patent Specification, #319065, 1929.
9. Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. *Materials and Design*, No.32, 2011, pp.1376-1389.
10. Global Metal Spinning Solutions Inc. CNC Wheel Forming and Rotary Forging Machines. [Электронный ресурс] //URL: http://www.globalmetalspinning.com/ (дата обращения 10.04.2016).
11. Orbitform Group. Roller Forming. [Электронный ресурс] // URL: http://www.orbitform.com/ (дата обращения 29.03.2016).
12. Aksenov L.B., Kunkin S.N. Cold axial rotary outward-flanging of tube blanks by cylindrical rollers. *Global Science and Innovation: materials of the III International Scientific Conference*, / Accent Graphics communications- Chicago-USA, 2014, pp.306-310.

13. Aksenov L.B., Kunkin S.N. Cold axial rotary forging of hollow shaft flanges. *European Science and Technology: materials of the VII international research and practice conference*, Vol. II, Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2014, pp.393-396.
14. Аксенов Л.Б., Елкин Н.М., Кункин С.Н. Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений, Металлообработка, № 3(63), 2011, с. 31–36.
15. Аксенов Л.Б., Кункин С.Н. Развитие процессов торцевой раскатки в Санкт-Петерургском государственном политехническом университете, Цветные металлы, №4, 2014, с. 24-28.
16. Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. *Materials and Design*, No.32, 2011, pp.1376-1389.
17. Liu G., Yuan S., Zhang M. Numerical Analysis on Rotary Forging Mechanism of a Flange. Journal of Material Science Technololy, Vol. 17, No.1, 2001, pp.129-131.
18. Wang G. C., Zhao G. Q. Simulation and analysis of rotary forging a ring workpiece using finite element method, Finite. Elem. Anal. Des. 38 (12), 2002, pp. 1151-1164.
19. Munshi M., Shah K., Cho H., Altan T. Finite element analysis of orbital forming used in spindle/inner ring assembly. 8th ICTP 2005 — International Conference on Technology of Plasticity, Verona, October 9–13th 2005.
20. Evgrafov A. (ed.). Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing Switzerland, 2016, p.175-181, DOI 10.1007/978-3-319-29579-4.
21. Современное машиностроение: наука и образование**:** материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014, с.608-614.
22. MJC Engineering & Technology. Rotary Forging Equipment. [Электронный ресурс] // URL: http://www.mjcengineering.com/ (дата обращения 13.04.2016).

L.B.Aksenov[1], S.N.Kunkin[1]

THE COMBINED COLD AXIAL ROTARY FORGING OF THICK HOLLOW FLANGES

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper presents the research of two technologies of the cold axial rotary forging, which combine the traditional rotary forging with a multistage upsetting and radial extrusion. Technologies are developed for the manufacture

of thick flanges, i.e. the flanges thicker than the wall thickness of the original pipe workpiece, when the process is limited by the buckling of the workpiece. The proposed technologies provide stability of the workpieces during processing and allow manufacturing the flanges with dimensions DN 150 - DN 450 of the European Standards 42.05.04, 42.05.07. Rotary forging can be carried out as with conical or cylindrical rolls. Shown the results of modeling technologies in simulation complex Deform 3D. The proposed technology is particularly effective for the production of flanges from tube blanks, including stainless steel, to connect which they are intended.

Key words: axial rotary forging, multistage upsetting, radial extrusion, stability of the workpiece, hollow flanges, conical roll, cylindrical rolls, computer simulation.

REFERENCES

[1] Han X., Hua L. Comparison between cold rotary forging and conventional forging, Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2009, pp. 2668-2678.
[2] Plancak M. E., Vilotic D.Z., Stefanovic M.C., Movrin D.Z., Kacmarcik I.Z. Orbital forging – a plausible alternative for bulk metal forming. Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 35-38.
[3] Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology, *International Journal Material Forming*, Supp. 1, 2008, pp.387-390.
[4] Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R. Incremental bulk metal forming. *Annals of the CIRP*, 56, 2007, pp.635-656.
[5] Standring P.M. The significance of nutation angle in rotary forging. *Advanced Technology of Plasticity*, *Proceeding of the 6th ICTP*, Vol. III, 1999, pp.1739-1744.
[6] Nowak J., Madej L., Ziolkiewicz S., Plewinski A., Grosman F., Pietrzyk M. Recent development in orbital forging technology. International Journal Material Forming, Supp. 1, (2008), pp.387-390.
[7] Slick E.E. The Slick Wheel Mill, *The Iron Age, Vol. 102, # 9*, 1918, pp.491-498.
[8] Massey H.F. British Patent Specification, #319065, 1929.
[9] Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. *Materials and Design*, No.32, 2011, pp.1376-1389.
[10] Global Metal Spinning Solutions Inc. CNC Wheel Forming and Rotary Forging Machines. Retrieved: http://www.globalmetalspinning.com/ (accessed 10.04.2016).
[11] Orbitform Group. Roller Forming. Retrieved: http://www.orbitform.com/ (accessed 29.03.2016).

[12] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Cold axial rotary outward-flanging of tube blanks by cylindrical rollers. *Global Science and Innovation: materials of the III International Scientific Conference*, / Accent Graphics communications- Chicago-USA, 2014, pp.306-310.
[13] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Cold axial rotary forging of hollow shaft flanges. *European Science and Technology: materials of the VII international research and practice conference*, Vol. II, Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2014, pp.393-396.
[14] Aksenov L. B., Elkin N. M., Kunkin S. N. Tortsevaya raskatka flantsevyih detaley trubnyih soedineniy // Metalloobrabotka, (in Russian), No. 3 (63), 2011, pp. 31–36.
[15] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Razvitie processov torcevoyj raskatki v Sankt-Peterburgskom gosudarstvennom politekhnicheskom universitete, *Cvetnihe metalli* (in Russian), No.4, 2014, pp.24-28.
[16] Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. *Materials and Design*, No.32, 2011, pp.1376-1389.
[17] Liu G., Yuan S., Zhang M. Numerical Analysis on Rotary Forging Mechanism of a Flange. Journal of Material Science Technololy, Vol. 17, No.1, 2001, pp.129-131.
[18] Wang G. C., Zhao G. Q. Simulation and analysis of rotary forging a ring workpiece using finite element method, Finite. Elem. Anal. Des. 38 (12), 2002, pp. 1151-1164.
[19] Munshi M., Shah K., Cho H., Altan T. Finite element analysis of orbital forming used in spindle/inner ring assembly. 8th ICTP 2005 — International Conference on Technology of Plasticity, Verona, October 9–13th 2005.
[20] Evgrafov A., (ed.). Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing Switzerland, 2016, p.175-181, DOI 10.1007/978-3-319-29579-4.
[21] Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie: Materialyi 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014, pp.608-614.
[22] MJC Engineering & Technology. Rotary Forging Equipment. Retrieved: http://www.mjcengineering.com/ (accessed 13.04.2016).

УДК 539.295; DOI 10.1872/MMF-2016-98

Н.Р.Варгасов[1], М.М.Радкевич[2]

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

[1]Николай Рафаилович Варгасов – д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812)554-2737,
E-mail: nikolai.vargasov@gmail.com.

[2]Михаил Михайлович Радкевич – д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812)492-7658,
E-mail:radmich@mail.ru.

Аннотация

Экспериментально исследовано механическое поведение однофазных и двухфазных титановых сплавов при деформации растяжением в широком диапазоне температур 840÷860°С и скорости деформации $1{,}1\cdot10^{-3}$ $с^{-1}$. Установлено, что в двухфазном титановом сплаве наблюдаются все признаки сверхпластичного поведения при данных температурно-скоростных условиях. Показано также, что при этих условиях деформация титановых сплавов сопровождается изменением исходной пластинчатой структуры в зернистую, т.е. в сплавах формируется мелкозернистая структура, обеспечивающая реализации состояния сверхпластичности.

Ключевые слова: титановые сплавы, растяжение, сверхпластичность, диссипация, реология.

Исследованиям поведения титановых сплавов при температурах горячего деформирования посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, которые обобщены в монографиях [1-3]. Такое внимание к титановым сплавам объясняется прежде всего тем, что эта группа конструкционных материалов обладает рядом уникальных свойств: высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и т.д. Если несколько десятилетий назад титан и его сплавы использовали преимущественно в военном кораблестроении и авиастроении, то в настоящее время открываются возможности для использования титана и его сплавов, как для систем различного назначения в судостроении и машиностроении [4], так и для изготовления корпусов

глубоководных аппаратов [5,6], которые используют для исследования шельфа мирового океана.

Следует отметить некоторые технологические особенности титановых сплавов, которые позволяют снизить затраты на производство титановых полуфабрикатов. Прежде всего, это обнаруженный в титановых сплавах эффект сверхпластичности [7-8]. Большинство исследователей отмечают, что титановые сплавы без какой-либо специальной подготовки структуры характеризуются низким сопротивлением деформации и высокими показателями пластичности при определенных температурно-скоростных условиях деформирования. Такая «природная» сверхпластичность обусловлена тем, что благодаря фазовому превращению при нагреве и охлаждении в титановых сплавах формируется достаточно мелкое стабильное зерно, а том случае, если в структуре сплава присутствует значительное количество β-фазы (20-30 %). Обзор работ, посвященных исследованиям сверхпластичности титановых сплавов, позволяет сделать вывод о том, что состояние сверхпластичности наблюдается, как правило, в двухфазных титановых сплавах при температурах 850÷950°С и скоростях деформации $10^{-3}\div10^{-2}$ $с^{-1}$. Однако до настоящего времени нет четкого представления о закономерностях физической природы устойчивости сверхпластичности при деформации на макроскопическом и микроскопическом уровнях. Часто наблюдаемая неустойчивость пластичности при горячей деформации сказывается на поведении титановых сплавов, связанной с неоднородностью деформации и локализацией деформации.

Целью данной работы является исследование влияния температурно-скоростных условий деформирования на сопротивление пластической деформации и показатели пластичности титановых сплавов различных классов, а также исследование фазовых и структурных превращений, происходящих при деформации сплавов и их влияние на устойчивость пластической деформации.

Для проведения исследований использовали титановые сплавы, марочный химический состав которых приведен в табл. 1. Образцы для испытаний на растяжение и сжатие вырезали из горячекатаного листа в направлении прокатки. Исследования сплавов проводили как в отожженном состоянии, так и в исходном состоянии, полученном прокаткой в двухфазной области температур.

Размер зерна и фазовый состав после прокатки и отжига сплавов представлен в табл. 2, а микроструктура сплава 3В в исходном горячекатаном состоянии представлена на рис. 1.

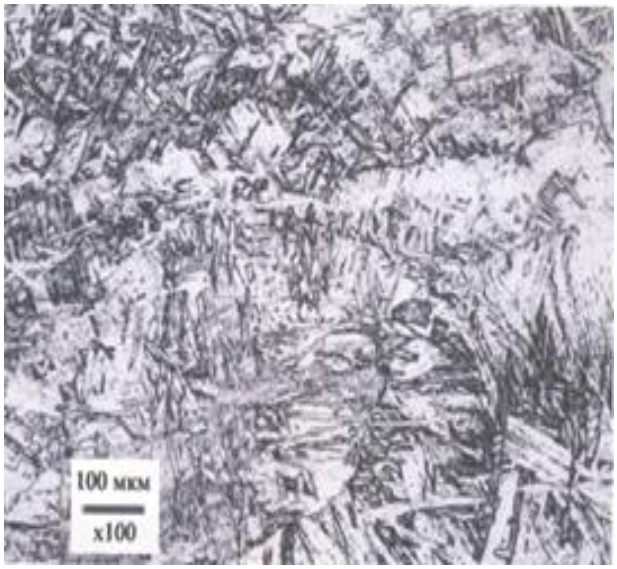


Рис. 1. Микроструктура сплава 3В в исходном горячекатанном состоянии

Таблица 1.

Химический состав титановых сплавов.

Условная марка ровка	Химический состав, %										
	Al	V	Mo	Cr	Fe	Si	C	O	H	N	Ti
3В	3,5-5,0	1,2-2,5	–	–	<0,25	<0,30	<0,10	<0,15	<0,08	<0,04	ост.
5В	5,4	1,0-1,9	0,7-1,4	–	<0,13	<0,12	<0,14	<0,15	<0,08	<0,04	ост.
23	5,0	4,4	2,0	1,2	0,60	<0,12	<0,14	<0,15	<0,08	<0,04	ост.

Таблица 2.

Размер зерна и фазовый состав сплавов после отжига.

Сплав	Размер зерна, мкм		Фазовый состав, %	
	α	β	α	β
3В	11,0	6,1	96	4
5В	8,0	4,4	90	10
23	2,1	3,0	70	30

Проведение исследования по влиянию температурно-скоростных условий деформирования на показатели пластичности и сверхпластичности осуществляли на сплавах с различной исходной структурой.

Для установления влияния температурно-скоростных условий деформирования на сопротивление деформации сплавов по результатам эксперимента были построены зависимости истинного напряжения от истинной деформации при заданной скорости деформации.

Из диаграмм «напряжение–деформация» сплавов видно, что в исследуемом диапазоне температурно-скоростных условий испытаний кривых можно условно выделить две группы. Одна группа показывает зависимость низких температурах и высоких скоростях деформации при этом напряжение течения непрерывно повышается с ростом деформации, что обусловлено деформационным упрочнением. Другая – при повышенных температурах и низких скоростях деформации. При этом случае напряжение течения возрастает до максимума, а затем понижается, достигнув определенного постоянного значения. Такой вид диаграмм «напряжение–деформация» характерен для большинства металлов и сплавов, деформируемых при температурах больше 0,5 Тпл.

Относительное удлинение сплавов в зависимости от температуры и скорости деформации (рис.2 и 3) характеризуется явно выраженным максимумом в интервале температур 850÷900°С и скоростей деформации 10^{-3}÷10^{-2} $с^{-1}$. Результаты испытаний показали, что относительное удлинение сплава 23А достигает максимальных значений 450÷500 %, для сплава 5ВА максимальное относительное удлинение составило 150÷180 % (в отдельных сериях опытов относительное удлинение повышалось до 250 %). Что касается сплава 3В, то он обладает невысоким значением относительного удлинения и слабой (по сравнению со сплавами 23 и 5В) зависимостью относительного удлинения от температуры и скорости деформации.

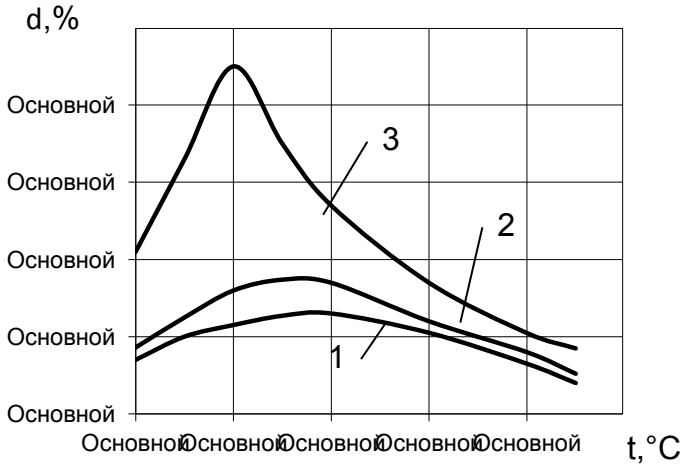


Рис. 2.Зависимость относительного удлинения от температуры, ε'=10^{-3} $с^{-1}$. 1 – сплав 3В,

2 – сплав 5В, 3 – сплав 23.

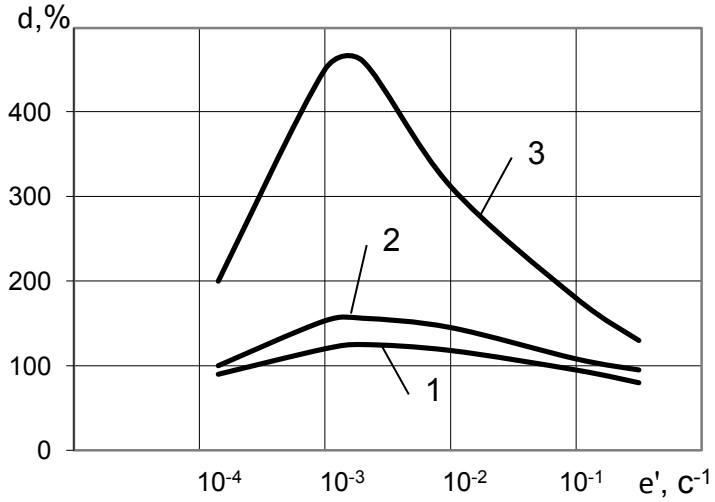


Рис. 3.Зависимость относительного удлинения
от скорости деформации при температуре 840°С.
1 – сплав 3В, 2 – сплав 5В, 3 – сплав 23.

Характер кривых относительного удлинения от температуры и скорости деформации сплава 23 явно указывает на явление сверхпластичности данного сплава при деформации.

Известно [9,10,11,12], что эффективность диссипации энергии является универсальным индикатором структурных и фазовых превращений, происходящих при горячей пластической деформации металлических сплавов.

Авторы работ [13,14,15] предполагают, что в любой момент времени горячей пластической деформации материала суммарная мощность вводимой механической энергии P может быть представлена в двух формах – деформационной G и микроструктурной J:

$$P = G + J = \int \sigma d\dot{\varepsilon} + \int \dot{\varepsilon} d\sigma. \qquad (1)$$

$G = \int \sigma d\dot{\varepsilon}$ характеризует долю энергии, расходуемой на макроскопическое формоизменение материала, обусловленное зарождением, движением и аннигиляцией дислокаций.

$J = \int \dot{\varepsilon} d\sigma$ представляет рассеяние механической энергии вследствие структурных превращений – аккомодации и модернизации структуры дефектов кристаллического строения. Величина J оценивается через показатель скоростной чувствительности $m = \Delta(\lg\sigma) / \Delta(\lg\dot{\varepsilon})$ как:

$$J = \sigma \dot{\varepsilon} m / (m+1) \qquad (2)$$

Для количественной оценки рассеяния механической энергии использовали безразмерный параметр η, который рассчитывается из соотношения:

$$\eta = J / J_{max} = 2m / (m+1), \qquad (3)$$

где максимальное значение $J_{max} = 0{,}5\sigma\dot{\varepsilon}$ при $m = 1$.

Параметр η, известный как коэффициент эффективности диссипации энергии, изменяется в интервале (0,1) или (0, 100%). В терминах синергетики его значения можно интерпретировать как относительную скорость производства внутренней энтропии. Минимальная величина (η=0÷0,1) соответствует нестабильному и термодинамически неравновесному состоянию деформируемого материала [16]. Во всех остальных случаях в поле деформационно-температурных параметров горячей деформации (ε– έ – T) вариация значений η характеризуется способностью субмикроструктуры рассеивать подводимую механическую энергию. Результаты математической обработки диаграмм σ(ε) сплава 23 при έ = var и T = var с последующим вычислением значений η представлен в таблице 3.

Полученные результаты позволяют отметить, что основные закономерности (зависимости) эффективности диссипации энергии от температурно-скоростных условий деформирования состоят в следующем.

1. Температурная зависимость η характеризуется максимумом при температурах 840÷920°C. Причем с увеличением скорости деформации наблюдается смещение максимума в сторону больших скоростей деформации.

2. Особенности поведения эффективности диссипации, описанные выше, существенно не изменяются с увеличением истинной степени деформации с 0,1 до 0,4.

3. Сплав 23А характеризуется наибольшей эффективностью диссипации энергии в исследованных температурно-скоростных условиях деформирования.

Таблица 3.

Эффективность диссипации энергии при деформировании растяжением сплава 23

t, °C	Скорость деформации, c^{-1}			
	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
720	0,39	0,36	0,18	0,09
760	0,45	0,47	0,26	0,10
800	0,51	0,50	0,29	0,12
840	0,53	0,64	0,34	0,15
880	0,50	0,60	0,36	0,16
920	0,51	0,53	0,38	0,17
960	0,50	0,51	0,26	0,18
1000	0,44	0,42	0,24	0,12
1040	0,33	0,38	0,22	0,10

Металлографические исследований изменений структуры (рис. 4) сплавов при различных температурах и степенях деформации показали, что наиболее характерными изменениями структуры при деформации сплавов являются изменение размеров зерен и фазового состава (табл.4).

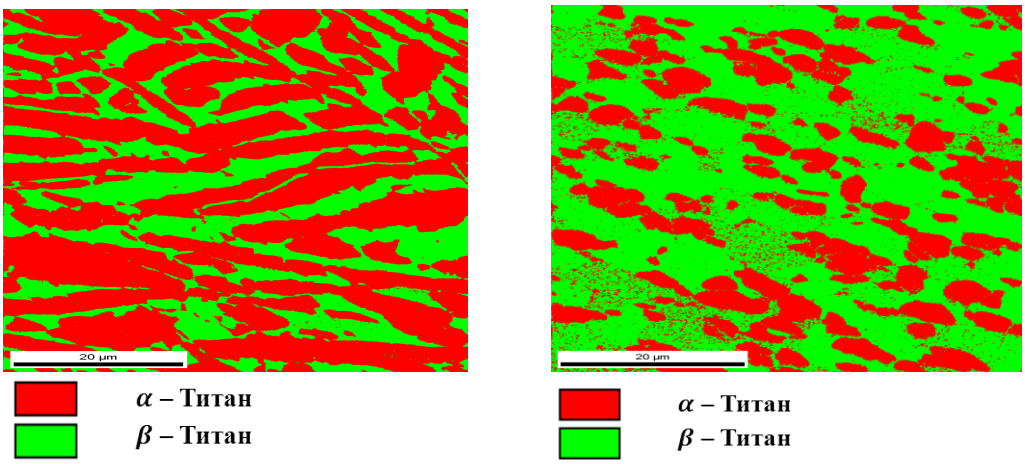


Рис. 4. Микроструктура сплава 23 до (а) и после (б) сверхпластической деформации при температуре 850°С.

Из фотографий видно, что размер зерен α-фазы уменьшается, а размер зерен β-фазы соответственно увеличивается. При этом увеличение размера зерна при деформации происходит интенсивнее, чем во время выдержки при температуре испытания. Интенсивность изменения величины зерна при деформации в сплавах различно. Например, в сплаве 3В оно протекает более интенсивно, чем в сплаве 23А. Более стабильная микроструктура сплава 23А, по-видимому, обусловлена большим содержанием β-фазы в исследованном температурном диапазоне.

Как следует из табл. 4, в процессе деформации сплава происходит увеличение количества β-фазы. Наиболее значительная разница в соотношении наблюдается при скоростях деформации 10^{-3} $с^{-1}$. Установлено, что увеличением скорости деформации изменение количества β-фазы по сравнению с исходным было менее существенно. Увеличение степени деформации вызывает фазовое превращение в сплаве уже на начальных стадиях процесса деформирования. Так, при степени деформации до 0,4 количество β-фазы возрастает на 12÷20 %, то снижение деформации меньше 0,4 только на 3÷4 %.

Изменение количества α- и β-фаз в процессе деформации часто связывают с интенсификацией диффузионных процессов. Автор работы [3] установил, что деформация нагрева с температуры из-за сравнительно низкой диффузионной подвижности β-стабилизирующих элементов не обеспечивает фазовое равновесие. Например, если для достижения 49% содержания β-фазы при температуре 950°С требуется выдержка 30 мин, то

практически такое же количество β-фазы отмечается после 2,5 мин деформации на 50%.

Таблица 4.

Размер зерен и фазовый состав сплава 23 после деформации при различных температурах.

t, °C	Размер зерна, мкм								Фазовый состав, %			
	ε=0				ε=0,4				ε=0		ε=0,4	
	I		II		I		II					
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
800	12,7	4,7	6,8	2,4	6,6	5,5	3,6	2,5	70	30	54	46
840	11,0	4,9	6,6	3,0	7,9	7,7	4,3	4,2	72	28	52	48
900	10,4	6,7	6,8	5,1	9,9	12,5	6,7	6,9	75	25	42	58

Примечание: I – продольное направление, II – поперечное направление.

Однако, изменение фазового состава имеет место преимущественно на начальной стадии деформации. Последнее обстоятельство позволяет сделать предположение, что причиной фазового превращения является не увеличение диффузионной подвижности атомов, вызываемое деформацией, а изменение температуры фазового равновесия при действии внешнего напряжения.

В общем случае, для двухфазных сплавов сопротивление деформации можно представить в виде:

$$\sigma = \lambda\sigma_\alpha + (1-\lambda)\sigma_\beta, \qquad (4)$$

где λ – доля α-фазы.

Сопротивление деформации α-фазы можно определить из выражения:

$$\sigma_\alpha = \sigma_{0\alpha} + \sigma_{1\alpha} + \sigma_{2\alpha} + \sigma_{3\alpha} + \sigma_{4\alpha} + k_\alpha / \sqrt{d_\alpha} \qquad (5)$$

где σ_0, σ_1, σ_2, σ_3, σ_4 – вклад в сопротивление деформации решетки, примесей внедрения, легирующих элементов, точечных и линейных дефектов соответственно, $k_\alpha / \sqrt{d_\alpha}$ – вклад в сопротивление деформации границ.

Аналогичную зависимость можно записать для сопротивления деформации β-фазы. Если учесть, что первые четыре слагаемые в уравнении (5) температурно зависимы и мало зависят от степени деформации, то сопротивление деформации α- и β-фаз можно представить в виде:

$$\sigma_\alpha = \sigma_{\alpha(T)} + \alpha G_\alpha b_\alpha \rho_\alpha^{1/2} + k_\alpha / d_\alpha^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_\beta = \sigma_{\beta(T)} + \beta G_\beta b_\beta \rho_\beta^{1/2} + k_\beta / d_\beta^{1/2} \quad (7)$$

где Gα, Gβ, bα, bβ, ρα, ρβ, – модули сдвига, векторы Бюргерса и плотности дислокаций в α- и β-фазах.

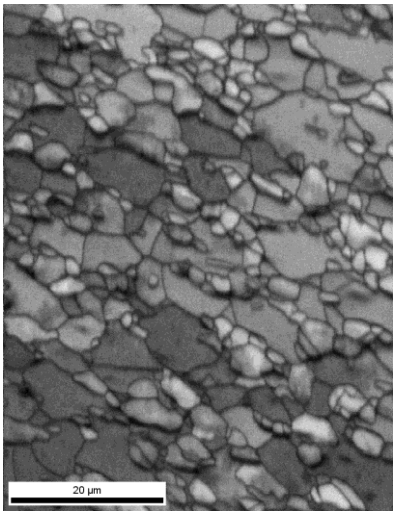


Рис. 5. Микроструктура сплава 23 после сверхпластической деформации (t=840°C, ε= 1,2)

При деформации двухфазных сплавов в различных температурно-скоростных условиях возможны, по крайней мере, два сценария эволюции структуры. Во-первых, когда $\sigma_\alpha=\sigma_\beta$, т.е. фазы равнопрочны, скольжение происходит в обеих фазах одновременно и сплав ведет себя как однофазный. Такая ситуация маловероятна и возможна в очень узком температурно-скоростном диапазоне. Наиболее вероятна ситуация, когда $\sigma_\alpha \neq \sigma\beta$. В этом случае, образующиеся на межфазных границах скопления дислокационных зарядов, могут инициировать зарождение дислокаций на другой стороне границы и, таким образом, осуществлять локализованный сдвиг более прочной фазы. При этом в месте сдвига возможно образование ступенек или, в особо неблагоприятных условиях, микропор. Механизмом, затрудняющим их образование, является локальная миграция межфазных границ, которая происходит в результате фазового превращения. По мере протекания выше названных процессов происходит разделение одной из фаз на мелкие составляющие, а за счет диффузионных процессов происходит их сфероидизация (Рис.5).

Суммируя сказанное, процесс деформации сплава 23А при температурно-скоростных условиях сверхпластичности можно условно разделить на три периода. При степени деформации менее 10% происходит скольжение в менее прочной β-фазы и накопление дислокаций на

межфазных границах, что приводит к упрочнению β-фазы и общего уровня действующих напряжений. При ε=40÷60% происходит разрушение пластин α-фазы и формирование мелкозернистой структуры вследствие рекристаллизации.

Таким образом, в процессе горячей деформации титановых сплавов в температурно-скоростных условиях пика эффективности диссипации энергии происходят два главных рассеивающих энергию процесса – это динамическая рекристаллизация и фазовое α→β превращение. Максимум на температурно-скоростной зависимости эффективности диссипации энергии показывает условия, при которых энергия, рассеивающаяся через динамическую рекристаллизацию, равна энергии рассеивающейся через фазовое превращение. Слева от этого максимума доминирует рекристаллизация, а справа доминирует фазовое превращение.

С увеличением температуры при переходе в однофазную область единственным диссипативным процессом является собирательная рекристаллизация. Поэтому температуру полного полиморфного превращения можно рассматривать как верхний предел для возможности реализации высоких значений эффективности диссипации энергии. Нижний предел температурной области высоких значений η определяется температурой начала динамической рекристаллизации.

Выводы

1. Установлено, что температурная зависимость эффективности диссипации энергии характеризуется максимумом. Сплав 23 характеризуется наибольшей эффективностью диссипации в исследованных температурно-скоростных условиях. Вид диаграмм эффективности диссипации существенно не изменяется с увеличением степени деформации от 0,1 до 0,3.

2. На основе экспериментальных исследований поведения титановых сплавов при различных температурно-скоростных условиях деформирования установлено, что в двухфазном титановом сплаве 23А наблюдаются все признаки сверхпластичного поведения при температуре 840÷860°С и скорости деформации $1{,}1\cdot10^{-3}с^{-1}$. В сплаве 5ВА характеристики сверхпластичности выражены слабее, а в сплаве ПТ–3В признаки сверхпластичности отсутствуют.

2. В результате исследований структурных изменений, происходящих при деформации сплавов, установлено, что в температурно-скоростных условиях пика эффективности диссипации происходят, по крайней мере два главных рассеивающих энергию процесса – это динамическая рекристаллизация и фазовое превращение.

3. Установлено, что в процессе горячей деформации титановых сплавов происходит трансформация исходной пластинчатой структуры в

зернистую, в результате которой в сплавах формируется мелкозернистая структура, необходимая для реализации состояния сверхпластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 280с.
2. Калачев Б.А. Физическое металловедение титана. – М.: Металлургия, 1996. – 184 с.
3. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 284 с.
4. Титановые сплавы в гражданском судостроении/ Ушков С.С., Брикер А.С., Зобачев Ю.Е. и др.// Судостроение. 1996. – №5 – с. 44-46.
5. Горынин И.В. Тенденции развития современного материаловедения// Судостроение. – 1996. – №10. – с. 132-135.
6. Использование высокопрочных сплавов титана для корпусов глубоководных аппаратов/ Рябов В.М., Хесин Ю.Д., Разуваева И.Н. и др.// Судостроение. – 1995. – №4. – с. 29-31.
7. Сверхпластичность титановых сплавов разных классов/ Бабарэко А.А., Эгиз И.В. и др//МиТОМ. – 1995. – №6. – с. 30- 35.
8. Горбунов В.С., Вальтер А.И., Федоткин И.П. Деформирование титана ВТ1–0 в условиях субструктурной сверхпластичности//МиТОМ. – 1988. – №12. с. 43-44.
9. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Оптимизация температурно- скоростных режимов пластической деформации по критерию диссипации механической энергии// Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №9. – с. 52-56.
10. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Аккумуляция и диссипация энергии при горячей пластической деформации титанового сплава//Вопросы материаловедения. – 1999. – №1(18). – с. 63-69.
11. Барахтин Б.К., Варгасов Н.Р., Лебедева Н.В., Рыбин В.В Структурные изменения в железе в условиях горячей деформации сжатием // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – N7. – с.9–15.
12. Радкевич М.М., Скотникова М.А. Влияние микродобавок бора на анизотропию механических свойств плоских заготовок из титановых сплавов. Металловедение и термическая обработка металлов. 2013 - №10, 10(100), с. 29-38.
13. Prasad Y.V.R.K., Gegel H.L., Doraivelu S.M., & // Met. Trans., 1984. – v.15A. – p.1883.
14. [14]. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Метод оптимизации температурно-скоростных режимов горячего деформирования конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. – 2004. – №1(37). – с.12 – 17.
15. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Моделирование поведения стали 07Х16Н4Б при горячем деформировании//Вопросы материаловедения. – 2004. – №1(37). – с.5 – 11.
16. Барахтин Б.К., Варгасов Н.Р., Немец А.М., Хлусова Е.И. Выбор режимов термомеханической обработки сталей и сплавов на основе системного

анализа структуры и имитационного моделирования//Физика и механика материалов. – 2011. – Т.12. №1. – с.30 – 42.

N.R.Vargasov[1], M.M. Radkevich[2]

EXPERIMENTAL REGULARITIES IN THE BEHAVIOR OF TITANIUM ALLOYS IN CONDITIONS OF STRUCTURAL SUPERPLASTICITY

Peter The Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Experimentally investigated the mechanical behavior of single-phase and two-phase titanium alloys during deformation by stretching in a wide temperature range. It was established that in two-phase titanium alloy have all the signs of superplastic behavior at a temperature of 840-860*C and strain rate of $1.1 \cdot 10^{-3}$ s-1. It is shown that in the process of hot deformation of titanium alloys in the process of transformation of the initial lamellar structure to granular, which resulted in the alloys formed fine-grained structure necessary for the implementation of the state of superplasticity.

Key words: titanium alloys, tensile, superplasticity, dissipation, rheology.

REFERENCES

[1] A. A. Il'in, Mechanism and kinetics of phase and structural transformations in titanium alloys. – M.: Nauka, 1994. – 280 p.
[2] Kalachev A. B. Physical metallurgy of titanium. – M.: Metallurgy, 1996. – 184 p.
[3] Kaibyshev O. A. Superplasticity of industrial alloys. – M.: Metallurgy, 1984. – 284 p.
[4] Titanium alloys in civil shipbuilding/ Ushkov S. S., briker A. S., Zobachev Y. E., etc.// Shipbuilding. 1996. – No. 5 – pp. 44-46.
[5] Gorynin I. V. Tendencies of development of modern materials science// Shipbuilding. – 1996. – No. 10. – p. 132-135.
[6] The use of high-strength titanium alloys for the hulls of deep-diving vehicles/ Ryabov V. M., chasin, D. Y., Razuvaev I. N. etc.// Shipbuilding. – 1995. – No. 4. – p. 29-31.
[7] Superplasticity of titanium alloys of different classes/ Babareka A. A., Egiz I. V. and others//Mitom. – 1995. – No. 6. – S. 30 - 35.
[8] Gorbunov S. V., Walter A., Fedotkin I. P. Deformation of titanium VT1–0 under conditions of substructural superplastic-STI//Mitom. – 1988. – No. 12. p. 43-44.
[9] Vargasov N. R., Rybin V. V. Optimization of temperature - speed modes of

plastic deformation on the criterion of dissipation of mechanical energy// Metallography and heat treatment of metals. – 1999. – No. 9. – p. 52-56.
[10] Vargasov N. R., Rybin V. V. Accumulation and dissipation of energy during hot plastic deformation of titanium alloy//materials science. – 1999. – №1(18). – S. 63-69.
[11] Barahtin B. K., Vargasov N. R., Lebedeva N. In., Rybin V. V. Structural changes in the gland in the conditions of hot deformation by compression Deformation and fracture of materials. – 2006. – N7. – c.9-15.
[12] Prasad Y. V. R. K., H. L., Program, Doraivelu S. M., & // Met. Trans., 1984. – v.15A. – p.1883.
[13] Vargasov N. R., Rybin V. V. the Method of optimization of temperature-speed modes of hot deformation of structural steels // materials science. – 2004. – №1(37). – S. 12 – 17.
[14] Vargasov N. R., Rybin V. V. modeling the behavior 07H16N4B steel during hot deformation//materials science. – 2004. – №1(37). – p. 5 – 11.
[15] Barahtin B. K.,Vargasov N. R., German A. M., E. I. Khlusova the Choice of modes of thermomechanical processing of steels and alloys based on the system structure analysis and simulation modeling//Physics and mechanics of materials. – 2011. – Vol. 12. No. 1. p. 30 – 42

УДК 539.214.9; DOI 10.1872/MMF-2016-99

Н.Р.Варгасов[1], М.М.Радкевич[2]

СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ ПСЕВДО-α ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

[1]Николай Рафаилович Варгасов – д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812)554-2737,
E-mail:nikolai.vargasov@gmail.com.

[2]Михаил Михайлович Радкевич – д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812) 552-9302,
E-mail:radmich@mail.ru.

Аннотация

Экспериментально исследовано механическое поведение двух псевдо-α титановых сплавов при деформации растяжением в диапазоне температур 800-950 ^{0}C при постоянном напряжении и периодически изменяющемся. Показано, что деформирование растяжением образцов титановых сплавов с периодически меняющейся нагрузкой, наложенной на постоянно действующую, позволяет увеличить пластичность в 2,5 раза, что подтверждает возможность реализации сверхпластичности данных сплавов.

Ключевые слова: титановые сплавы, растяжение, периодическое нагружение, сверхпластичность, реология.

Переход материала в состояние сверхпластичности определяется по крайней мере тремя основными факторами: характерной структурой, температурой деформации равной или больше $0{,}5T_{пл}$, а также скоростью деформирования в интервале 10^{-4}-10^{-1} $с^{-1}$ [1]. Причем среди структурных факторов главным является размер зерна, определяющий сверхпластичное поведение материала. Изменение размера зерна оказывает большое влияние на все показатели сверхпластичности - сопротивление деформации, зависимость напряжения течения от скорости деформации и степень деформации до разрушения. Для большинства металлических сплавов стабильная мелкозернистая структура является необходимым условием достижения эффекта сверхпластичности. Так, например, автором

работы [2] установлены важные отличительные особенности деформационного поведения алюминиевых сплавов с суб-микро- и нанокристаллической структурой в сравнении их с поведением традиционных алюминиевых сплавов. Однако, получение мелкозернистой структуры в металлах и сплавах является сложной технологической задачей. Чаще затраты, связанные с получением ультрамелкозернистой структуры, превышают экономический эффект от промышленной реализации сверхпластичности. В связи с этим, поиск новых технических решений, которые позволили бы реализовать эффект сверхпластичности в материалах обычных, а не с ультрамелкозернистой структурой является актуальной задачей.

Известно [3], что если на тело действует напряжение, изменяющееся по гармоническому закону, а тело находится в условиях ползучести, то в этом случае происходит изменение скорости ползучести:

$$U_p = U_c\left[1+\frac{1}{4}\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0}\right)^2\right]$$

где U_p – скорость ползучести при пульсирующей нагрузке, U_c – скорость ползучести при постоянной нагрузке, σ_a – амплитуда пульсирующего напряжения, σ_0 – постоянно действующее напряжение. Очевидно, что с увеличением σ_a/σ_0 скорость ползучести будет возрастать.

Кроме того, авторы работы [4] установили, что одновременное приложение колебаний к деформируемому образцу приводит к заметному изменению всех параметров кривой деформации. На основании результатов компьютерного моделирования схемы нагружения показано, что скорость пластической деформации может быть существенно увеличена за счет приложения дополнительно к статической, внешней периодической нагрузки.

В настоящей работе предложено исследование особенностей механического поведения двух псевдо-α титановых сплавов при деформации растяжением в диапазоне температур 800-950 ^{0}C при постоянном и периодически изменяющемся напряжении с частотой 5÷ 30 мин $^{-1}$.

Для проведения исследований использовали горячекатаный листовой прокат толщиной 46 мм. двух марок титановых сплавов, химический состав которых представлен в табл. 1. Размер зерна и фазовый состав сплавов приведен в табл. 2. Сплавы 1 и 2 отличаются содержанием β-стабилизирующих элементов. Сплав 2 комплексно легирован ванадием и молибденом, благодаря которым он отличается большим содержанием β-фазы и меньшим размером зерна.

Таблица 1.

Химический состав титановых сплавов, %.

№	Al	V	Mo	Fe	Si	C	O	H	N	Ti
1	3,5	1,2-2,5	–	<0,25	<0,30	<0,10	<0,15	<0,08	<0,04	ост.
2	5,4	1,0-1,9	1,2	<0,13	<0,12	<0,14	<0,15	<0,08	<0,04	ост.

Таблица 2.

Размер зерна и фазовый состав сплавов

Сплав	Размер зерна, мкм		Фазовый состав, %	
	α	β	α	β
1	11,0	6,1	96	4
2	8,0	4,4	90	10

Исследование влияния температуры на относительное удлинение проводили на специально оборудованной для проведения испытаний на растяжение при высоких температурах установке, которая оснащена дополнительным приводом, позволяющим накладывать на постоянно действующую нагрузку дополнительную нагрузку малой амплитуды.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости относительного удлинения до разрушения образцов из исследуемых сплавов, испытанных при статическом растяжении с постоянным нагружением и одновременной дополнительной периодической нагрузкой с частотой 0,5 с $^{-1}$ в диапазоне температур 800-860 ^{0}C.

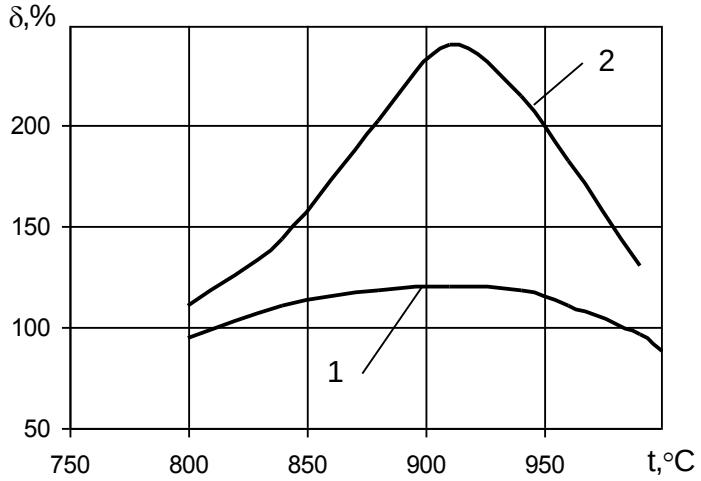


Рис.1.Зависимость относительного удлинения (сплав 1) от температуры. 1 – статическое растяжение при постояннойнагрузке, 2 – растяжение с дополнительной периодической нагрузкой.

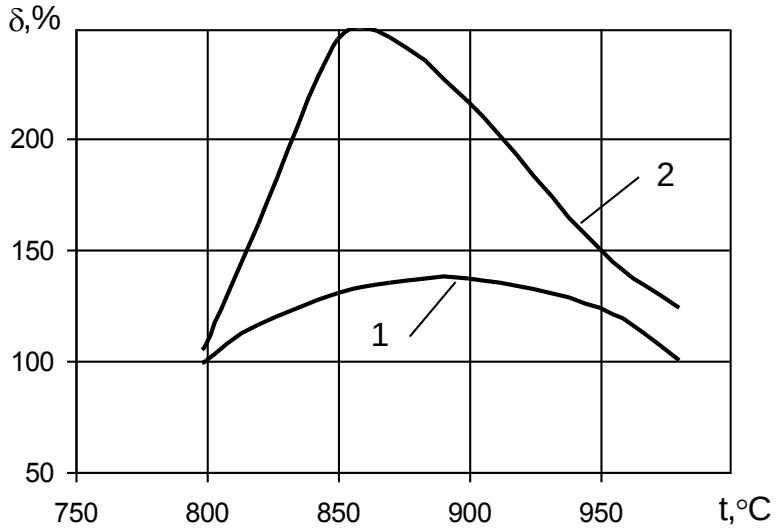


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения от температуры (сплав 2).
1 – статическое растяжение при постоянной нагрузке,
2 – растяжение с дополнительной периодической нагрузкой.

Результаты исследования влияния температуры деформации на относительное удлинение сплавов при статическом растяжении со скоростью деформации 10^{-3} $с^{-1}$ показали, что оба сплава обладают пластичностью типичной для псевдо-α титановых сплавов (Рис.1,2). Практически во всем исследованном интервале температур относительное удлинение при растяжении с дополнительной периодической нагрузкой превышает относительное удлинение при статическом растяжении. Если в сплаве 1 максимум показателя пластичности наблюдается при температуре 920 ^{0}C, то в сплаве 2 максимальное удлинение наблюдается при температуре 860 ^{0}C.

Следует отметить, что в результате испытаний на растяжение сплавов, проводимых с дополнительной периодической нагрузкой, обнаружено множественное количество образовавшихся шеек, скорость роста которых сопоставима со скоростью растяжения. Этот факт подтверждает то, что при таком виде нагружения в некотором объеме образца могут появляться и исчезать стационарные или распространяющиеся виды неустойчивости пластической деформации.

Таким образом, если при обычном растяжении в исследованных сплавах происходит постоянный рост шейки (локализация деформации), приводящий к разрушению, то при растяжении с одновременным приложением периодической нагрузки реализуется множественное зарождение шеек (объемная деформация) и прекращение их роста. Полученный результат позволяет рассматривать нагружение с пульсирующим напряжением как способ реализации в сплавах в состояния сверхпластичности.

Изучение процессов, протекающих в металлах при высокотемпературной деформации позволило установить, что существенное влияние приобретает вязкость**.** Необходимость учитывать явления, которые связаны с тепловым движением атомов, требует исследования и анализа процесса пластической деформации во времени. Поэтому, изучение пластических свойств, осложненных явлением вязкости, целесообразно проводить с использованием реологических моделей [5,6]. Их разрабатывают для формального описания соотношений между напряжением и деформацией (скоростью деформации), полученных экспериментальным путем или по результатам металлографических исследований материала для описания взаимодействия различных механизмов деформации.

Для объяснения сверхпластического поведения сплавов при различных видах нагружения и с целью учета возможных механизмов деформации (зернограничного проскальзывания, внутризеренного скольжения, диффузной ползучести), а также принимая во внимание взаимодействие этих механизмов, воспользуемся реологической моделью, предложенной в работах [7,8,12], структурная форма которой имеет вид:

$$\sigma = \mathrm{H} - \left[\mathrm{SI}(\mathrm{H}_1 - \mathrm{N})\right],$$

где H – элемент Гука, N – элемент Ньютона, S – элемент Сен-Венана, « − » и « I » – обозначение последовательного и параллельного соединения реологических элементов.

Поведение такой среды при действии внешнего напряжения состоит в том, что при напряжении $\sigma<\sigma_т$ имеет место лишь упругая деформация. При напряжении $\sigma>\sigma_т$ появляется остаточная деформация, сопровождающаяся накоплением энергии. В процессе пластического течения с некоторой скоростью, действующее напряжение равно сумме $\sigma_т+\mu\varepsilon$.

После прекращения деформации напряжение в материале начнет релаксировать. Время релаксации будет определяться соотношением модуля упругости и коэффициента вязкости.

Как и в случае модели Фойгта-Кельвина, приложение периодически изменяющейся во времени силы, в данной модели, приводит к появлению внутреннего трения. Отличие реакции рассматриваемой среды на приложение периодической силы заключается лишь только в различной зависимости отставания деформации от напряжения.

Одним из механизмов релаксации напряжений в поликристаллических материалах является релаксация напряжений, связанная с границами зерен. Причем интеркристаллитная релаксация в условиях повышенных температур тесно связана с процессом рекристаллизации. В работах авторов [9,10,11] установлено, что при деформировании образцов на зернограничный максимум внутреннего трения накладывается рекристаллизационный максимум, лежащий в той

же температурной области. При больших деформациях (ε>0,2) температура рекристаллизации и температура максимума внутреннего трения практически совпадают и одинаковым образом зависят от степени деформации.

Анализ структуры и фазового состава образцов сплавов деформированных при температуре 900°С (рис.3) при статическом растяжении и одновременном периодически действующем напряжении, наложенном на постоянно действующее, методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) показал, что деформация сопровождается ростом размера среднего диаметра зерна, а также изменением фазового состава и появлением пор. Установлено, что, если размер зерен α-фазы уменьшается, то размер зерен β-фазы наоборот увеличивается. При этом изменение размеров зерен при деформации с приложенным периодически меняющимся напряжением происходит заметно интенсивнее, чем при обычном статическом растяжении. Появление пор и их рост, а также увеличение размеров зерен свидетельствует о миграции границ зерен, активном зернограничном проскальзывании и активации диффузионных процессов в результате действия периодически меняющегося напряжения.

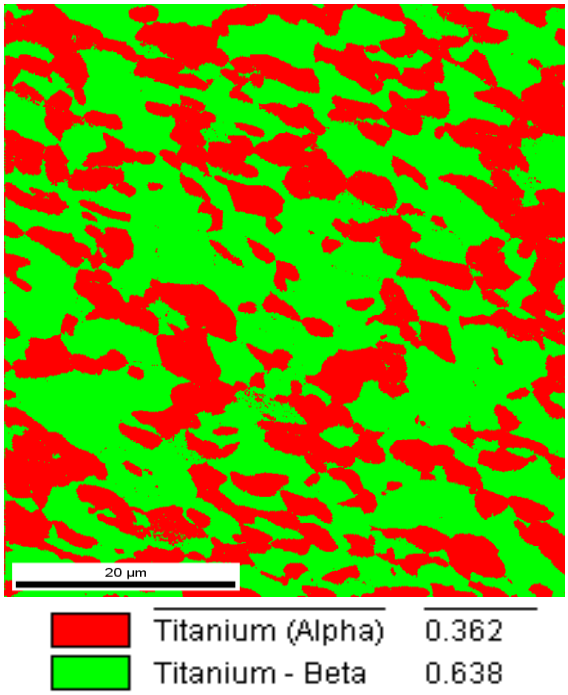


Рис.3. Карта фаз, полученная методом EBSD сплава 1 при нагреве и деформации (δε = 50%) при температуре 900°С.

Повышение пластичности сплавов при растяжении с наложением на постоянное напряжение периодической нагрузкой можно объяснить тем, что кратковременное, примерно 0,5÷1,0 с повышение напряжения

активирует процесс зернограничного проскальзывания, которое, как известно, осуществляется за счет движения зернограничных дислокаций. Поскольку скольжение зернограничных дислокаций обычно связано с уступами на границах [12], то процесс проскальзывания должен приводить к одновременному смещению границы в перпендикулярном направлении, т. е. к ее миграции.

Таким образом, периодически меняющееся напряжение позволяет «включить» важнейший и неотъемлемый механизм реализации сверхпластической деформации – зернограничное проскальзывание.

Выводы

1. Деформация растяжением образцов псевдо-α титановых сплавов периодической нагрузкой, наложенной на постоянно действующую, позволяет увеличить относительное удлинение в 2,5 раза, что свидетельствует о возможности реализации сверхпластичности в этих сплавах. При такой схеме нагружения интенсифицируются процессы зернограничного проскальзывания и трансформации пластинчатой структуры, что создает предпосылки для перехода сплавов в состояние сверхпластичности.

2. В результате исследований структурных изменений, происходящих при деформации сплавов, установлено, что в температурно-скоростных условиях пика относительного удлинения происходят, по крайней мере два главных рассеивающих энергию процесса – это динамическая рекристаллизация и фазовое $\alpha \rightarrow \beta$ превращение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1.Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 284 с.
2. Перевезенцев В.Н. Высокоскоростная сверхпластичность алюминиевых сплавов с субмикро-и нанокристаллической структурой//Вестник Нижегородского университета им.Н.И.Лобачевского. 2010. №5(2), с.58-69.
3. 3.Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969. - Т.2. – 864 с.
4. Марченко И.Г., Неклюдов И.М., Пархоменко А.А.//Материалы международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Харьков, ННЦ ХФТИ. – 2014. – с. 218-219.
5. 5.Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1979. – 328 с.
6. Пуарье Ж.П. Высокотемпературная пластичность металлических тел / Пер. с франц. – М.: Металлургия, 1982. – 273 с.
7. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Оптимизация температурно-скоростных режимов пластической деформации по критерию диссипации

механической энергии// Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №9. – с. 52-56.
8. Варгасов Н.Р., Рыбин В.В. Аккумуляция и диссипация энергии при горячей пластической деформации титанового сплава//Вопросы материаловедения. – 1999. - №1(18). – с. 63-69.
9. Шестопал О.М. Реологические свойства чистых металлов при высоких температурах. – М.: Металлургия, 1978. – 128 с.
10. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1965. – 472 с.
11. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 156 с.
12. Radkevich M., Skotnikova.M. Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shok Loading. Proceeding of the 12 th. World Conference on Titanium. China National Convention Center (CNCC). 2011.c. 540-543
13. Варгасов Н.Р., Барахтин Б.К. Новый подход к оценке структурного состояния рельсовой стали при горячей деформации//Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПБПУ. – 2014. – с. – 1095 – 1104.

N.R.Vargasov, M.M. Radkevich

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Experimentally investigated the mechanical behavior of two pseudo-α titanium alloys during deformation by stretching in a wide temperature range at a constant and periodically changing voltage. It is shown that the deformation of the tensile specimens of titanium alloys by periodic loading, superimposed on a permanent, allows to increase the elongation in 2.5 times, indicating the possibility of the realization of superplasticity in these alloys.

Key words: titanium alloys, strength, superplasticity, rheology

REFERENCES

[1] Kaibyshev O. A. Superplasticity of industrial alloys. – M.: Metallurgy, 1984. – 284 p.
[2] Perevezentsev V. N. High-speed superplasticity of aluminum alloys with submicro-and nanocrystalline structure// Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im.N. And.Lobachevsky. 2010. No. 5(2), pp. 58-69.
[3] Nadai A. Plasticity and failure of solids. – M.: Mir, 1969. - T. 2. – 864 p.
[4] I. G. Marchenko, I. M. Neklyudov, A. A. Parkhomenko//proceedings of the international conference "Actual problems of strength". Kharkov, NSC KIPT. – 2014. – P. 218-219.

[5] V. M. Rozenberg, Fundamentals of heat resistance of metallic materials. – M.: Metallurgy, 1979. – 328 p.
[6] Poirier, J. P. high Temperature plasticity of metallic bodies, Transl. from Franz. – M.: Metallurgy, 1982. – 273 p.
[7] Vargasov N. R., Rybin V. V. Optimization of temperature-speed modes of plastic deformation on the criterion of dissipation of mechanical energy// Metallography and heat treatment of metals. – 1999. – No. 9. – p. 52-56.
[8] Vargasov N. R., Rybin V. V. Accumulation and dissipation of energy during hot plastic deformation of titanium alloy//materials science. – 1999. - №1(18). – P. 63-69.
[9] Shestopal O. M. Rheological properties of pure metals at high temperatures. – M.: Metallurgy, 1978. – 128 p.
[10] Novik A., Berri B. Relaxation phenomena in crystals. – M.: Atomizdat, 1965. – 472 p.
[11] Orlov A. N., Perevezentsev V. N., Rybin V. V. Grain boundaries in metals. – M.: Metallurgy, 1980. – 156 p.
[12] Radkevich M., Skotnikova.M. Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shok Loading. Proceeding of the 12 th. World Conference on Titanium. China National Convention Center (CNCC). 2011. Pp. 540-543
[13] Vargasov N. R., Barahtin B. K. a New approach to the assessment of the structural condition of rail steel during hot deformation//Materials of 4th International scientific-practical conference. The modern mechanical engineering. Science and education. – SPBPU. – 2014. – Pp. 1095 – 1104.

УДК 534 + 621.78.066; DOI 10.1872/MMF-2016-100

Г.А.Воробьева[1], Е.Е. Складнова[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ

Г.А.Воробьева к.т.н., профессор;
Балтийский государственный технический университет « Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Россия, Санкт – Петербург, 196005, 1ая Красноармейкая д. 1.

Е.Е. Складнова к.т.н., профессор,
Балтийский государственный технический университет « Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Россия, Санкт – Петербург, 196005, 1ая Красноармейкая д. 1.

Аннотация

В работе представлены результаты исследования структуры и свойств легированных штамповых сталей для холодного деформирования, подвергнутых обработке по нескольким вариантам технологий аэротермоакустической обработки (АТАО).Показана возможность повышения их механических и функциональных свойств, что является следствием измельчения зерна и карбидной фазы сталей, ее равномерного распределения.

Ключевые слова: штамповые стали для холодного деформирования, аэротермоакустическая обработка, термическая обработка, механические свойства, теплостойкость, микроструктура стали, остаточные напряжения

Развитие технологии машиностроения в значительной степени зависит от технического уровня инструментального производства. Срок службы инструментасущественно влияет на стоимость готовых изделий. Условием производства высококачественного и долговечного инструмента является выбор стали(сплава), соответствующего назначению и нагрузкам, возникающим при его работе, а также технологии производства и упрочнения, обеспечивающих необходимые механические свойства, как во всем объеме так и поверхностном слое материала. Роль последнего в обеспечении эксплуатационных свойств изделий очень значительна.

Материалы и методика обработки материалов

Для изготовления матриц и пунсонов сложной формы, работающих при умеренных нагрузках,применяются,в том числе стали Х12В и Х12М,

обладающиевысокой износостойкостью. Однако повышенное количество карбидов хрома, значительная карбидная неоднородность снижают прочность и вязкость сталей. Стали марок Х10СФЮТ и 8Х4В2С2МНФАЮТ (разработаны в БГТУ «ВОЕНМЕХ», выплавлены с использованием технологии бескремнистого раскисления) предназначены для штампов холодного деформирования, первая для инструмента, работающего при умеренных, вторая при повышенных нагрузках и для режущего инструмента, работающего при небольших скоростях резания. Эти стали работают преимущественно в условиях износа на статический изгиб, сжатие и при наличии динамических нагрузок. Наиболее значимыми характеристиками являются условный предел текучести при сжатии ($\sigma_{0,2сж.}$), предел прочности при изгибе ($\sigma_{изг}$) и ударная вязкость (КС), определяемая на образцах без надреза. Сталь Х10СФЮТ за счет пониженных (~10%)концентраций хрома и углерода(~1%),а также выплавки с использованием технологии бескремнистого раскисления, после закалки и отпуска при 200ºС имеетпрактически одинаковый уровень твердости(HRC60) со сталью Х12Ф при повышенных значениях предела прочности при изгибе и ударной вязкости(в 1,5раза выше по значениям обеих характеристик). Режимы стандартной термической обработки (СТО) сталей Х10СФЮТ, 8Х4В2С2МФ, их механические свойства после СТО и АТАО представлены в табл. 1 [1].
В работе представлены результаты исследования, полученные для нескольких вариантов технологий АТАО. Аэротермоакустическая обработка (АТАО) материалов относится к числу комбинированных средств воздействия на материалы. После нагрева образцы сплава, как правило, прошедшие предварительную стандартную термическую обработку, помещаются в камеру резонатора газоструйного генератора звука(ГГЗ), продолжительность обработки 5-10минут. Температура нагрева и время обработки определяется маркой сплава [2,3].

Обсуждение полученных результатов

При использовании технологии АТАО-1 (процесс охлаждения при проведении закалки) для всех исследованных инструментальных сталей повышаются практически все механические свойства : твёрдость (HRC), ударная вязкость и предел прочности при изгибе (табл. 1.). Микроструктура стали Х10СФЮТ после СТО и АТАО-1 представлена на (рис.1а,б,в), стали 8Х4В2С2МФ после АТАО-1 представлена на (рис. 1 г).Очевидно, что АТАО существенно влияет на формирование структуры обеих сталейи изменение свойств связано с измельчением карбидной фазы, уменьшением размеров аустенитных зёрен, кристаллов мартенсита, за счет диспергирования и гомогенизации структуры и субструктуры. (рис.1 а,б) [4].

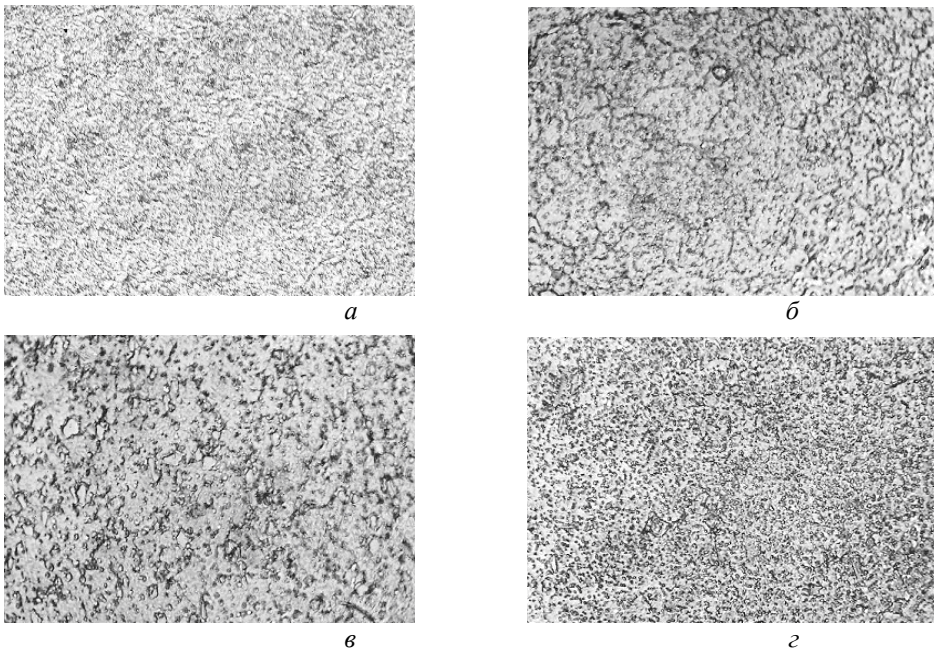


Рис.1. Микроструктура штамповых сталей: *а* (х300), *б*, *в*(х600) – Х10СФЮТ; *г* (х600) – 8Х4В2С2МФ; *а, б* – АТАО в процессе закалочного охлаждения, отпуск 200°С, 1,5ч; *в* – стандартная термическая обработка, отпуск 200°С, 1,5 ч; *г* – АТАО в процессе закалочного охлаждения, отпуск 560°С; 3 раза по часу с полным охлаждением

Результаты экспериментальных исследований показали, что применение АТАО позволяет несколько снизить температуру нагрева при закалке, тем самым эти технологии способствуют получению более мелкого зерна аустенита. При использовании технологии АТАО -2 (процесс охлаждения после отпуска или после полного цикла СТО в резонаторе ГГЗ) повышение механических свойств определяется формированием субструктуры, изменением характера взаимодействия дислокаций с карбидной и карбонитридной фазами, уменьшением остаточных напряжений, измельчением карбидной фазы [5]. Дополнительного, значительного выделения карбидов при обработке не происходит, но имеет место образование карбидных кластеров в пересыщенном мартенсите, протекающее на субмикронном уровне; кластеры диспергированы по всей матрице и не регистрируются световой металлографией и с трудом – рентгенографией, но могут влиять на твёрдость [2]. Все перечисленные выше процессы и обеспечивают повышение стойкости инструмента в процессе эксплуатации в 1,5-3 раза при обработке по обеим технологиям АТАО-1и АТАО-2.

Таблица 1

Режимы технологических обработок штамповых сталей холодного деформирования

Марка стали	Режим обработки			Механические свойства			
	Предварительный		Окончательный $t_н$, ºС	HRC	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{0,2сж.}$	КС, МДж/м²
	$t_н$, ºС	Среда охл.			МПа		
Х10СФЮТ	1030-1050	Масло (СТО)	Отпуск при 200ºС 1,5 ч	60-61	3800	2350	0,8-1,0
	1000	Воздух, АТАО-1		63-64	3820-3840	2570	0,9-1,0
8Х4В2С2 МФ	1080	Масло (СТО)	Отпуск 530 ºС, 3 раза по 1 ч	63-64	3900	2800	0,4
	1030-1050	Воздух, АТАО-1		64-65	4100	2800	0,4

Кроме того АТАО повышает теплостойкость сталей: так сталь Х10СФЮТ, подвергнутая термической обработке по режимам, указанным в (табл.1), при дополнительном нагреве до температуры 540 ºС и выдержке в течении 3 часов имеет твердость при (СТО) - 47HRC , а после(СТО) + АТАО – (57- 58) HRC; более высокие значения твердости сохраняет сталь и при нагреве до температур 600ºС и 700ºС (табл.2).

Таблица 2

Влияние АТАО на теплостойкость стали Х10СФЮТ

Марка стали	Режим обработки				Твердость(HRC) после дополнительного нагрева при температурах, ºС и выдержки в часах				
					540			600	700
	Предварительный (закалка)		Окончательный (отпуск) $t_н$, ºС	Твёрдость HRC	1	2	3	6	2
	$t_н$, ºС	Среда охл.							
Х10СФЮТ	1030-1050	Масло	200; 1,5 часа	60-61	57-58	54	47	42	32
	1000	Воздух, АТАО		63-64	62	62	57-58	52	42

Рентгенографическое изучение влияния АТАО на параметры кристаллической решетки стали Х10СФЮТ, подвергнутой СТО и АТАО в процессе закалочного охлаждения с последующим отпуском при температуре 200°С, дало возможность обнаружить ряд существенных особенностей строения стали. Рентгеноструктурный анализ (РСА) позволяет при использовании стандартной методики [3] определить нарушения кристаллической структуры (дисперсность и блочное строение кристаллитов, количество

дислокаций, уровень микронапряжений и др.). РСА образцов стали Х10СФЮТ, подвергнутых обработке по приведенным в (табл.2) режимам, показал, что имеет место заметное уменьшение полной ширины «физического профиля» β дифракционных линий (110) и (220) после обработки по режиму АТАО (по ширине дифракционных линий определяется искажения в микрообластях), по сравнению с обработанной по СТО (табл.3). Ширина линий (110) в меньшей степени зависит от режима обработки, чем ширина линий (220). Как известно [3], в случае наличия искажений решетки в микрообластях металла ширина линий пропорциональна тангенсу угла отражения, а в случае малой величины кристаллов - секансу того же угла. Соотношение ширины дифракционных линий β_2/β_1 на больших и малых углах отражения ближе к тангенсу $tg\theta_2 / tg\theta_1$, чем к секансу $sec\theta_2 / sec\theta_1$ [3]. Это свидетельствуют о том, что расширение линий происходит за счет микроискажений. Таким образом, применение технологий АТАО -1(стадия закалки стали Х10СФЮТ) несколько уменьшает по сравнению со СТО упругие искажения решетки в микрообластях, что свидетельствует об усилении степени распада мартенсита при АТАО, т.е. ее влияние аналогично влиянию пластической деформации на структуру стали или нагреву при отпуске до температур, при которых эта стадия реализуется. Анализ микроструктуры стали после АТАО свидетельствует об измельчении зерна, уменьшении количества крупных карбидов, увеличении дисперсности карбидной фазы, более равномерном её распределении, что обеспечивает и более высокую твердость материала. Наблюдается повышенная травимость и зубчатость границ зерен стали после обработки (рис.1б).

Таблица 3

Ширина линий (220) и (110) стали Х10СФЮТ после СТО и АТАО

Режим закалки		Режим отпуска	Твердость,	β,рад.х10^{-3}		$sec\theta_2/sec\theta_1$	β_2/β_1	$tg\theta_2/tg\theta_1$
Температура,°С	Среда охлаждения		HRC	(110)	(220)			
1030-1050	Масло, СТО	200°С, 1,5часа	60-61	5,6	15,8	1,419	2,82	2,834
1030	Воздух, АТАО		63-64	4,6	12,1	1,421	2,64	2,839

Аналогичное влияние АТАО оказывает на структуру и свойства стали 8Х4В2С2 МФ, повышая не только механические свойства, но и ее теплостойкость (табл.4).

Таблица 4

Влияние АТАО на теплостойкость стали 8Х4В2С2МФ

Режим обработки	Твёрдость стали, HRC при температурах нагрева (ºС) в течение 2-6 часов					
	20	600		620		700
	-	4 часа	6 часов	2 часа	4 часа	2 часа
Закалка с 1080 ºС, масло отпуск 530 ºС, 3 раза по 1 ч	63	58	57	52	50	41
Закалка с 1050 ºС, воздух+ АТАО-1, отпуск 3 раза по 1 ч	65	62-63	61-62	56-58	54-56	43

Тормозящее действие АТАО-1 на процессы, протекающие при нагреве (замедление процесса распада мартенсита) обусловлено закалочной предысторией, в частности, субструктурным состоянием α – фазы, главным образом из-за увеличения количества дефектов – дислокаций, повышения дисперсности кристаллов α – фазы. Это приводит к снижению активности углерода вследствие его взаимодействия с дефектами. Усиление сегрегации аналогично действию тех легирующих элементов, которые снижают термодинамическую активность углерода и способствуют его сохранению в пересыщенном твердом растворе.[3] . Повышение теплостойкости стали 8Х4В2С2 МФ позволяет использовать ее не только как штамповую сталь холодного деформирования, но и как сталь для режущего инструмента, работающего при небольших скоростях резания.

Исследовалось влияние АТАО на величину и знак остаточных напряжений, образующихся при проведении закалки как упрочняющей термической обработки (для стали 40Х) и повышающей пластичности для стали 12Х18Н9Т. Остаточные напряжения классифицируют по протяженности теплового поля. Напряжения 1 рода уравновешиваются в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела. Они вызваны неоднородностью силового или температурного поля внутри тела (в зависимости от своей природы) и характеризуются при их обнаружении по способу разрезки – деформацией (короблением) отрезанных элементов. Задача механических методов определения остаточных напряжений состоит в том, чтобы по известной совокупности перемещений или деформаций определить вызвавших их напряжений на поверхности среза.

Уровень остаточных напряжений в зависимости от термической обработки оценивался механическим методом с помощью специальных образцов (кольца Френча). Переменное сечение образца обеспечивает неравномерность охлаждения, а, следовательно, и деформации. В результате более быстрого охлаждения тонкого образца происходит ее упругий изгиб при последующем охлаждении утолщенной части образца. Величина остаточного напряжения рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \alpha E \varepsilon,$$

где α – коэффициент, связывающий форму кольца и деформацию кольца, в условиях чистого изгиба он равен 0,00168 мм $^{-1}$; E – модуль упругости, МПа; ε–деформация кольца после разрезки в области пропила между точкамиA и B; σ – остаточные напряжения, МПа

Образцы Френча из стали 40Х подвергались закалке с охлаждением в масле и АТАО (охлаждение в водовоздушной среде и при воздействии акустического поля). Твердость в обоих случаях составляла 54…58HRC и была равномерной по сечению. Деформация после термической обработки стали 40Х определялась на образцах с сечением 4,2×2,3 и длиной 42 мм. Измерение прогиба центральной части образца проводилось с помощью индикаторного прибора. Значения величин остаточных напряжений, определенных по формуле указанной выше и деформаций приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения остаточных напряжений и деформаций

Марка стали	Режимы обработки		Твердость	$\sigma_{ост.}$	Прогиб после закалки
	Температура нагрева, °С	Среда охлаждения	HRC (HRB)	МПа	мм
40Х	860	Масло	54-56	990,5	0,06
		АТАО	56-58	--32,5	0÷ 0,02
12Х18Н9Т	900	Вода	(70-80)	337,5	-
		АТАО	(70-80)	--25,0	-

Приведенные результаты воздействия АТАО свидетельствуют о том, что АТАО влияет на величину и знак остаточных напряжений: величина остаточных напряжений уменьшается ~ 2,5раза, напряжения с растягивающих при СТО меняется на сжимающие при АТАО [5].

Пуансоны, изготовленные из сталей9ХС, Х12 и Х12Ф1,прошедшие АТАО, имеют стойкостьв 1,8-2,2 раза большую относительно пуансонов без дополнительной обработки (стойкость определялась количеством обработанных деталей или временем работы инструмента).

Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1.Улучшение механических свойств штамповых сталей связано с изменением их структуры, измельчением структурных составляющих, равномерностью распределения карбидной фазы под воздействием АТАО, что обеспечивает повышение износостойкости и теплостойкости, а, следовательно, и увеличение долговечности инструмента.

2. АТАО, используемая в процессе проведения закалки или отпускасталей холодного деформирования, является средством уменьшения уров-

ня остаточных напряжений и формированием сжимающих напряжений в поверхностных слоях штампов холодного деформирования, что дополнительно обеспечивает повышение стойкости.

3. Приведенные исследования по влиянию АТАО иллюстрируют комплексные возможности для реализации резервов повышения механических и эксплуатационных свойств сталей и позволяют использовать полученные результаты при разработке технологий упрочнения (АТАО) штамповых сталей, обеспечивающих рост стойкости инструмента без изменения или при незначительном повышении стоимости технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г.А. Воробьёва, Е.Е. Складнова, А.Ф. Леонов, В.К. Ерофеев.// Инструментальные материалы .Политехника. СПб 2005.с.259
2. В.К. Ерофеев, Г.А. Воробьёва // Металлообработка 2009.№3. С.31-38
3. Г.А. Воробьёва, Е.Е. Складнова, //Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. 2013 г. Из-во Политехнического ун-та. СПб, 2013. Часть 2.С.1102-1112
4. Г.А. Воробьёва, Е.Е. Складнова,//Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. 2014 г. СПб, из-во Политехнического ун-та, 2014.ч.2,с.1107-1117.
5. Г.А. Воробьёва, Е.Е. Складнова,//Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика.материалы17-й международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политех-нического ун-та, 2015. С.296-303

G. Vorobiyova, E. Skladnova

ANALYSIS OF THE INFLUENCE AEROTHERMOACOUSTIC TREATMENT ON STRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STAMPSTEELS

all: Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov.
Russia, St.Petersburg

Abstract

The article represents the results of research of structure subjected to standart thermal treatment and additional aerothermoacoustictreatment(ATAT); It is discovered that structural parameter differ. The research reveals the connection between structural changes of tool material and their mechanical and

operstional characteristics. It is shown that ATAT technologies have advantages. As a result of carbides crushing and grain size reduction the increase of tool wear-resistans becomes 1,8-2,2.

Key words: Die steels for cold deformation, thermal treatment, aerothermoacoustic treatment(ATAT); mechanical characteristics, heat resistancy, microstructura steels, residual stresses

REFERENCES

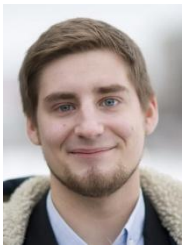
[1] Vorobiyova G.A.,Skladnova E.E. //Tool material. Polytechnic.SPb 2005. Pp.259
[2] Vorobiyova G.A.,Skladnova E.E.//Metalworking.2009.№ 3. Pp.31-38
[3] Vorobiyova G.A.,Skladnova E.E.//The modern mechanical engineering. Science and education. Materials of the 3international scientific –practical conference 2013.Polytechnical University.2013. Pp.1102-1112.
[4] Vorobiyova G.A.,Skladnova E.E. //The modern mechanical engineering. Science and education. Materials of the 4 international scientific –practical conference 2014.Polytechnical University.2014.Pp.1107-1117.
[5] Vorobiyova G.A.,Skladnova E.E. //Technology hardening, coating of pagrati and repair pagrati : theory and practice.Materials of 17 th international scientific and practical conference. Polytechnical University. 2015. Pp. 296-303

УДК 621.771.67; DOI 10.1872/MMF-2016-101

В.Н.Востров[1], К.О. Лоськов[2]

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УГЛОВОЙ РАСКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

[1]Востров Владимир Николаевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
E-mail: vostrov-vn@mail.ru



[2]Лоськов Кирилл Олегович, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
E-mail: loskov-inc-21@mail.ru

Аннотация

В работе представлена математическая постановка задачи теории упругопластического течения спеченных порошковых материалов в процессе угловой раскатки заготовки. В основу континуальной теории пластичности, с помощью которой предсказывается поведение материалов при различных напряженных состояниях, положена гипотеза о существовании критерия пластичности.

Ключевые слова: технология, ротационное пластическое деформирование, порошковый материал, эллиптическое условие пластичности, фланец.

Детали с фланцами, удаленными от торца, находят широкое применение в машиностроении. Разработанная технология угловой раскатки деталей с фланцами на порошковых заготовках расширяет технологические возможности процессов объемного формообразования деталей данного класса: поперечно–клиновой прокаткой, выдавливанием, торцовой раскаткой и др. [1].

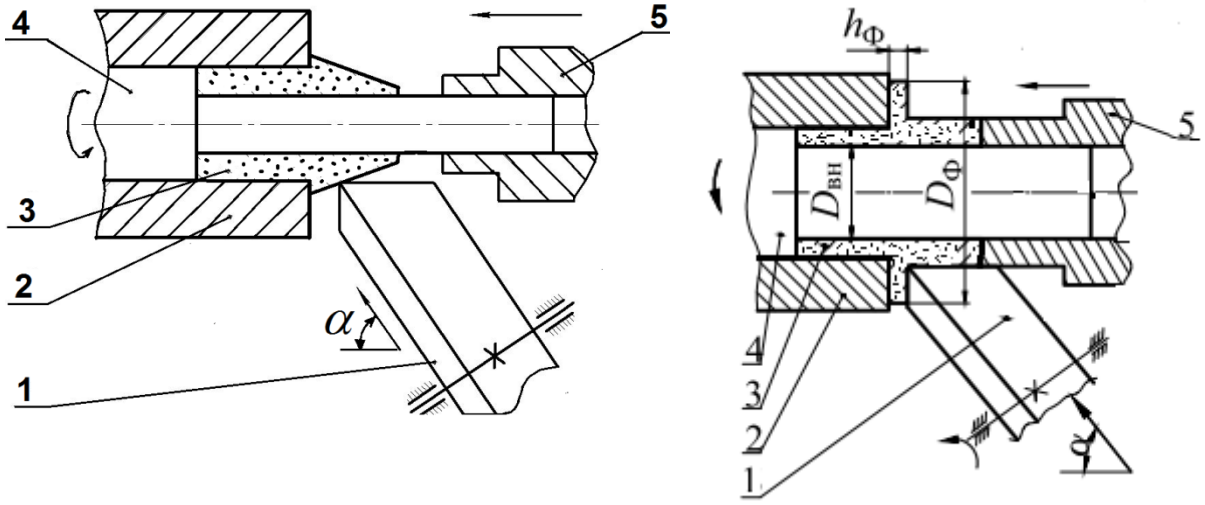
Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса угловой раскатки деталей с фланцами из спеченных порошковых материалов, для анализа напряженного и деформированного состояний заготовки при ее раскатке и определения рациональных технологических режимов.

В соответствие с предлагаемой технологией, заготовку из спеченного

порошкового материала формуют таким образом, чтобы выставленный участок заготовки 3 приобрел форму усеченного конуса. Заготовку 3 одевают на оправку 4 и устанавливают в матрицу 2 (рис. 1а).

Раскатка заготовки выполняется валком 1, установленным под углом α. к оси приводной матрицы. Упор 5 подводится к заготовке и обеспечивает необходимую форму втулочной части детали. Валок 1 деформирует участок усеченного конуса заготовки и деталь приобретает требуемую форму (рис. 1б). Благодаря заданному углу α. наклона валка происходит интенсивное течение металла в радиальном и осевом направлениях. При этом радиальное течение металла обеспечивает получение фланца, а течение металла в осевом направлении приводит к формированию ее втулочной части. На рис. 1б обозначено $h_Ф$ – толщина фланца, $D_Ф$ – диаметр фланца, $D_{ВН}$ – внутренний диаметр детали [2].

В отличие от компактных материалов, пористые, в частности, спеченные порошковые материалы деформируются с необратимым изменением объема, увеличивая плотность за счет уменьшения объема пор.



а) Исходные состояние заготовки и положение раскатного валка

б) Раскатка порошковой детали с фланцем

Рисунок 1 – Стадии раскатки порошковой детали с фланцем

Решение технологических задач обработки давлением пористых материалов предполагает, помимо нелинейной связи девиаторов напряжений и скоростей деформации, необходимость раскрытия нелинейной связи шаровых компонент тензоров напряжений и деформаций [3].

Идея представления пористого тела в виде полидисперсной среды с порами, использованная А.К. Григорьевым в работе [4], позволяет приме-

нить математический аппарат теории пластичности к решению технологических задач обработки давлением пористых материалов.

В основу континуальной теории пластичности, с помощью которой предсказывается поведение порошковых материалов при различных напряженных состояниях, положена гипотеза о существовании критерия пластичности – выражения *f*, связывающего компоненты тензора напряжений σ_{ij} таким образом, что при $f(\sigma_{ij})<0$ деформирование материала является упругим, а при $f(\sigma_{ij}) = 0$ – становится пластическим [5, 6].

Математическая постановка задачи теории уругопластического течения базируется на начале виртуальных скоростей. Для любого кинематически возможного поля скоростей δU в произвольный момент времени справедливо условие равенства мощностей внутренних и внешних сил [3]:

$$\int_V \sigma_{ij}\delta\dot{\varepsilon}_{ij}\cdot dV = \int_S p_i\delta U_i\cdot dS \quad , \qquad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформации; p_i – компоненты внешних сил на поверхности S; V – объем тела; S – площадь поверхности, состоящая из площади поверхности S_u , где определены скорости, и S_t – площадь поверхности, на которой заданы внешние силы p_j.

Результатом решения является вектор скоростей $\{U\}$ в узловых точках $\{u\}$, значения которого используются для определения компонент тензоров скоростей деформаций и напряжений.

В отличие от компактного материала, пористые материалы деформируются под действием гидростатического давления. Поэтому поверхность пластичности для пористых материалов должна быть замкнутой в направлениях главных напряжений.

Эллиптическое условие пластичности является логическим следствием условия Губера-Мизеса без каких-либо допущений о форме и размерах пор пористого тела. Независимо от формы поры и элемента полидисперсного тела, при гидростатическом сжатии и чистом сдвиге, эллиптическое условие пластичности имеет вид [7]:

$$\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_S^{ПМ}}\right)^2+\left(\frac{T}{\tau_S^{ПМ}}\right)^2=1, \qquad (2)$$

где σ_0 – гидростатическое давление в точке континуума пористого тела, T – интенсивность касательных напряжений, $\sigma_S^{ПМ}=\frac{\sigma_S}{k_{\sigma 0}}$, $\tau_S^{ПМ}=\frac{\tau_S}{k_\tau}$, σ_S и τ_S – пределы текучести материала при растяжении и сдвиге, $k_{\sigma 0}$ и k_τ – коэф-

фициенты концентрации напряжений, $k_{\sigma 0} = \frac{3}{2(1-П)}$, П – пористость материала, $k_\tau = \frac{\tau_{Z\theta}}{\tau_{НОМ}}$, $\tau_{Z\theta}$ – касательное напряжение при кручении сферической оболочки вокруг оси *Z*, $\tau_{НОМ}$ – номинальное касательное напряжение.

Использование модели упруговязкопластического течения позволяет прослеживать процесс угловой раскатки деталей с фланцами на пористой заготовке во времени. Наличие упругой составляющей скорости деформации дает возможность анализировать процессы, связанные с упругой разгрузкой при выходе раскатного валка их очага деформации. Алгоритм решения задачи упруговязкопластического течения следующий [3].

На первом шаге расчета задаются начальные приближения коэффициента пропорциональности девиаторов напряжений и скоростей деформации μ и модуль необратимой объемной скорости деформации *K*, что позволяет решить систему уравнений теории течения. При заданном первом приближении параметра μ и вычисленных значениях скорости деформации определяются компоненты девиатора напряжений.

Используя упругие характеристики материала и заданные значения μ и *K*, определяются новые значения коэффициента вязкости и модуля необратимой объемной скорости деформации. По величинам плотности материала, степени и скорости деформации вычисляются пределы текучести пористого материала при гидростатическом сжатии и сдвиге.

На следующем этапе нагружения, при принятом условии пластичности (2), вычисляются новые значения коэффициента вязкости μ и модуля необратимой объемной скорости деформации *K*. При новых значениях параметров μ и *K* вновь решается система уравнений теории течения. Расчет завершается проверкой выполнения условия пластичности (2).

Установлено, что основными факторами, оказывающими влияние на величины напряжений в порошковой заготовке в процессе ее формообразовании угловой раскаткой, являются пределы текучести материала заготовки при растяжении и сдвиге, исходная пористость заготовки, форма и величина подачи раскатного валка, закон трения в очаге деформации.

Прогнозируемые по предлагаемой методике значения технологических параметров отличаются от экспериментальных на 20...25%, что подтверждает адекватность математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение RU 2499648 C1 Российская Федерация. МПК B21D 22/16, B21H 1/18 / Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / В.Н Востров, П.А. Кононов. Заявка 2012126429/02; Патентооб-

ладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; заявл. 25.06.2012; опубл. 27.11.2013. Бюл. № 13.
2. Востров В.Н. Моделирование процесса раскатки фланцев на порошковых заготовках [Текст] / В.Н. Востров, Е.Д. Шевченко, К.О. Лоськов / Материалы научно-практической конференции с международным участием "Неделя науки СПбПУ" // СПб.: изд. СПбГПУ, - 2016. - С. 176-178.
3. Рыбин Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / Ю.И. Рыбин, А.И Рудской, А.М. Золотов //СПб.: Наука, 2004. – 644 с.
4. Григорьев А.К. Деформация и уплотнение порошковых материалов [Текст] / А.К. Григорьев, А.И. Рудской //М.: Металлургия, 1992. – 193 с.
5. *Han Xinghui. 3D FE modeling of contact pressure response in cold rotary forging* [Текст] / *Xinghui Han, Lin Hua // Tribology International. V*. 57. 2013. – *P*. 115–123.
6. *Govik Alexandr. Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly* [Текст] / *Alexandr Govik, Larsgunnar Nilsson, Ramin Moshfegh // Journal of Materials Processing. Technology. V*. 7(212). 2012. – *P*. 1453–1462.
7. Шестаков Н.А. Уплотнение, консалидация и разрушение пористых материалов [Текст] / Н.А. Шестаков, Субич В.Н., Демин В.А. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 268 с.

V. Vostrov, K. Loskov

MATHEMATICAL MODELING OF THE ANGULAR ROLLING OF PARTS MADE OF POWDER MATERIALS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper presents a mathematical formulation of the problem the theory of currents ProgOptions sintered powder materials in the process of rolling out a corner of the workpiece. The basis of the continuum theory of plasticity, which predicted the behavior of materials under different stress States, based on the hypothesis of the existence of the criterion of plasticity.

Key words: technology, rotational plastic deformation, the powder material, the elliptical condition of plasticity, flange.

УДК 621; DOI 10.1872/MMF-2016-102

А.В.Головкин[1], Е.В. Максютина[2]

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ - КЛЮЧ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НЕОИНДУАСТРИЛИЗАЦИИ И САМОЗАНЯТОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В РОССИИ

[1]Алексей Вячеславович Головкин
Начальник конструкторского бюро отдела средств автоматизации и механизации металлургического производства ОАО "АВТОВАЗ" Россия, Тольятти
Тел.: (8482) 73-82-21 E-mail: bear2003@inbox.ru

[2]Елена Владимировна Максютина, к.э.н., доцент
Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета
Россия, Набережные Челны
Тел.: (8552) 39-66-12, E-mail: lena.betty@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросам развития аддитивных технологий как фактора неоиндустриализации и самозанятости населения России. Предлагается возможность совместного применения субтрактивных и аддитивных технологий на предприятиях России. Анализируется возможность инновационного взрывного роста, и расширения ареала развития технологий 3D-принтинга на крупных промышленных предприятиях. Также в статье уделено внимание самозанятости населения, человеческому капиталу и популяризации аддитивных технологий в СМИ.

Ключевые слова: аддитивные технологии, субтрактивные технологии, 3D-принтинг, неоиндустриализация, самозанятость

Устойчивой тенденцией развития рынка труда является рост самозанятости населения. Самозанятость – это такая форма экономической деятельности, когда человек работает сам на себя в рамках собственного бизнеса. Примерами самозанятости являются: розничная продажа, ремонт автомобилей, программирование, риэлторская деятельность, транспортные услуги и т.д. Мы предлагаем дополнить этот список производством продукции с применением технологии 3D - печати. Ведь 3D принтер - это такое мини производство, на котором можно изготавливать различные изделия. Благодаря широкому внедрению 3D-принтинга, в России может появиться большое количество индивидуальных предпринимателей, которые будут работать на дому в гаражах или мелких мастерских. Они смогут создавать изделия, которые

раньше по силам были лишь крупным предприятиям. Это создаст отличные условия для развития индивидуального предпринимательства и малого бизнеса, самозанятости населения. И мы просто уверены, что к 2030 году почти у каждого гражданина нашей страны будет 3D принтер, так же как сейчас имеется сотовый телефон.

В мире активно развиваются аддитивные технологии. По данным Wohlers Associates, 38% мировой индустрии аддитивных технологий приходится на США, на втором месте Япония с 9,7%, за ней следует Германия с 9,4% и Китай с 8,7% [1, с.58]. В России эта отрасль развивается недостаточно интенсивно. Нет массового применения во всех областях народного хозяйства. Аддитивные технологии используются в основном в лабораторных условиях для опытного производства или для личного печатания различных поделок индивидуальными потребителями. Это происходит потому, что занимаются технологией 3D-печати молодые люди, которые не связаны с производством и не знают потребности различных предприятий. Как же активизировать процесс развития аддитивных технологий в России, придать ему ускорение и динамику?

Главной проблемой является длительность производства (печатания) детали. На данном этапе развития этой технологии скорость печати очень низкая и не удовлетворяет требованиям промышленного производства. Пока не достаточно широк круг материалов, используемых в 3D-печати. В основном распространение получили различного рода пластики. В 3D принтерах, производящих металлические изделия, используют различные композиции металлических порошков на основе титана, никеля, алюминия и других металлов, но они пока очень дороги.

Также существенным препятствием для широкого внедрения в России аддитивных технологий является отсутствие базы национальных стандартов для аддитивного производства, в частности, по общей и специальной квалификации материалов (металлопорошковые композиции и синтезированные материалы), конструкциям, технологиям, оборудованию, контролю качества, контролю свойств и порядку применения деталей аддитивного производства в изделиях и др. [3].

В настоящее время мы должны подготовить инфраструктуру для будущей промышленной революции, основанной на технологии 3D-печати. Речь идет о недорогих бюджетных 3D принтерах по технологии FDM (Fused deposition modeling),стоимостью от 40-120 тыс. руб., сейчас они наиболее распространены. Почему выбор пал на них? Потому что это самый массовый сегмент в данной отрасли. Что мы предлагаем? Мы предлагаем освоить серийное, а затем и массовое производство на их основе. Это позволит вовлечь миллионы людей в процесс изготовления нужной государству продукции, тем самым обеспечив самозанятость населения.

Будущие аддитивные технологии позволят производить массовый продукт. Уже сейчас есть перспективные разработки, основанные на выращивании сразу нескольких деталей с максимальными габаритами. Это технология создания многолучевой системы селективного лазерного плавления. Сколько лучей, столько и деталей создаётся на отдельных столах. Или это может быть совместное использование субтрактивных и аддитивных технологий. Есть попытки создания такого оборудования. Но это пока будущие технологии. Нам надо подготовить инфраструктуру, человеческий капитал, вырастить людей, способных заниматься этой деятельностью. Необходимо создать среду, культуру, изменить сознание людей под новые технологические возможности, выработать механизмы хозяйственной деятельности. Важно решить весь комплекс проблем, начиная от заказа, производства, доставки, сбыта продукции до её утилизации. А отрабатывать весь комплекс мер нужно на уже имеющихся технологиях.

Г.Форд в начале XX века стал первым использовать промышленный конвейер в поточном производстве автомобилей. Тем самым он дал мощный толчок для развития всей промышленности США. Говорят, что Форд создал Америку. Сейчас для России настал такой же поворотный момент в истории. Главное его не упустить. Какие новаторские идеи внёс Форд? Он сборку автомобиля разбил на мелкие технологические операции, которые со временем стало выполнять специальное оборудование, предназначенное только для данной операции. В России самым уязвимым местом массового производства является именно специальное оборудование. Оно очень дорогостоящее и в основном импортного производства. В этом состоит отставание нашей промышленности. Чтобы наглядно понять, чем отличается специальное оборудование массового производство от серийного и единичного, приведём простой пример. Возьмём обычный коврик пола, который лежит под ногами у водителя автомобиля. Для единичного производства нужно взять ножницы и вырезать необходимую конфигурацию из ткани. Для серийного производства понадобится серьёзный механизм, который будет формовать данный коврик. А для массового производства потребуется огромная автоматическая линия длинной около 20 метров высотой около 7 метров и стоимостью около миллиона долларов. Она будет формовать, обрезать, пробивать отверстия, приваривать различные накладки и всё это без участия человека 24 часа в сутки. Многие критиковали наш автопром за то, что смена новых моделей была слишком медленная (раз в 8-10 лет). Так вот медленной она была именно из-за очень высокой стоимости специального оборудования, ведь таких деталей в автомобиле несколько тысяч.

Теперь нам даётся уникальная возможность ликвидировать вековую отсталость российской промышленности в массовом сегменте

производства. И западные технологии в этом случае будут не нужны. Наша страна станет самодостаточной, с полным циклом переработки от сырья до готовой продукции.

При сегодняшнем развитии интернет-технологий можно производить продукцию, не выходя из дома. Концентрация людей на предприятии не нужна. Ненужным становится и конвейер для сборки деталей. Можно выращивать изделия в собранном виде. Сборка будет узловая или в модульном виде. Классическая модель предприятия постепенно будет изживать себя. Во многом этот процесс уже запущен.

Деиндустриализация в России прошла, оставив тяжёлое наследство в виде тысяч моногородов. Есть даже планы ликвидации некоторых из них. Что же им может помочь? Это неоиндуастрилизация, новые технологии производства и самозанятость населения. Вместо того чтобы платить пособие безработным гражданам, нужно повернуть их лицом к аддитивным технологиям и на этой основе организовать самозанятость населения под контролем государства.

Для реализации этих идей необходимо принять национальную программу по неоиндуастрилизации и самозанятости населения, основанную на развитии аддитивных технологий. Государством выделяются средства, и создаются механизмы контроля, определяется структура управляющего центра, в котором будут храниться математические модели различных изделий. На первом этапе это можно сделать на базе профильной фирмы. Управляющий центр создаёт сайт для формирования заказов, обучающих видео-семинаров, патентных исследований, всей необходимой информации для производства продукции, а также интернет-магазин готовых изделий. Заказы должны быть двух категорий. Это госзаказы и биржа для частных лиц. Прототипом может служить биржа фрилансеров. Соискатель заходит на сайт, знакомится с работой, сроками выполнения, стоимостью работы, технологическими моментами, с вопросами качества, предъявляемыми к данному изделию, и заключает договор. После выполнения работы направляет её заказчику. Можно использовать почту России или другие методы доставки в зависимости от срочности работы. Оплата происходит после приёмки заказчиком с удержанием всех налогов. Кстати, нечто подобное уже создано в США. В Чикаго Digital Lab запустил открытую онлайн-платформу программного обеспечения для проектирования и сотрудничества в режиме реального времени. Но наш Управляющий центр должен иметь значительно больше функций.

Что бы проиллюстрировать эффективность данного метода работы можно привести такой пример. У каждого сегодня есть сотовый телефон, у многих компьютер. Представим, что такую же популярность получили 3D принтеры, а они получат, если немного снизятся цены. Так вот, представим себе, что у одного миллиона человек есть один миллион 3D принтеров, и

все они одновременно напечатали болт. Получилось сразу, почти мгновенно,один миллион болтов. Кого не впечатлило слово болт, может заменить его на любое понравившееся изделие. А это массовое производство продукции. Всё это можно делать уже сейчас на современном технологическом уровне.

Как мы уже отмечали выше, на данном этапе развития эта отрасль испытывает застой или лучше сказать нет динамики быстрого развития. Для большинства людей 3D-принтер - это просто дорогая игрушка. Что может придать взрывной рост и позволит в разы расширить ареал развития аддитивных технологий? Это применение аддитивных технологий на самых крупных предприятиях страны. Где много людей, много разноплановых задач, которые требуют каждодневного решения. Хотя сами эти предприятия часто не заинтересованы в инновациях. На первом месте стоит получение быстрой прибыли. Поэтому должна быть государственная политика в этой сфере, направленная на внедрение перспективных технологий в производство.

Так же очень важна реклама аддитивных технологий на государственном уровне. Это могут быть различные передачи на телевидении, шоу, где показывается, как человек зарабатывает своим умом деньги. Разрабатывает востребованную вещь, размещает её в интернет-магазине и успешно реализует. Уверены, что в такой стране как Россия, народная смекалка, которая является символом нации, создаст уникальные вещи. И Россия станет мировым лидером в новой технической революции 4.0.

Какие же сферы применения аддитивных технологий наиболее вероятны? Это ремонт оборудования, конструкторские работы, наглядные образцы для рабочих при выполнении очень сложных операций и многое другое. Для наглядности приведём пример. Вышло из строя очень ценное оборудование. На складе нужной запчасти не оказалось. Когда составляли заявки на год, всё было, но потом сократили бюджет и в нужном количестве не закупили. Требуется срочно временное решение, чтобы не остановить производство. Вот здесь аддитивные технологии помогут быстро решить поставленную задачу.

Мы предлагаем примерную структуру для широкого использования аддитивных технологий в производстве на примере такого гиганта индустрии как ОАО «АВТОВАЗ»:

1. Создаётся управление по развитию аддитивного производства.
2. Организовываются внедренческие лаборатории на базе УЛИР (Управление лабораторно-исследовательских работ).
3. В производствах создаются бюро по внедрению аддитивных технологий.
4. Создаются опытно-внедренческие лаборатории по всем интересующим АВТОВАЗ темам на базе технопарка.

5. Осуществляется взаимодействие с другими лабораториями аддитивных технологий в нашей стране и за рубежом.

На производстве в конструкторских и ремонтных отделах 3D-принтеры должны быть в каждом бюро. Чтобы повысить мотивацию работников к использованию аддитивных технологий нужно ввести систему материальных поощрений. Также как это делается по рационализаторским предложениям и с такой же правовой базой. За каждое новое применение деталей, изготовленных на 3D принтерах, выплачивается небольшое вознаграждение. Средства на НИОКР поступают от государства и заинтересованных фирм. Работник, который успешно применил новый метод, выкладывает на сервер предприятия математическую модель детали, фотографии распечатанной детали и того места в оборудовании, куда оно устанавливается. После выхода детали из строя, записывается стойкость этого изделия. Данные с заводского сервера поступают в управляющий центр за определённую плату или государственные субсидии.

Опытным полигоном для аддитивных технологий должны стать технопарки и инновационные города. В них должны производиться изделия аналогичные головной кампании, но по аддитивной технологии. Вложения головного предприятия на первом этапе будут минимальны. Нужно рабочее место и компьютерное оборудование с профильными программами, а также знающий своё дело человек. Думаем, что это будет опытный конструктор или проектировщик. Создаётся математическая модель выпускаемого изделия, но по аддитивной технологии. Проводятся все расчёты и испытания с помощью компьютерных программ. Раз в месяц проводится производственное совещание, где сравниваются два изделия, произведённые аддитивным и субтрактивным методом. Если эффективность значительная, это могут быть и отдельные узлы и детали, то производятся дальнейшие действия по изготовлению опытных образцов и стендовые испытания. Отработка коммуникационных и структурных связей на начальном этапе тоже должна проходить в технопарках.

Небольшими партиями детали направляются из одного технопарка, где производят, в другой, где собирают изделия. При этом фиксируются все вопросы, которые возникают в ходе работы. В общем, технопарки - это опытный полигон для отработки аддитивных технологий. Здесь начало всей деятельности. Прорабатываются все вопросы взаимодействия крупных предприятий с научными организациями в стране и за рубежом. Также важное место должны занимать опытные партии изделий, изготовленных на основе научных разработок новых материалов. В технопарках должно быть установлено более дорогое оборудование, которое можно брать в лизинг предпринимателям, не обладающим большими финансовыми возможностями.

Всё сказанное не может функционировать без участия человека. Главная задача государства в этих условиях - воспитать думающего, технически грамотного, отвечающим новым вызовам технической революции 4.0,гражданина своей страны. И начинать надо прямо с детского сада, давая азы моделирования в игровой форме, развивая и закрепляя полученные знания в начальной и средней школе. В высшем учебном заведении происходит окончательное формирование выбранной профессии, связанной с аддитивными технологиями. Выбор достаточно широк. Это такие направления, как медицина, биология, архитектура, дизайн, промышленное производство и многое другое.

Идеальным местом для технического развития детей являются детские технопарки и такие города как, Иннополис. Там формируется техническая культура и творческая среда, подготавливая ребёнка к новым техническим вызовам. В качестве примера можно привести сеть детских технопарков «Кванториум», создаваемых в российских регионах. Это новый формат дополнительного образования детей, который помогает со школьной скамьи выявлять одаренных детей и вовлекать их в научно-техническое творчество.

В высших учебных заведениях происходит изучение сложных программ проектирования в зависимости от выбранной специальности. Совместно с теорией по высшей математике идёт изучение построения сложных поверхностей. Чтобы развивать технологии, необходима подготовка квалифицированного персонала. Предлагаем в высших учебных заведениях активно открывать кафедры аддитивных технологий. Создавать новое научное направление, основанное на стыке наук биологии и механики – аддитивную биомеханику. Развивать аддитивные «зелёные технологии». Так же особо пристальное внимание необходимо обратить на подготовку кадров в области инжиниринга и промдизайна.

В заключении хочется сказать, что пока вышесказанное не стало реальностью из-за высокой цены на материалы и оборудование для аддитивного производства. Но так было и с автомобилем. Цена автомобиля в единичном производстве в десятки, а то и в сотни раз превышала цену его массового производства. Сегодня уже никого не нужно убеждать в необходимости развития аддитивной индустрии. 3D-принтинг широко распространяется в мире, и Россия не должна отставать в этой области. Для этого необходимо на государственном уровне разработать и начать реализацию программы развития аддитивных технологий. России в целом нужна неоиндустриализация. При этом особое внимание следует уделить развитию отраслей, составляющих основу так называемой Четвертой промышленной революции. Флагманом промышленной революции 4.0. выступает аддитивное производство, или технология 3D-печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинина Е. Железные перспективы / Е. Вершинина// Атомный эксперт. - 2014. - №5-6. - С. 56-61.
2. Губанов С.С. Державный прорыв. Неоиндустриализация России и вертикальная интеграция / С.С. Губанов. - М.: Книжный Мир, 2012. – С.224.
3. Дуболазов В.А. Неелова Н.В. О подготовке специалистов в области инновационного предпринимательства / В.А. Дуболазов, Н.В. Неелова // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 911-921.
4. Ефимов А.М., Салкуцан С.В. Поддержка малого инновационного бизнеса в машиностроительной отрасли / А.М. Ефимова, С.В.Салкуцан // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Под. ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 922-933.
5. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы /Е.Н. Каблов// Интелект&Технологии. - 2015.- №2 (11).
6. Комиссаров А. Технологический ренессанс: Четвертая промышленная революция /А. Комиссаров //Ведомости.- 2015.- №3938.
7. Романова С. Трипотень Е. Аддитивные технологии в России: поехали / С. Романова, Е. Трипотень// Атомный эксперт. - 2015. -№6. - С. 10-20.

A.V.Golovkin[1], E.V. Maksyutina[2]

ADDITIVE TECHNOLOGIES - THE KEY TO SOLVING PROBLEMS OF NEOINDUSTRIALIZATION AND SELF-EMPLOYMENT OF THE POPULATION IN RUSSIA

[1]AVTOVAZ, Russia;
[2]Naberezhnye Chelny Campus of Kazan Federal University, Russia

Abstract

The article is devoted to the development of additive technologies as a factor of neoindustrialization and self-employment of the population of Russia. At the enterprises of Russia offered the option of joint use of subtractive and additive technologies . Analyzes the possibility of innovative explosive growth and range expansion of technology development of 3D- printing in large

industrial enterprises. Also in the article the attention is paid toself-employment, human capital and the popularization of additive technologies in the media

Key words: additive technologies, subtractive technologies, 3D- printing, neoindustrialization, self-employment

REFERENCES

[1] Vershinin E. Iron perspectives / E. Vershinin // Nuclear expert. - 2014. - №5-6. - p. 56-61. (rus.)
[2] Gubanov S.S. Sovereign breakthrough. Neoindustrialization Russia and vertical integration / S.S. Gubanov. - M .: Book World, 2012. – 224 p. (rus.)
[3] Dubolazov V.A. Neelova N.V. About training of specialists in the field of innovative entrepreneurship / V.A. Dubolazov, N.V. Neelova // Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. Under. Ed. M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova.- SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2014. P. 911-921. (rus.)
[4] Efimov A.M, Salkutsan S.V. Innovative small business support in the engineering industry/ A.M. Efimova, S.V.Salkutsan // Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. Under. Ed. M.M. Radkevich and A.N. Evgrafova.- .SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University Press, 2014. P. 922-933.(rus.)
[5] Kablov E.N. Additive technology - the dominant national technological initiative /E.N. Kablov // Intellect & Technology. - 2015.- №2 (11). (rus.)
[6] Commissioners A. Technology Renaissance: The fourth industrial revolution / A. Commissioners //Vedomosti.- 2015.- №3938.(rus.)
[7] Romanova S. Tripoten E./Additive Technologies in Russia: go / S. Romanov, E. Tripoten // Nuclear expert. - 2015. -№6. - p. 10-20. (rus.)

УДК 621.9.048.4; DOI 10.1872/MMF-2016-103

Е.В. Иванова, М.А. Прозорова, Е.Л. Медведев, А.С. Швалев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ SWOT-АНАЛИЗА

Елена Владимировна Иванова, к.т.н., доцент
Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск, Россия E-mail: elvliv@rambler.ru

Марина Александровна Прозорова, ст. преподаватель
Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск, Россия

Егор Леонидович Медведев, курсант Т324 группы
Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск, Россия

Андрей Сергеевич Швалев, курсант Т324 группы
Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск, Россия

Аннотация

Управление качеством находит все большее применение при изготовлении и ремонте различных изделий машиностроения. В данной статье с помощью метода SWOT-анализа определены стратегические позиции метода электроискрового легирования на рынке упрочняющих и восстанавливающих технологий и предложены мероприятия по повышению эффективности и конкурентоспособности данного метода.

Ключевые слова: управление качеством, SWOT-анализ, технология, электроискровое легирование, конкурентоспособность, повышение эффективности.

Актуальность поставленной задачи. В настоящее время возрастает потребность в улучшении качества изделий машиностроения, что в значи-

тельной степени определяет темпы технического прогресса, внедрение инноваций, рост эффективности производства и, в первую очередь, показателей надежности.

Качество продукции является одним из важнейших средств конкурентной борьбы, завоевания и удержания позиций на рынке производства и потребления. Поэтому уделяется особое внимание обеспечению качества изделий машиностроения [1-5].

В процессе эксплуатации машиностроительные изделия утрачивают свои первоначальные физико-механические и трибологические свойства. Возникает потребность в восстановлении этих характеристик с помощью различных технологических процессов [6-8]. К числу современных технологий восстановления металлических поверхностей относится электроискровое легирование (ЭИЛ), позволяющее получать покрытия с повышенными физико-механическими и триботехническими свойствами [9, 10].

Метод ЭИЛ основан на явлении переноса материала легирующего электрода (анода) на упрочняемую поверхность (катод) при искровом разряде в газовой среде (рис. 1).

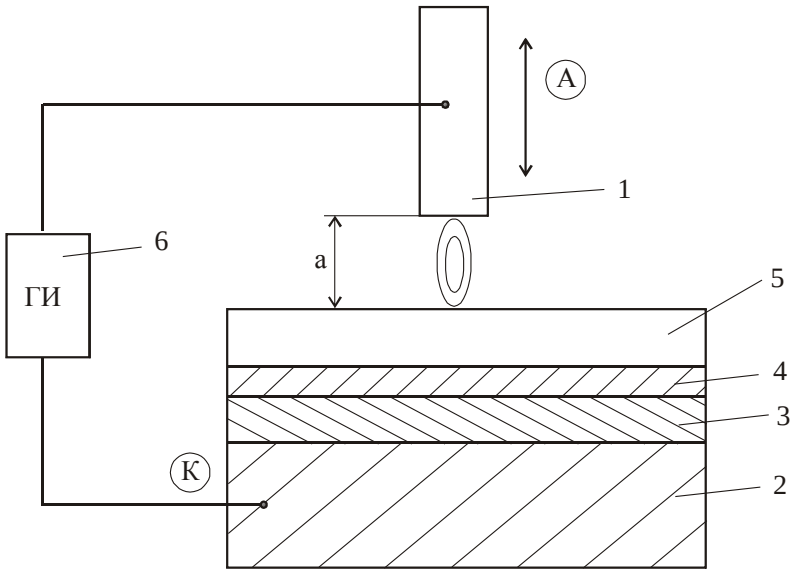


Рис. 1. Общая схема процесса электроискрового легирования:
1 – легирующий электрод (анод, А); 2 – обрабатываемая деталь (катод, К); 3 – зона термического влияния; 4 – диффузионный упрочненный слой; 5 – слой покрытия; 6 – генератор импульсов (ГИ); а – межэлектродный промежуток.

При сближении легирующего электрода с упрочняемой поверхностью происходит искровой разряд длительностью $10^{-6} \div 10^{-3}$ с. В результате на поверхностях анода и катода образуются локальные очаги плавления и испарения, вызывающие их электрическую эрозию и взаимный массопере-

нос. На катоде формируется новый композиционный поверхностный слой с изменёнными физико-химическими и механическими свойствами.

Верхний слой покрытия состоит из материала легирующего электрода, насыщенного элементами межэлектродной среды. Под ним располагается упрочненный слой, состоящий из смеси материалов анода и катода, образующийся в результате диффузии химических элементов материала анода в материал катода. Под ним располагается наибольший по толщине слой, образованный в результате теплового воздействия (зона термического влияния). С перемещением вглубь структура зоны термического влияния переходит в структуру основного материала.

Несмотря на преимущества технологии, отмеченные в работах [1, 6, 9, 10], использование деталей, обработанных ЭИЛ, в промышленности весьма незначительно. Широкое применение этого способа ограничивается слабой управляемостью процессами, сопровождающими ЭИЛ, и как следствие, целенаправленным формированием эксплуатационных свойств поверхностных слоев.

В 2013 году исполнилось 75 лет методу ЭИЛ. Этому событию была посвящена Международная научно-техническая конференция в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете [11]. На конференции, отмечалось, что по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения и термообработки преимуществами ЭИЛ являются:

– высокая прочность сцепления покрытия и материала детали;

– возможность нанесения на упрочняемую поверхность любых токопроводящих материалов;

– локальная обработка поверхности;

– отсутствие нагрева всей детали в процессе обработки;

– диффузионное обогащение поверхности детали составными элементами легирующего электрода без изменения размеров детали.

Несмотря на достоинства метода, применение его в промышленности весьма незначительно. Для определения конкурентной позиции технологии ЭИЛ на рынке упрочняющих и восстанавливающих методов, использована методика SWOT-анализа [12, 13]. SWOT-анализ строится на выявлении сильных и слабых сторон технологии, а также возможностей, которые можно развить, и опасностей, которые ее сопровождают.

Цель работы состоит в определении на основе SWOT-анализа стратегической позиции метода ЭИЛ на рынке упрочняющих и восстанавливающих технологий и предложение мероприятий по повышению эффективности и конкурентоспособности данного метода.

SWOT-анализ – это аббревиатура четырех слов: *strength* – сила, *weakness* – слабость, *opportunities* – возможности, *threats* – опасности.

Сильные стороны – это достоинства технологии, которые выделяют ее среди конкурентов.

Слабые стороны – это недостатки технологии, требующие немедленного устранения, иначе эти недостатки станут сильными сторонами методов-конкурентов.

Возможности – это перспективные направления развития технологии, шанс сделать что-то новое.

Опасности – это потенциальные осложнения (угрозы), которые могут повредить рассматриваемой технологии.

SWOT-анализ предполагает определение сильных (S) и слабых (W) сторон, потенциальных внешних угроз (T) и благоприятных возможностей (O) и их оценку выраженную в процентах. Классическим примером такого анализа является составление таблиц S, W, O, T. Основной упор сделан не на методы определения и оценку S, W, O и T, а на формулирование конкретных стратегий и мероприятий на основе S и W с учетом O и T.

После определения S, W, O, T составляют матрицу стратегий: 1) SO – мероприятия, которые необходимо провести, чтобы использовать сильные стороны для увеличения возможностей; 2) WO – мероприятия, которые необходимо провести, преодолевая слабые стороны и используя представленные возможности; 3) ST – мероприятия, которые используют сильные стороны для преодоления угроз; 4) WT – мероприятия, которые минимизируют слабые стороны для преодоления угроз.

Обсуждение результатов. Для проведения SWOT-анализа исследуют факторы внешней и внутренней среды, оказывающие влияние на формирование конкурентной позиции технологии ЭИЛ. Таких факторов может быть огромное количество. Но из них необходимо выбрать лишь те, которые оказывают наибольшее влияние. Качественный анализ технологии ЭИЛ, связанный с определением трех наиболее значимых составляющих метода, представлен в табл. 1.

В дальнейшем экспертным методом определяли степень взаимного влияния друг на друга сильных (S) и слабых сторон (W), возможностей (O) и опасностей (T). Для этого вводится следующая шкала влияния в баллах: 2 – сильное влияние, 1 – среднее влияние, 0 – влияние отсутствует. Результаты метода SWOT представлены в виде количественного анализа в табл. 2.

Средняя значимость сильной стороны - 56 %, слабой стороны – 72 %, возможностей – 67 %, опасностей – 61 %.

Согласно полученным результатам, технология ЭИЛ недостаточно эффективна и управляема, так как средний процент сильной стороны меньше среднего процента слабой; в то же время средний процент возможностей превышает средний процент опасностей. Представленные в табл. 2 результаты показывают, что наиболее весомой слабой стороной метода ЭИЛ является недостаточная управляемость процессами ЭИЛ, а наибольший резерв повышения эффективности ЭИЛ заложен в возможности расширения номенклатуры легирующих электродов.

Таблица 1

Качественный анализ формирования покрытий методом ЭИЛ

Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
1. Высокая прочность сцепления покрытия и материала основы. 2. Отсутствие нагрева всей детали в процессе обработки, что не влияет на основную структуру металла. 3. Высокая микротвердость и износостойкость покрытия.	1. Недостаточная управляемость. 2. Малая толщина покрытия. 3. Высокая шероховатость покрытия.
Возможности (O)	**Опасности (T)**
1. Расширение диапазона энергетических режимов (энергии в импульсе). 2. Расширение номенклатуры легирующих электродов. 3. Введение газовой среды в межэлектродный промежуток.	1. Повышение остаточных напряжений в покрытии и поверхностном слое. 2. Несплошность покрытия. 3. Неравномерность свойств покрытия.

Таблица 2

Количественный анализ формирования покрытий методом ЭИЛ (Σ – сумма; Р – значимость факторов; И – итог, среднее значение)

		Сильные стороны (S)			Слабые стороны (W)			Σ	Р, %	И, %
		1	2	3	1	2	3			
Опасности (T)	1	0	2	1	1	0	1	5	42	61
	2	1	0	1	2	2	2	8	67	
	3	2	1	1	2	1	2	9	75	
Возможности (O)	1	1	1	1	2	2	1	8	67	67
	2	2	1	2	2	2	0	9	75	
	3	0	1	2	2	1	1	7	58	
Σ		6	6	8	11	8	7			
Р, %		50	50	67	92	67	58			
И, %		56			72					

Исходя из полученных результатов, необходимо предложить план мероприятий по повышению эффективности технологии ЭИЛ за счет использования возможностей.

Система технического контроля. В настоящее время уделяется большое внимание совершенствованию средств и методов технического

контроля на машиностроительном производстве при осуществлении различных технологических процессов. Основной задачей технического контроля является предотвращение получения машиностроительной продукции, не удовлетворяющей установленным требованиям. Поэтому, повышение эффективности и конкурентоспособности технологии ЭИЛ возможно при разработке системы технического контроля (СТК).

СТК позволяют решить ряд актуальных задач, в частности, предоставить оперативный доступ к информационным ресурсам, осуществить математическое моделирование для принятия обоснованных решений при осуществлении технологического процесса [14].

Общий план мероприятий по повышению эффективности и конкурентоспособности технологии ЭИЛ представлен в табл. 3.

Таблица 3

План мероприятий по повышению эффективности и конкурентоспособности технологии ЭИЛ

№ п/п	Факторы	Мероприятия	
1	Усиление слабых сторон	1.1	Разработка системы технического контроля.
		1.2	Увеличение толщины покрытия.
		1.3	Уменьшение шероховатости покрытия.
2	Исследование возможностей	2.1	Расширение диапазона энергетических режимов (энергии в импульсе).
		2.2	Расширение номенклатуры легирующих электродов.
		2.3	Введение газовой среды в межэлектродный промежуток.

Для контроля процесса ЭИЛ наиболее важно управлять такими параметрами, изменение которых ведет за собой изменение качества обрабатываемой детали. Диапазон таких параметров большой. Целесообразно, весь технологический процесс ЭИЛ разбить на следующие основные этапы.

Первичный контроль:

1. Физические свойства материала детали (тип стали или сплава), физико-механические свойства поверхности.

2. Определение направления технологического воздействия.

2.1 Ремонт и восстановление качества поверхности (контроль глубины упрочненного слоя и толщины покрытия).

2.2. Улучшение эксплуатационных свойств детали, с целью получения поверхности с требуемыми свойствами (контроль микротвердости и контроль износостойкости поверхностного слоя).

2.3. Проведение методами математического моделирования виртуального эксперимента по определению оптимальной толщины упрочненногослоя.

Технологические параметры:

1. Выбор материала легирующего электрода.

2. Выбор оптимальных режимов технологической обработки.

3. Выбор режима технологической обработки: ручной или механизированный.

4. Выбор межэлектродной среды.

Завершающий контроль.

Контроль качества поверхности обработанной детали и эксплуатационных свойств поверхности.

Исходя из этого, технологический процесс ЭИЛ можно представить в виде следующей схемы: легирующий электрод – обрабатываемая деталь – межэлектродная среда – технологические режимы установки. Все указанные компоненты являются составными частями СТК процесса ЭИЛ, блок-схема которой представлена на рис.2.

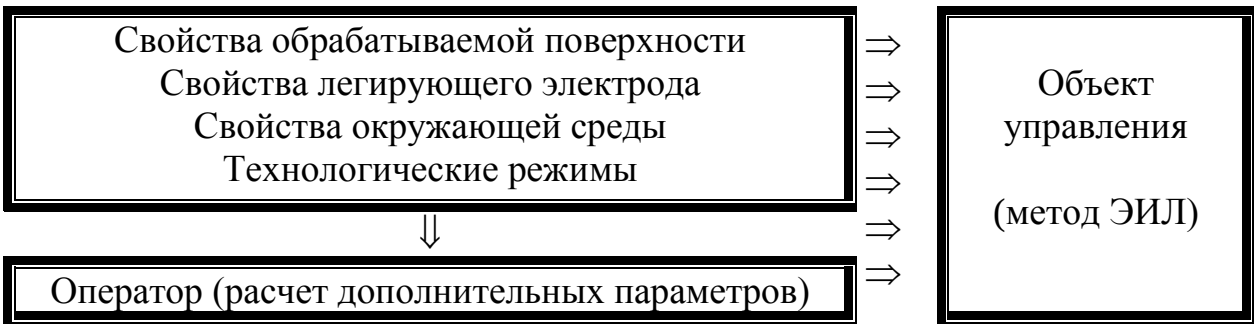


Рис. 2. Блок-схема системы технического контроля метода ЭИЛ

Заключение. Таким образом, СТК является неотъемлемой частью технологического процесса ЭИЛ, ее разработка обеспечит эффективное управление, направленное на повышение качества обрабатываемой поверхности. Реализация всех выше указанных мероприятий будет способствовать повышению эффективности и конкурентоспособности метода ЭИЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В., Худякова О.Д. Управление качеством формирования износостойких поверхностных слоев методом электроискрового легирования // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2015. – № 5(218). – С. 34-37.
2. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. – 2014. – № 1(45). – С. 63-69.

3. Астащенко В.И., Оловянишников В.А., Швеев А.И., Швеева Т.В. Контроль качества металла цементованных зубчатых деталей по усовершенствованным критериям // Технология металлов. – 2014. – № 8. – С. 31-36.
4. Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф. WEB-сервисы в системе управления качеством машиностроительной продукции // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной науч-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. – С. 472-478.
5. Маслов В.И., Арустамян А.И., Минаков В.Ф. Дистанционный контроль в системе управления качеством заливки металла // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Международной науч-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. – С. 450-459.
6. Управление технологическими режимами при электроискровом легировании металлических поверхностей / Иванова Е.В[и др.]// Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: Сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конференции. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2015. – С. 47-50.
7. Коробейников Л.В., Никишина Л.А., Одиноков С.А. Оценка технологических процессов в системе менеджмента качества // Технология металлов. – 2011. – № 10. – С. 47-51.
8. Вдовин К.Н., Лисовская М.А. Управление качеством процесса производства и эксплуатации прокатных валов / К.Н. Вдовин, М.А. Лисовская // Технология металлов. – 2013. – № 12. – С. 9-11.
9. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнука, 1995. – 323с.
10. Коротаев Д.Н., Машков Ю.К., Николенко С.В. Структурно-фазовое состояние и свойства поверхностного слоя, обработанного электроискровым легированием// Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 10. – С. 8-12.
11. Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий: материалы Международной научно-технической конференции. В 2-х частях. Ч.1. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГТУ, 2013. – 379с.
12. Матвеева А.А. Одиноков С.А. Анализ методов риск-менеджмента и их применение для проведения предупреждающих действий // Технология металлов. – 2011. – № 9. – С. 45-49.
13. Гольдштейн Г.Я. Стратегический менеджмент. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. –94с.
14. Иванова Е.В., Коротаев Д.Н. Разработка системы технического контроля электроискрового легирования // Инновация, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник трудов 4-ой Междунар. науч.-практ. конференции. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2014. – С. 235-239.

E.V.Ivanova, M.A.Prozorova, E.L.Medvedev A.S.Shvalev

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF THE METHOD OF THE ELECTROSPARK ALLOYING ON THE BASIS SWOT ANALYSIS

all: Omsk Tank-Automotive Engineering Institute of Khrulev Military Academy of Logistics, Russia

Abstract

Quality management finds the increasing application at production and repair of various products of mechanical engineering. In this article strategic positions of a method of an electrospark alloying in the market of the strengthening and restoring technologies are defined by a method of SWOT analysis and actions for increase of efficiency and competitiveness of this method are offered.

Key words: quality management, SWOT analysis, technology, electrospark alloying, competitiveness, efficiency increase.

REFERENCES

[1] Korotaev D.N., Ivanova E.V., Hudjakova O.D. Quality management of formation of wearproof blankets by method of an electrospark alloying // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem. – 2015. – № 5(218). – P. 34-37. (rus).

[2] Golubchik Je.M. Adaptive quality management of steel products // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2014. – № 1(45). – P. 63-69. (rus).

[3] Astashhenko V.I., Olovjanishnikov V.A., Shveev A.I., Shveeva T.V.Quality control of metal of the cemented gear details by advanced criteria // Tehnologija metallov. – 2014. – № 8. – C. 31-36. (rus).

[4] Maslov V.I., Arustamjan A.I., Minakov V.F. WEB services in a control system of quality of machine-building production // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrasovanie: Mater. of 2nd International scientific-practic. conference. – St.Peterburg.: Publ. Polytech.Univ., 2013. – C. 472-478. (rus).

[5] Maslov V.I., Arustamjan A.I., Minakov V.F. Remote control in a control system of quality of filling of metal // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrasovanie: Mater. of 3rd International scientific-practic. conference. – St.Peterburg.: Publ. Polytech.Univ., 2013. – C. 450-459. (rus).

[6] Management of the technological modes at an electrospark alloying of metal surfaces / Ivanova E.V.[and other] // Prospects of development of technologies of processing and the equipment in mechanical engineering: Collection of scientific articles of International scientific-practic. conference. – Kursk: Publ. JuZGU, 2015. – P. 47-50. (rus).

[7] Korobejnikov L.V., Nikishina L.A., Odinokov S.A. Assessment of technological processes in quality management system // Tehnologija metallov. – 2011. – № 10. – P. 47-51. (rus).
[8] Vdovin K.N., Lisovskaja M.A. Quality management of process of production and operation of rolling shaft // Tehnologija metallov. – 2013. – № 12. – P. 9-11. (rus).
[9] Verhoturov A.D. Formation of a blanket of metals at an electrospark alloying. – Vladivostok: Dalnuka, 1995. – 323p. (rus).
[10] Korotaev D.N., Mashkov Ju.K., Nikolenko S.V. Structural and phase state and properties of the blanket processed by an electrospark alloying // Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. – 2009. – № 10. – P. 8-12. (rus).
[11] Innovative materials and technologies: achievements, problems, decisions. Workshop on fundamental bases of creation of innovative materials and technologies: materials of the International scientific and technical conference. In 2 parts. P.1. – Komsomolsk-na-Amure: Publ. KnAGTU, 2013. – 379p. (rus).
[12] Matveeva A.A. Odinokov S.A. The analysis of methods of a risk management and their application for carrying out the warning actions // Tehnologija metallov. – 2011. – № 9. – P. 45-49. (rus).
[13] Goldshtejn G.Ja. Strategic management: manual. – Taganrog: Publ/ TRTU, 2003. – 94p. (rus).
[14] Ivanova E.V., Korotaev D.N. Development of the system of technical control of an electrospark alloying // Innovation, quality and service in equipment and technologies: Collection of scientific articles of 4th International scientific-practic. conference. – Kursk: Publ. JuZGU, 2014. – P. 235-239. (rus).

УДК 536.421; DOI 10.1872/MMF-2016-104

О. А. Калашникова

ЗАТВЕРДЕВАНИЕ МЕТАЛЛА В ЧУГУННОЙ ИЗЛОЖНИЦЕ И КЕРАМИЧЕСКОЙ ФОРМЕ С УЧЕТОМ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОНВЕКЦИИ И ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Ольга Александровна Калашникова
Донецкий Национальный Технический Университет,
83092, г. Донецк, ДНР
E-mail: minolgalex@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена и решена вариационным методом нестационарная задача затвердевания слитка в чугунной изложнице и керамической форме с учетом принудительной конвекции и воздушного зазора, образующегося при затвердевании слитка. Получена формула распределения температуры в жидкой фазе и зависимость продвижения фронта затвердевания от координат и времени. Выполнены численные расчеты времени затвердевания слитка в чугунной изложнице и керамической форме при различных значениях скоростей конвекции. Полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: функционал, вариация, фронт затвердевания, изложница, теплопроводность стенок, тепловое сопротивление, коэффициент теплопередачи.

Введение. Тепловые процессы, происходящие в затвердевающем слитке, существенным образом влияют на скорость затвердевания, на формирование структуры и на качество изделий, полученных из этого слитка. Многообразие факторов, влияющих на процесс затвердевания, приводит к необходимости решать сложные задачи тепломассопереноса, описывающие процесс затвердевания, который изучался как теоретически [1], так и практически [2]. Для более глубокого изучения тепловых процессов, протекающих в слитке при затвердевании, исследуют дифференциальные уравнения, описывающие тепловые гидродинамические и диффузионные процессы, сопровождающие затвердевание, аналитическими методами.

Влияние естественной конвекции на движение фронта затвердевания металла в чугунной и песчаной клинообразных изложницах рассмотрено численным методом в [3]. Влияние принудительной конвекции в изложнице с обратной конусностью при заданной температуре стенок изложницы

рассмотрено вариационным методом в [4]. В предлагаемой работе рассматривается влияние теплового сопротивления стенок изложницы, воздушного зазора и температуры окружающей среды на движение фронта затвердевания в чугунной изложнице и керамической форме при различных скоростях принудительной конвекции.

Постановка задачи. В данной задаче рассматривается затвердевание металла в клинообразной изложнице, имеющей в поперечном сечении вид вертикально вытянутой трапеции с малыми углами конусности α_1. Предполагается, что все тепло отводится через боковые стенки, площадь которых намного больше площади дна, торцов и верха. Заполнение изложницы металлом происходит быстро, металл перед заполнением перегревается. Поэтому, до тех пор, пока на границе соприкосновения металла с изложницей температура не опустится до температуры кристаллизации, затвердевание металла у стенок и дна будет незначительным и им можно пренебречь. Металл предполагается однородным по составу, поэтому затвердевание происходит при одной и той же температуре кристаллизации и тепловые константы, характеризующие жидкую и твердую фазу металла, не зависят от температуры. Вследствие того, что свободных поверхностей металла нет, не учитывается потеря тепла через излучение.

Решение поставленной задачи. При решении данной задачи последовательная кристаллизация рассматривается в клинообразной изложнице с боковыми поверхностями, расположенными под малым углом $2\alpha_1$ (рис.1). Область 1 – жидкий металл, 2 – твердый металл, 3 – воздушный зазор, 4 – стенки изложницы. Сверху и снизу изложница ограничена цилиндрическими поверхностями радиусами R_1 и R_2.

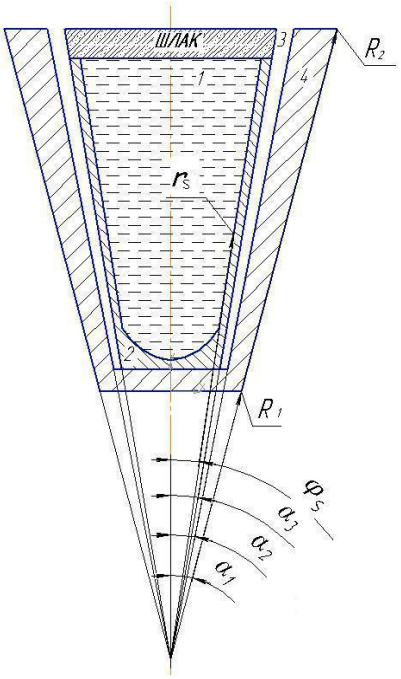


Рис. 1. Поперечное сечение изложницы с прямой конусностью

При решении задачи используется цилиндрическая система координат (r, φ, z). Задача считается бесконечной по z, поэтому температура и скорость движения фронта затвердевания не зависят от z. Уравнение теплопереноса в области жидкого металла запишем в следующем виде [5]:

$$\rho_1 C_{V1}\left(\frac{\partial T_1}{\partial t}+V_{\mathrm{r}}\frac{\partial T_1}{\partial r}+V_{\varphi}\frac{1}{r}\frac{\partial T_1}{\partial \varphi}\right)=\lambda_1\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_1}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2}\right) \quad (1)$$

при $0<\varphi<\varphi_s$; $r_s<r<R_2$. Фронт кристаллизации движется от боковой поверхности изложницы к центру и для малых углов конусности толщину затвердевшей корки можно найти по формуле:

$$\varepsilon(r_s,\varphi_s,t_s)=r_s(t_s)(\alpha_3-\varphi_s(t_s)). \quad (2)$$

Предполагается, что в момент t = 0 твердая фаза отсутствует, а $T_1(r,\varphi,0) = T_{\mathrm{H}}$ при $R_1<r<R_2$ и $0<\varphi<\alpha_1$. На фронте кристаллизации при $t > 0$ имеем $T_1(r_s,\varphi_s,t_s) = T_K$.

Во время кристаллизации металла соприкосновение жидкой фазы с фронтом кристаллизации считается плотным, без газообразных пузырей и других посторонних включений, поэтому при $r=r_s(t)$, $\varphi=\varphi_s(t)$ имеем $T_1(r_s,\varphi_s,t_s)=T_2(r_s,\varphi_s,t_s)=T_K$.

На движущемся фронте фазового перехода выделяется скрытая теплота кристаллизации L_1, которая вместе с теплом перегрева отводится через твердую фазу и выделяется в окружающую среду. Поэтому уравнение теплового баланса на фронте кристаллизации запишется в виде:

$$\lambda_1\frac{\partial T_1}{r\partial\varphi}+L_1\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}=K_{\mathrm{T1}}(T_{\mathrm{K}}-T_{\mathrm{CP}}). \quad (3)$$

Коэффициент теплопередачи K_{T1} учитывает тепловое сопротивление затвердевшей корки, воздушного зазора, стенок изложницы и теплоотдачу в окружающую среду [6]:

$$K_{T1}=\left(\frac{1}{\alpha_0}+\frac{r_s(\alpha_3-\varphi_s)}{\lambda_2}+\frac{r_s(\alpha_2-\alpha_3)}{\lambda_3}+\frac{r_s(\alpha_1-\alpha_2)}{\lambda_4}\right)^{-1}. \quad (4)$$

Уравнение (3) теплового баланса на фронте кристаллизации используется для определения $\varepsilon(t)$. Из уравнений (1), (2) и граничных условий найдем функции $T_1(r,\varphi,t)$ и $\varepsilon(t)$. Для решения уравнения (1) введем коэффициент температуропроводности $a_1=\lambda_1/(\rho_1 C_{V1})$ и перепишем (1) в следующем виде:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t}+V_{\mathrm{r}}\frac{\partial T_1}{\partial r}+V_{\varphi}\frac{1}{r}\frac{\partial T_1}{\partial\varphi}=a_1\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_1}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial\varphi^2}\right). \quad (5)$$

Полагая $\frac{\partial T_1}{\partial t}=0$, $\frac{\partial^2 T_1}{\partial\varphi^2}=0$, $V_{\mathrm{r}}=0$, $V_{\varphi}=0$ получим уравнение: $\frac{1}{r}\frac{\partial T_1}{\partial r}+\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2}=0$

.

Точное решение этого уравнения по r имеет следующий вид:

$$T_1(r) = \frac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})\ln r + T_{\text{К}} \ln R_2 - T_{\text{Н}} \ln r_s}{\ln(R_2 / r_{\text{s}})}. \quad (6)$$

Аппроксимируя (6) линейной функцией, получим:

$$T_1(r) = \frac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})r + T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_{\text{s}}}{R_2 - r_{\text{s}}}. \quad (7)$$

Приближенное решение по φ уравнения (5) для стационарного случая, когда $\partial T_1 / \partial t = 0$ ищем вариационным методом в виде: $T_1(r,\varphi) = T_1(r) \cdot f(\varphi)$

$$T_1(r,\varphi) = \frac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})r + T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_s}{R_2 - r_s} \cdot f(\varphi) \quad (8)$$

Получим

$$V_{\text{r}} \frac{\partial T_1}{\partial r} + V_{\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = a_1 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} \right). \quad (9)$$

Введем новые обозначения производных $\partial T_1 / \partial r = T_{\text{r}}$, $\partial^2 T_1 / \partial r^2 = T_{\text{rr}}$, $\partial^2 T_1 / \partial \varphi^2 = T_{\varphi\varphi}$, тогда уравнение (9) запишется в виде:

$$\frac{V_{\text{r}}}{a_1} r T_{\text{r}} + \frac{V_{\varphi}}{a_1} T_{\varphi} - T_{\text{r}} - r T_{\text{rr}} - \frac{1}{r} T_{\varphi\varphi} = 0. \quad (10)$$

V_r, V_{φ} - радиальные и азимутальные составляющие скорости конвекции в расплавленном металле [4]:

$$V_r = \frac{4V_{r.\max}}{(R_2 - R_1)^2} \cdot (R_2 - r) \cdot (r - r_s) \cdot \cos\left(\frac{\pi\varphi}{\varphi_s}\right), \quad (11)$$

$$V_{\varphi} = \frac{-4V_{r.\max}}{(R_2 - R_1)^2} \cdot (2R_2 r - 3r^2 + 2r r_s - R_2 r_s) \cdot \frac{\varphi_s}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi\varphi}{\varphi_s}\right), \quad (12)$$

где обозначим $k = \frac{\pi}{\varphi_s}$.

Запишем функционал, соответствующий уравнению (10) в виде:

$$L = \int_{r_s}^{R_2} \int_0^{\varphi_s} \left[2\frac{V_{\text{r}}}{a_1} r T_{\text{r}}^{\,0} T + 2\frac{V_{\varphi}}{a_1} T_{\varphi}^{\,0} T + r T_{\text{r}}^{\,2} + \frac{1}{r} T_{\varphi}^{\,2} \right] dr d\varphi, \quad (13)$$

где $T_{\text{r}}^{\,0}$, $T_{\varphi}^{\,0}$ – неварьируемые производные от температуры.

Проверим, что вариация от L по T функционала (13) дает уравнение (10). Для этого запишем уравнение Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial L}{\partial T} - \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial L}{\partial T_{\text{r}}} - \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial L}{\partial T_{\varphi}} = 0. \quad (14)$$

Вычислим соответствующие производные: $\frac{\partial L}{\partial T} = 2\frac{V_{\text{r}}}{a_1} r T_{\text{r}}^{\,0}$, $\frac{\partial L}{\partial T_{\text{r}}} = 2 r T_{\text{r}}$, $\frac{\partial L}{\partial T_{\varphi}} = 2\frac{T_{\varphi}}{r}$, $\frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial L}{\partial T_{\text{r}}} = 2(T_{\text{r}} + r T_{\text{rr}})$, $\frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial L}{\partial T_{\varphi}} = 2\frac{T_{\varphi\varphi}}{r}$ и подставим их в (14). Сокращая на 2, и опуская нулевой индекс при $T_{\text{r}}^{\,0}$, получим (10). Следовательно, функционал (13) действительно соответствует уравнению (10).

Необходимым условием существования минимума функционала (13) является уравнение Эйлера-Лагранжа (14), а достаточным условием существования слабого минимума является выполнение условия Лежандра [7]:

$$\begin{vmatrix} \dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\text{г}}^{\,2}} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\text{г}} \partial T_{\varphi}} \\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\varphi} \partial T_{\text{г}}} & \dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\varphi}^{\,2}} \end{vmatrix} > 0. \qquad (15)$$

Проверим для функционала (13) выполнение этого условия. Найдем производные: $\dfrac{\partial L}{\partial T_{\text{г}}} = 2rT_{\text{г}}$, $\dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\text{г}}^{\,2}} = 2r$, $\dfrac{\partial L}{\partial T_{\varphi}} = \dfrac{2}{r} T_{\varphi}$, $\dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\varphi}^{\,2}} = \dfrac{2}{r}$, $\dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\text{г}} \partial T_{\varphi}} = \dfrac{\partial^2 L}{\partial T_{\varphi} \partial T_{\text{г}}} = 0$.

Тогда определитель (15) принимает следующий вид: $\begin{vmatrix} 2r & 0 \\ 0 & 2/r \end{vmatrix} = 4 > 0$,

то есть выполняется достаточное условие существования слабого минимума для (13).

Функционал (13) соответствует уравнению (10) и функция, минимизирующая его, будет наилучшим приближением решения уравнения (10). Как указано выше из (8), неизвестную функцию ищем в виде:

$$T = T(r) \cdot f(\varphi) = \frac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})r + T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_{\text{s}}}{R_2 - r_{\text{s}}} \cdot f(\varphi).$$

Найдем производные: $T_{\text{г}} = \dfrac{T_{\text{Н}} - T_{\text{К}}}{R_2 - r_s} \cdot f(\varphi)$; $T_{\text{г}}{}^{0} = \dfrac{T_{\text{Н}} - T_{\text{К}}}{R_2 - r_s} \cdot f^{0}(\varphi)$;

$T_{\varphi} = \dfrac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})r + T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_s}{R_2 - r_s} \cdot f'(\varphi)$; $T_{\varphi}{}^{0} = \dfrac{(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})r + T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_{\text{s}}}{R_2 - r_{\text{s}}} \cdot (f'(\varphi))^{0}$.

Подставляя (8) и полученные производные в (13) и интегрируя по r, получим:

$$L = \int_0^{\varphi_s} \left[A_1 \cos k\varphi \cdot f^{0}(\varphi) f(\varphi) + B_1 \frac{\sin k\varphi}{k} \cdot (f'(\varphi))^{0} f(\varphi) + C_1 (f(\varphi))^2 + D_1 (f'(\varphi))^2 \right] d\varphi, \qquad (16)$$

где $A_1 = \dfrac{2V_{\text{r.max}}(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})}{15a_1 (R_2 - R_1)^2 (R_2 - r_s)} \cdot \begin{pmatrix} T_{\text{Н}}(3R_2{}^4 - 7R_2{}^3 r_s + 3R_2{}^2 r_s{}^2 + 3R_2 r_s{}^3 - 2r_s{}^4) + \\ + T_{\text{К}}(2R_2{}^4 - 3R_2{}^3 r_s - 3R_2{}^2 r_s{}^2 + 7R_2 r_s{}^3 - 3r_s{}^4) \end{pmatrix}$;

$B_1 = 2A_1$; $C_1 = \dfrac{(R_2 + r_s) \cdot (T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})^2}{2(R_2 - r_s)}$;

$D_1 = \dfrac{(R_2 + r_s) \cdot (T_{\text{Н}} - T_{\text{К}})^2}{2(R_2 - r_s)} + \dfrac{2(T_{\text{Н}} - T_{\text{К}}) \cdot (T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_s)}{R_2 - r_s} + \dfrac{(T_{\text{К}} R_2 - T_{\text{Н}} r_s)^2 \cdot \ln(R_2 / r_s)}{(R_2 - r_s)^2}$.

Функцию $f(\varphi)$ выбираем так, чтобы интеграл (16) был минимальным, что соответствует выполнению уравнения Эйлера-Лагранжа, записанного для переменной $f(\varphi)$:

$$\frac{\partial L}{\partial f(\varphi)} - \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial L}{\partial f'(\varphi)} = 0. \qquad (17)$$

Возьмем производные от (16) и подставим в уравнение (17). В результате получим

$$f''(\varphi)-\frac{A}{k}\cdot\sin k\varphi\cdot f'(\varphi)-(B+\frac{A}{2}\cdot\cos k\varphi)\cdot f(\varphi)=0, \qquad (18)$$

где $A=\frac{B_1}{2D_1}$, $B=\frac{C_1}{D_1}$.

Приближенным решением (18) будет [4]:

$$f(\varphi)=(C_1\mathrm{ch}\omega\varphi+C_2\mathrm{sh}\omega\varphi)\cdot\exp(\frac{-A}{2k^2}\cos k\varphi), \qquad (19)$$

где $\omega=\sqrt{B+\frac{A^2{\varphi_s}^2}{8\pi^2}}$

Найдем константы C_1 и C_2, используя граничные условия $T=T_{\mathrm{K}}$ при $\varphi=\varphi_{\mathrm{s}}$ и $r=r_{\mathrm{s}}$, а также $\partial T/\partial\varphi=0$ при $\varphi=0$: $C_1=\frac{1}{\mathrm{ch}\omega\varphi_s\cdot\exp(A/2k^2)}$, $C_2=0$. Тогда

$$f(\varphi)=\frac{\mathrm{ch}\omega\varphi}{\mathrm{ch}\omega\varphi_{\mathrm{s}}}\cdot\exp(\frac{-A}{2k^2}(1+\cos k\varphi)). \qquad (20)$$

Итак, решением (12) по r и по φ является функция

$$T_1(r,\varphi)=\frac{(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{K}})r+T_{\mathrm{K}}R_2-T_{\mathrm{H}}r_{\mathrm{s}}}{R_2-r_{\mathrm{s}}}\cdot\frac{\mathrm{ch}\omega\varphi}{ch\omega\varphi_s}\cdot\exp(\frac{-A}{2k^2}(1+\cos k\varphi)). \qquad (21)$$

Поиск полного нестационарного решения уравнения теплопроводности в жидкой фазе осуществляется аналогично нахождению зависимости по φ. Функционал, соответствующий уравнению (5), запишем в виде:

$$L=\int_0^{t_s}\int_0^{\varphi_s}\int_{r_s}^{R_2}\left(\frac{2V_{\mathrm{r}}}{a_1}rT_{\mathrm{r}}{}^0T+\frac{2V_{\varphi}}{a_1}T_{\varphi}{}^0T+\frac{2r}{a_1}T_{\mathrm{t}}{}^0T+rT_{\mathrm{r}}{}^2+\frac{1}{r}T_{\varphi}{}^2\right)drd\varphi dt. \qquad (22)$$

Решение уравнения (5) ищем в виде

$$T_1(r,\varphi,t)=\frac{(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{K}})r+T_{\mathrm{K}}R_2-T_{\mathrm{H}}r_{\mathrm{s}}}{R_2-r_{\mathrm{s}}}\cdot\frac{\mathrm{ch}\,\omega\varphi}{ch\,\omega\varphi_s}\cdot\exp(\frac{-A}{2k^2}(1+\cos k\varphi))\cdot f(t). \qquad (23)$$

Вычислим производные $T_{\mathrm{r}},T_{\varphi},T_{\mathrm{t}},T_{\mathrm{r}}{}^0,T_{\mathrm{t}}{}^0$ и подставим их в (22). Проинтегрировав по r и по φ, получим

$$L=\int_0^{t_s}\left(M_1\cdot f^0(t)f(t)+N_1\cdot f^0(t)f(t)+S_1\cdot f(t)(f'(t))^0+P_1\cdot(f(t))^2+Q_1\cdot(f(t))^2\right)dt, \qquad (24)$$

где M_1,N_1,S_1,P_1,Q_1 - константы интегрирования по r и по φ. Варьируя (24) по $f(t)$, найдем

$$f'(t)+f(t)\frac{G_1}{S_1}=0, \qquad (25)$$

где $G_1=M_1+N_1+2P_1+2Q_1$.

Решением уравнения (25) будет функция [8]:

$$f(t) = C \cdot \exp(-\frac{G_1}{S_1} t). \quad (26)$$

Ищем константу C, используя граничные условия $T = T_K$ при $r = r_s$, $t = t_s$ и $\varphi = \varphi_s$. Получим

$$f(t) = \exp(-\frac{G_1}{S_1}(t - t_s)). \quad (27)$$

Итак, полное нестационарное решение уравнения (1):

$$T_1(r, \varphi, t) = \frac{(T_H - T_K)r + T_K R_2 - T_H r_s}{R_2 - r_s} \cdot \frac{\mathrm{ch}\omega\varphi}{ch\omega\varphi_s} \cdot \exp(\frac{-A}{2k^2}(1 + \cos k\varphi)) \cdot \exp(\frac{-G_1}{S_1}(t - t_s)) \quad (28)$$

Используя уравнение (3) и соотношение (2), находим зависимость толщины затвердевшей корки от времени. Условие на движущемся фронте с учетом (4) принимает следующий вид:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{r_s \partial\varphi} + L_1\rho(\alpha_3 - \varphi_s)\frac{\partial r_s}{\partial t} = \frac{T_K - T_{CP}}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{r_s(\alpha_3 - \varphi_s)}{\lambda_2} + \frac{r_s(\alpha_2 - \alpha_3)}{\lambda_3} + \frac{r_s(\alpha_1 - \alpha_2)}{\lambda_4}}. \quad (29)$$

Найдем из (28) производную $\partial T_1 / \partial\varphi$ и, учитывая, что на фронте кристаллизации $\varphi = \varphi_s$, $r = r_s$, $t = t_s$. Получим:

$$L_1\rho(\alpha_3 - \varphi_s)\frac{r_s \partial r_s}{\partial t} = \frac{T_K - T_{CP}}{\frac{2}{\alpha_0(R_1 + R_2)} + \frac{\alpha_3 - \varphi_s}{\lambda_2} + \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\lambda_3} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\lambda_4}} - \lambda_1 T_K \omega \cdot \mathrm{th}(\omega\varphi_s), \quad (30)$$

где в знаменателе в выражение для теплового потока через твердую корку введено среднее значение $r_s = (R_1 + R_2)/2$. В результате имеем

$$r_s \frac{\partial r_s}{\partial t} = \frac{T_K - T_{CP}}{\left(\frac{2}{\alpha_0(R_1 + R_2)} + \frac{\alpha_3 - \varphi_s}{\lambda_2} + \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\lambda_3} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\lambda_4}\right) L_1\rho(\alpha_3 - \varphi_s)} - \frac{\lambda_1 T_K \omega \cdot \mathrm{th}(\omega\varphi_s)}{L_1\rho(\alpha_3 - \varphi_s)}. \quad (31)$$

Интегрируя (31), найдем

$$r_s^2 = C^* \cdot t + R_1^2 \quad , \quad (32)$$

где

$$C^* = \frac{2}{L_1\rho(\alpha_3 - \varphi_s)} \cdot \left(\frac{T_K - T_{CP}}{\frac{2}{\alpha_0(R_1 + R_2)} + \frac{\alpha_3 - \varphi_s}{\lambda_2} + \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\lambda_3} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\lambda_4}} - \lambda_1 T_K \omega \cdot \mathrm{th}(\omega\varphi_s) \right).$$

Фиксируя φ_s, вычислим время, за которое фронт затвердевания достигнет координаты r_s:

$$t_s = \frac{r_s^2 - R_1^2}{C^*}. \quad (33)$$

По формуле (33) выполнены численные расчеты для следующих параметров металла, изложницы и окружающей среды: R_1=1,2 м, R_2=2,2 м, α_1 =12°, α_2 =10°, α_3=9,94°, T_H=1783 K, T_K=1733 K, T_{CP}=300 K, ρ

=7,31·10^3 кг/м^3, λ_1=26,5 Вт/м·К, λ_2=30,3 Вт/м·К, λ_3=0,09 Вт/м·К, a_1=4,5·10^{-6} м^2/с, V_r=5·10^{-2}; 5·10^{-3} м/с, L_1=2,72·10^5 Дж/кг. Для чугунной изложницы: α_0 =68 Вт/м^2·К, λ_4=58,7 Вт/м·К. Для керамической формы: α_0=20 Вт/м^2·К, λ_4 =25 Вт/м·К.

Обсуждение полученных результатов. По полученным результатам построены графики зависимости $t_s(\varphi_s, r_s)$ для чугунной изложницы (рис. 2, а и б) и керамической формы (рис. 2, в и г) при разных скоростях конвекции: $V_r = 5\cdot10^{-2}$ м/с, $V_r = 5\cdot10^{-3}$ м/с.

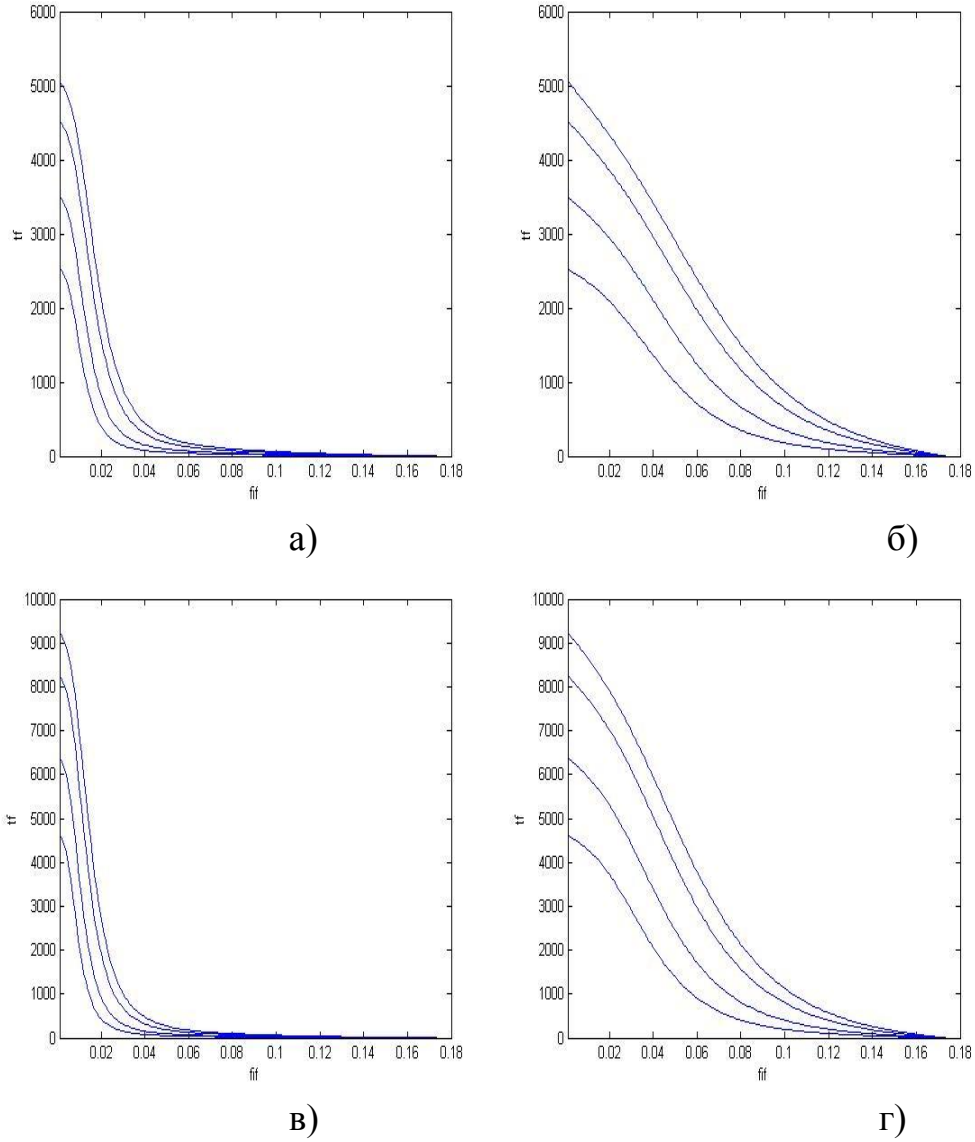


Рис. 2. Положения фронта кристаллизации в правой половине клинообразных изложниц с различной теплопроводностью стенок (кривые соответствуют значениям координаты r_s: 1,5; 1,6; 1,7; 1,75 м; отсчет кривых ведется снизу вверх в каждом рисунке). На рис. а), б) представлены графики для чугунной изложницы, на рис. в), г) для керамической изложницы при скоростях конвекции: $V_r = 5\cdot10^{-2}$ м/с, $V_r = 5\cdot10^{-3}$ м/с соответственно.

Кривые соответствуют значениям координаты r_s: 1,5; 1,6; 1,7; 1,75 м. Отсчет кривых на всех графиках снизу вверх. На графиках наблюдаются три зоны, которые соответствуют разным скоростям движения фронта кристаллизации, характеризующиеся разными наклонами кривых.

Например, для r_s = 1,5 (на рис. 2 а) для $V_r = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с, первая зона располагается от φ_s = 0,16 рад до φ_s =0,04 рад, что соответствует временам от нуля до $2 \cdot 10^2$ с и средняя скорость движения фронта затвердевания равна v_{s1} = 0,9мм/с. Вторая зона находится в пределах от φ_s = 0,04 рад до φ_s = 0,002 рад и ей соответствуют времена от $t_s = 2 \cdot 10^2$ с до $t_s = 23 \cdot 10^2$ с, откуда следует, что v_{s2} = 0,027 мм/с. И третья зона находится в пределах от φ_s = 0,002 рад до φ_s = 0 , по времени от $t_s = 23 \cdot 10^2$ с до $t_s = 25 \cdot 10^2$ с, откуда следует v_{s3} = 0,15 мм/с. Для других значений r_s и скоростей конвекции результаты будут другими и их можно посчитать из приведенных графиков. Итак, вначале затвердевание идет с большей скоростью в 1-й зоне, далее замедляется во 2-й зоне и в 3-й зоне вновь ускоряется. Такое поведение фронта затвердевания может объяснить наличие трех зон, образующихся в затвердевшем слитке: вначале, в 1-й зоне, образуется мелкокристаллическая структура, затем во 2-й зоне – столбчатые кристаллы и в 3-й зоне – равноосные кристаллы. При уменьшении скорости конвекции уменьшаются 1-я и 2-я зоны и растет 3-я зона равноосных кристаллов и это видно из рис. 2 б и 2 г для скорости конвекции $V_r = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Результаты эксперимента, приведенные в [9] на рис.243 в виде графика для различных кристаллических зон, показывают, что 1-й зоне (мелкокристаллические кристаллы) соответствуют значения скорости движения фронта затвердевания более 0,17 мм/с, 2-й зоне (столбчатые кристаллы) – скорости от 0,134 до 0,067 мм/с, а 3-й зоне (равноосные кристаллы) – от 0,067 до 0,02мм/с и от 0,02 до 0,07мм/с. Сравнение полученных в данной работе теоретических расчетов с экспериментом [9] свидетельствует о совпадении значений по средним скоростям в 1-й, 2-й зонах и расхождении в 3-й зоне, но подтверждает теоретические расчеты работы [4]. Эксперименты, проведенные в последние годы [10], показывают ускорение затвердевания в центральной зоне слитка.

Заключение. Из полученных графиков и результатов следует, что,учитывая соответствующие скорости конвекции, можно получить слиток с заранее заданной структурой металла с определенными толщинами кристаллических зон, что существенно повлияет на механические свойства используемых изделий. Также знание толщины затвердевшей корки определяет время извлечения слитка из изложницы. В результате повышается количество изготавливаемых изделий, снижается себестоимость полученной продукции.

Обозначения: a_1 – коэффициент температуропроводности жидкого металла, м^2 /с; C_{V1} – удельная теплоемкость жидкого металла; K_{T1} – коэффициент теплопередачи; L – функционал или лагранжиан; L_1 – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг; R_1, R_2 – радиусы дна и верха изложницы, м; r, φ – цилиндрические координаты точек внутри изложницы; r_s – радиальная координата точки на фронте кристаллизации, м; T_1 – функция температуры в жидкой фазе, К; $T_К$ – температура кристаллизации, К; $T_Н$ – начальная температура заливки, К; $T_{СР}$ – температура окружающей среды, К; t_s – время на фронте кристаллизации, с; V_r – радиальная составляющая скорости конвекции, м/с; V_φ – азимутальная составляющая скорости конвекции, м/с; α_0 – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, Вт/м^2·К; α_1– угол между осью и внешней поверхностью стенки изложницы, рад; α_2 – угол между осью и внутренней поверхностью стенки изложницы, рад; α_3– угол между осью и поверхностью слитка, рад; ε – толщина затвердевшего металла, м; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициенты теплопроводности жидкой, твердой фаз металла, воздушного зазора и материала изложницы соответственно, Вт/м·К; ρ – плотность жидкого металла, кг/м^3; φ_s – азимутальная координата точки на фронте кристаллизации, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. Москва: Металлургиздат. 1959. С. 265.
2. Раддл Р. У. Затвердевание отливок. Москва: Машгиз. 1960. С. 391.
3. Александров В. Д., Голоденко Н. Н., Дремов В. В., Недопекин Ф. В. Математическое моделирование затвердевания металла в клинообразной изложнице с учетом естественной конвекции. Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 3. С. 478-484.
4. Дремов В. В. Исследование влияния двумерной конвекции на затвердевание слитков с обратной конусностью. Инженерно-физический журнал. 2009. Т. 82, № 4. С. 711-717.
5. Дремов В. В., Недопекин Ф. В., Минакова О. А. Влияние теплопроводности стенок изложницы на движение фронта затвердевания плоского слитка. Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов. Национальная металлургическая академия Украины. Днепропетровск: Пороги, 2009. С. 67–72.
6. Алабовский А. Н., Недужий И. А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Выща школа, 1990. С. 225.
7. Цлаф Л. Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения. Москва: Наука, 1970. С. 191.
8. Камкэ Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Наука, 1971. С. 365.

9. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976. С. 314.
10. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Филимонов В. В. Стальной слиток. Т. 2. Минск: Белорусская наука, 2000. С. 65.

Olga Kalashnikova

HARDENING OF METAL IN THE PIG-IRON MOULD AND CERAMIC FORM TAKING INTO ACCOUNT COMPULSORY CONVECTION AND THE AIR GAP

Donetsk National Technical University, 83092, Donetsk, DNI

Abstract

The non-stationary problem of hardening of an ingot in a pig-iron mold and a ceramic form taking into account compulsory convection and the air gap which is formed when hardening an ingot is considered and solved by a variation method. The formula of distribution of temperature in a liquid phase and dependence of advance of the front of hardening on coordinates and time is received. Numerical calculations of time of hardening of an ingot in a pig-iron mold and a ceramic form at various values of speeds of convection are executed. The received results are compared with experimental data.

Keywords: functionality, variation, front of hardening, mold, heat conductivity of walls, thermal resistance, heat transfer coefficient.

REFERENCES

[1] Veynik A. I. Heat exchange between an ingot and a mold. Moscow: Metallurgizdat. 1959. Page 265.
[2] Raddl R. U. Hardening of castings. Moscow: Mashgiz. 1960. Page 391.
[3] Alexandrov V. D., Golodenko N. N., Dremov V. V., Nedopekin F. V. Mathematical modeling of hardening of metal in a wedge-shaped mold taking into account natural convection. Engineering and physical magazine. 2010. T. 83, No. 3. Page 478-484.
[4] Dremov V. V. Research of influence of two-dimensional convection on hardening of ingots with the return conicity. Engineering and physical magazine. 2009. T. 82, No. 4. Page 711-717.
[5] Dremov V. V., Nedopekin F. V., Minakova O. A. Influence of heat conductivity of walls of a mold on the movement of the front of hardening of a flat ingot. Metallurgical heating engineer. Collection of scientific works. National metallurgical academy of Ukraine. Dnipropetrovsk: Thresholds, 2009. Page 67-72.

[6] Alabovsky A. N., Neduzhy I. A. Technical thermodynamics and heat transfer. Kiev: Vyshcha school, 1990. Page 225.
[7] Tslaf L. Ya. Calculus of variations and integrated equations. Moscow: Science, 1970. Page 191.
[8] Камкэ Е. Reference book on the ordinary differential equations. Moscow: Science, 1971. Page 365.
[9] Yefimov V. A. Pouring and crystallization became. M.: Metallurgy, 1976. Page 314.
[10] Samoylovich Yu. A., Timoshpolsky V. I., Trusov I. A., Filimonov V.V. Steel ingot. T. 2. Minsk: Belarusian science, 2000. Page 65.

УДК 621.74.043.733.76; DOI 10.1872/MMF-2016-105

Р.В.Кузнецов[1], М. М. Радкевич[2]

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ ШТАМПОВКИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА.

[1]Кузнецов Руслан Валерьевич, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)296-2541, E-mail: Spaun1605@rambler.ru.

[2]Михаил Михайлович Радкевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: radmich@mail.ru.

Аннотация

В статье изложен опыт применения метода штамповки жидкого металла (ШЖМ) для получения заготовок из литейных и деформируемых антифрикционных медных сплавов. Рассмотрен перспективный вариант плакирования с применением технологии ШЖМ. Представлены результаты механических испытаний и металлографических исследований, полученных заготовок.

Ключевые слова: штамповка жидкого металла, микроструктура, механические свойства, биметалл, антифрикционные медные сплавы.

Повышение качества и надежности деталей из антифрикционных сплавов на сегодняшний день является актуальной задачей в машиностроении. В ряде случаев единственным решением этой задачи является изменение серийной технологии производства в пользу более прогрессивной. В качестве одной из таких технологий по праву можно считать штамповку жидкого металла (ШЖМ). Однако данный технологический процесс в промышленности применяется преимущественно для сплавов с относительно низкой температурой плавления [11].

Проведенные авторами исследования [6] показали целесообразность использования метода ШЖМ применительно к медно-цинковым сплавам с температурой плавления до 900°С. Дальнейшее изучение возможности применения данного технологического процесса проводили на медных

сплавов, в частности бронзах.

Материалом для исследования были выбраны наиболее применяемые в промышленности антифрикционные медные сплавы: литейная оловянно-свинцовая бронза БрО10С10 (ГОСТ 613-79) и деформируемая алюминиевая бронза БрАЖ9-4 (ГОСТ 18175-78). Химический состав сплавов приведен в таблице 1 и 2.

Изучение возможности изготовления методом ШЖМ образцов из антифрикционных медных сплавов проводили на заготовках диаметром 55 мм и длиной 100 мм, полученных литьём в кокиль и ШЖМ. Инструментом для ШЖМ служила разъемная матрица из стали 3Х2В8Ф, в качестве кокиля использовали матрицу. Плавка жидкого металла осуществлялась в индукционной тигельной печи ИСТ-0,16. Температура плавления для сплава БрО10С10 составляла 1020°С; для сплава БрАЖ9-4 – 1040°С. Перед заливкой расплав перегревали на 100°С выше температуры плавления.

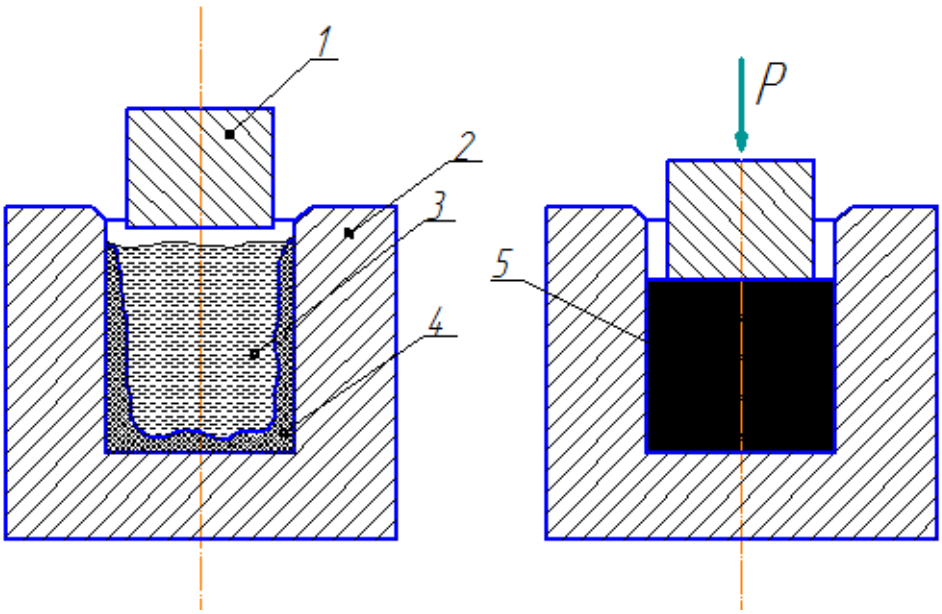
Таблица 1. Химический состав БрО10С10 (ГОСТ 613-79).

Основные компоненты			Примеси, не более						
Sn	Pb	Cu	Zn	Al	Fe	Si	P	Sb	Всего
9,0-11,0	8,0-11,0	77,1-83,0	0,5	0,02	0,2	0,02	0,05	0,3	0,9

Таблица 2. Химический состав БрАЖ9-4 (ГОСТ 18175-78).

Основные компоненты			Примеси, не более						
Fe	Al	Cu	Si	Mn	P	Pb	Zn	Sn	Всего
2,0-4,0	8,0-10,0	84,3-90,0	0,1	0,5	0,01	0,01	1,0	0,1	1,7

Штамповку жидкого металла осуществляли по поршневой схеме (Рисунок 1) [2,4] на гидравлическом прессе П474А с номинальным усилием прессования 1000 кН. По результатам исследований авторов [7] были выбраны следующие параметры технологического процесса. Номинальное удельное усилие прессования Р=200МПа, температура подогрева штамповой оснастки Тосн.=500°С, время выдержки под давлением tвыд.=1,5 мин. Контроль температуры штамповой оснастки осуществляли с помощью бесконтактного лазерного пирометра «ПИРОЦЕЛЬС Кельвин» КБ Диполь. Температуру жидкого металла в тигле фиксировали с помощью прибора «ОВЕН» ТРМ210 оборудованного термопарой типа ТХА (ГОСТ 6616-94) диаметром 0,6 мм.



а) б)

Рисунок 1. Схема поршневого прессования процесса ШЖМ: а – перед приложением давления; б – выдержка под давлением; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – расплав; 4 – затвердевшая корка; 5 – заготовка.

На поверхности образцов, полученных литьём в кокиль, наблюдали характерные осевые усадочные раковины. Размер раковин на отливках из БрАЖ9-4 был больше. Следует отметить, что в этом случае объемная усадка БрО10С10 меньше чем у БрАЖ9-4 [10,12].

На образцах, изготовленных из тех же материалов по технологии ШЖМ, усадочные раковины отсутствовали. Это объясняется увеличением плотности заготовки вследствие подпитки усадочной полости жидким металлом в процессе кристаллизации под давлением [2,9].

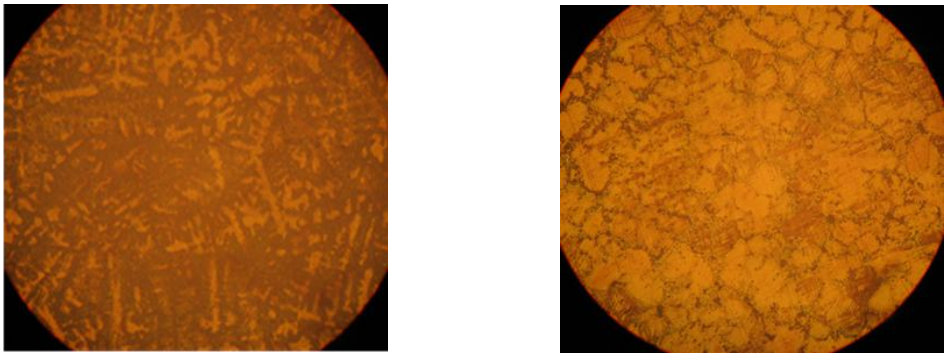
Металлографические исследования проводили на образцах, вырезанных из центральной части заготовок, полученных двумя способами. Образцы вырезались в продольном сечении с помощью низкоскоростного точного отрезного станка «ПОЛИЛАБ Р 30М».

Подготовка микрошлифов осуществлялась на шлифовано-полировальном металлографического комплексе «ПОЛИЛАБ П12МА» с применением запрессовочного станка «ПОЛИЛАБ С50».

Изучение микроструктуры сплавов БрО10С10 и БрАЖ9-4 проводили на металлографическом микроскопе МИМ-9 с использованием цифровой фотокамеры.

Сравнительный анализ микроструктуры литых и штампованных в жидком состоянии заготовок во всех случаях показал существенное влияние технологии производства на размер и ориентацию зерна, наличие и степень ликвации. При ШЖМ литейной оловянно-свинцовой бронзы под давлением 200МПа происходит переход от литейной дендритной

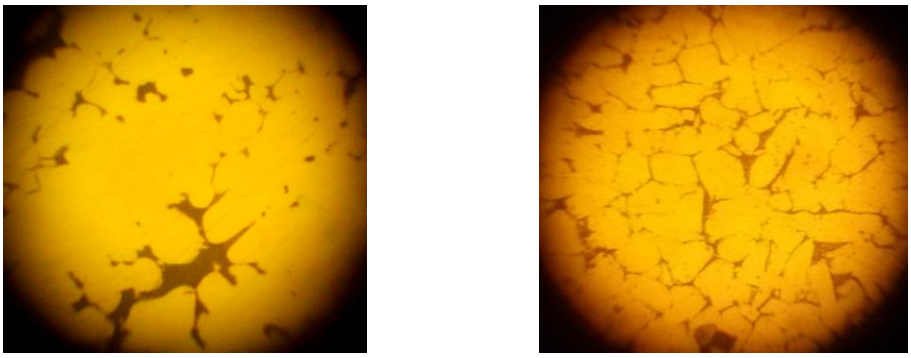
структуры (Рисунок 2,а) к полиэдрической мелкозернистой структуре с равномерным распределением олова в твердом растворе по всему сечению заготовки (Рисунок 2,б).



а) б)

Рисунок 2. Микроструктура сплава БрО10С10, Х250: а) полученного по литейной технологии; б) полученный по технологии штамповки жидкого металла при давлении 200МПа;

Литой образец из сплава БрАЖ9-4 имел крупнозернистую структуру с упорядоченным расположением пластин α-фазы (видманштеттова структура) и крупными кристаллами γ2-фазы, что объясняется эвтектоидным распадом β-фазы при медленном охлаждении сплава (Рисунок 3, а). Приложение давления к жидкому расплаву привело к измельчению зерна и уменьшению зоны столбчатых кристаллов (Рисунок 3, б), что свидетельствует о существенном увеличении скорости теплоотвода. При этом наблюдается более равномерное распределение железосодержащей составляющей (по-видимому, соединения FeAl3), что положительно отразилось на механических свойствах (Таблица 3).



а) б)

Рисунок 3. Микроструктура сплава БрАЖ9-4, Х250: а) полученного по литейной технологии; б) полученный по технологии штамповки жидкого металла при давлении 200МПа;

Оценку механических свойств полученных образцов проводили по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) на прессе ТШ-2М (ГОСТ23677-79). Твердость измерялась на поперечном разрезе центральной части заготовки. Диаметр отпечатка индентора фиксировали с помощью микроскопа оптического типа МПБ-2. Анализ результатов измерения (Таблица 3) свидетельствует о том, что давление, приложенное к металлу во время кристаллизации, приводит к повышению механических свойств и обеспечивает их изотропность по всему сечению заготовки.

Таблица 3. Механические свойства сплавов БрО10С10 и БрАЖ9-4.

Способ получения заготовки		НВ у кромки заготовки, МПа	НВ на ½ радиуса заготовки, МПа	НВ в центре заготовки, МПа	Предела прочности, $\sigma_в$, МПа.	Предела прочности биметалла, $\sigma_в$, МПа.
БрО10С10	Литьё в кокиль	810	740	680	270	397
	Штамповка жидкого металла при давлении 200 МПа	980	980	1010	390	
БрАЖ9-4	Литьё в кокиль	1310	1270	1210	420	
	Штамповка жидкого металла при давлении 200 МПа	1660	1670	1690	510	

Результаты данных исследований позволили утверждать, что технология ШЖМ для сплавов на основе меди является перспективным технологическим процессом для изготовления изделий широкой номенклатуры. Известно [8], что в настоящее время процесс промышленно применяют для получения биметаллических изделий (поршней двигателей ДВС) из алюминиевых сплавов АЛ-25 и АК4. Это дает основание применить технологию ШЖМ для получения биметаллических заготовок «БрАЖ9-4+БрО10С10».

Так как основным показателем качества биметаллов является прочность соединения слоев [1,3], то важно было исследовать граничную зону контакта. Оценку прочности соединения металлов проводили исследованием механических свойств биметаллов на разрыв. Кроме того, определяли предел прочности каждого отдельного слоя заготовки, т.е. БрО10С10 и БрАЖ9-4. Результаты представлены в таблице 3.

Известно [1,5], что структура граничной зоны формируется главным образом за счет диффузионных процессов, проходящих на границе раздела слоев. Зона контакта образца полученного литейным плакированием имела ярко выраженную оксидную пленку (предположительно окислы алюминия), что препятствует надлежащему соединению слоев (Рисунок 4). Помимо этого в плакирующем слое наблюдались локальные скопления газовой пористости.

При металлографическом исследовании образцов, полученных по технологии штамповки жидкого металла, выявить зону контакта не удалось, хотя на макрошлифах она была ярко выражена (Рисунок 5).

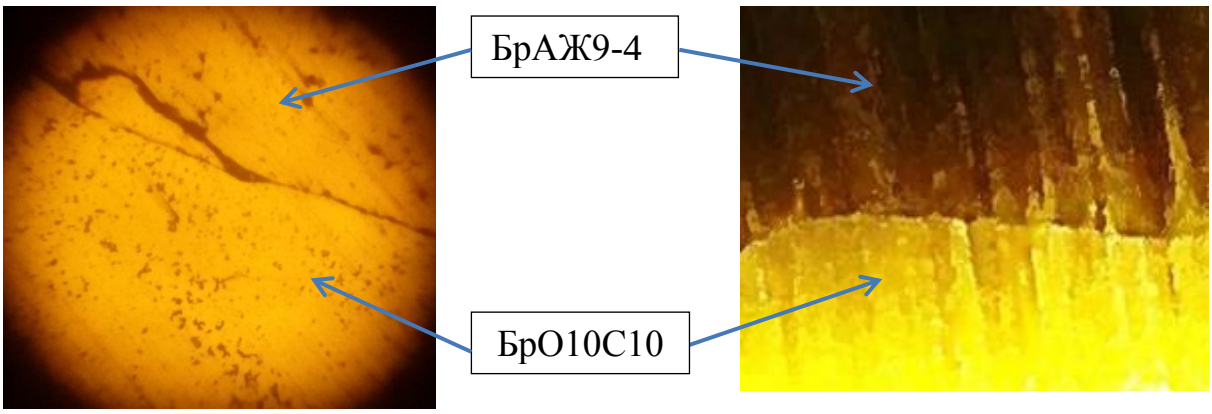


Рисунок 4. Микроструктура контактного слоя биметалла «БрАЖ9-4+БрО10С10», полученного литейным плакированием. Х200

Рисунок 5. Зона контакта биметалла «БрАЖ9-4+БрО10С10», полученного по технологии жидкой штамповки

Из результатов исследования следует, что предложенная технология плакирования с применением ШЖМ обеспечивает прочность и бездефектность границы соединения слоев, а так же высокое качество поверхности заготовок. Технологическая схема производства может быть использована для получения биметаллических деталей ответственного назначения из антифрикционных медных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астров Е.И.* Физико-химические процессы схватывания при производстве плакированных металлов. Производство и применение

биметаллов и металлов с защитными покрытиями (по материалам научно-технической конференции). // Инф. ЦНИИ ЧМ. – 1962. – С.8-18.
2. *Батышев А.И.* Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – М.: Металлургия, 1990. – 144 с.
3. *Голованенко С.А., Меандров Л.В.* Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966 г. – 304 с.
4. Специальные способы литья: Справочник / В.А. Ефимов [и др.]; под ред. В.А. Ефимова – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
5. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебник. / А.Г. Кобелев [и др.]; под ред. А.Г. Кобелева – М.:КНОРУС, 2016. – 270 с.
6. *Кузнецов Р.В., Гоцiридзе А.В., Мартынов К.В.* Получение поковок из литейной латуни ЛЦ40С обработкой металлов давлением.// Металлобработка – 2016. – №4. – С.24-25.
7. Исследование технологических возможностей горячей объемной штамповки точной заготовки из литейных медных сплавов./ Кузнецов Р.В. [и др.] // Тезисы научно-практической конференция с международным участием “Неделя науки СПбГПУ”. Санкт-Петербург, 2015. – С.205-208.
8. *Лобанов В.К., Чуйкова В.Е.* Совершенствование технологии штамповки биметаллических поршней двигателей внутреннего сгорания.//Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» (КШПОМД). – 2010. – №4. – С.15-18.
9. *Пляцкий В.М.* Литье под давлением. Издание 3-е переработанное. – М.: Государственное издание оборонной промышленности, 1957. – 464 с.
10. *Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1974 г. – 488 с.
11. *Сосенушкин Е.Н.* Штамповка кристаллизующегося металла. //Вестник МГТУ «Станкин» – 2010. – №2 (10). – С.12-20.
12. *Сучков Д.И.* Медь и ее сплавы. – М.: Металлургия, 1966 – 248 с.

R.V.Kuznetsov ,M.M.Radkevich

TECHNOLOGY OF RECEIVING ANTIFRICTIONAL BIMETALLIC PREPARATIONS BY METHOD OF STAMPING OF LIQUID METAL.

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

In article experience of application of a method of the stamping of liquid metal (SLM) for receiving preparations from foundry and deformable antifrictional copper alloys is stated. The perspective option of cladding with

application of technology of stamping of liquid metal is considered. Results of mechanical tests and metalgraphic researches, the received preparations are presented.

Key words: stamping of liquid metal, microstructure, mechanical properties, bimetal, antifrictional copper alloys.

REFERENCES

[1] *Astrov E.I.* Physical and chemical processes of a skhvatyvaniye by production of the plated metals. Production and use of bimetals and metals with sheetings (on materials of scientific and technical conference). Inf. Central Research Institute ChM, 1962.

[2] *Batyshev A.I.* Crystallization of metals and alloys under pressure. – M.: Metallurgy, 1990.

[3] *Golovanenko S. A., Meandrov L.V.* Production of bimetals. From. "Metallurgy" - M. – 1966.

[4] *Yefimov V.A., Anisovich G. A., Babich V. N., etc.* Special ways of molding: The reference book under the general edition of Yefimov V.A. – M.: Mechanical engineering, 1991 – 436 pages.

[5] *Kobelev A.G., Sharonov M. A., Kobelev O. A., Sharonova V.P.,* Materials science. Technology of constructional materials: textbook. – M.: KNORUS, 270 pages.

[6] *Kuznetsov R.V., Gotsiridze A.V., Martynov K.V.* Receiving forgings from foundry LTs40S brass processing of metals pressure. Metallobrabotka No. 4, 2016.

[7] *Kuznetsov R.V., Kuznetsov P. A., Gotsiridze A.V., Martynov K.V.* Research of technological capabilities of hot volume stamping of exact preparation from foundry copper alloys. Theses scientific and practical conference with the international participation "Week of science СПбГПУ". St. Petersburg, on November 30 – on December 5, 2015.

[8] *Lobanov V. K., Chuykov V. E.* Improvement of technology of stamping of bimetallic pistons of internal combustion engines. Magazine "Forge and Forming Production. Processing of Materials Pressure» (FFP.PMP). No. 4, 2010.

[9] *Plyatsky V. M.* Molding under pressure. The edition 3rd processed. State edition of the defensive industry, M., 1957.

[10] *Smiryagin A.P., Smiryagina N. A., Belova A.V.* Industrial non-ferrous metals and alloys. M, Metallurgy, 1974.

[11] *Sosenushkin E.N.* Stamping of the crystallizing metal. Bulletin of MGTU of "Stankin" No. 2 (10), 2010.

[12] *Suchkov D. I.* Med's knots and her alloys. – M.: Metallurgy, 1966.

УДК 621.983.044; DOI 10.1872/MMF-2016-106

В.С. Мамутов[1], Г.Н. Здор[2]

МЕХАНИКА НАГРУЖЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКЕ-ФОРМОВКЕ

[1]Вячеслав Сабайдинович Мамутов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(812)552-9530, E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

[2]Геннадий Николаевич Здор, д.т.н., профессор
Белорусский национальный технический университет
Беларусь, Минск
Тел.: +3(7529) 573-8492, E-mail: rts@bntu.by

Аннотация

В работе анализируется механика нагружения и деформирования тонколистовой заготовки при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке. С применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA® на конкретном примере определены некоторые особенности динамики плазменной полости канала разряда, давления в разрядной камере, нагружения и деформирования заготовки. Показано незначительное влияние ударной волны по сравнению с давлением гидропотока жидкости на общую пластическую деформацию заготовки.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная вытяжка-формовка, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, особенности динамики процесса, пластическая деформация заготовки, сопоставление влияния ударной волны и гидропотока

Среди технологий, использующих высоковольтный электрический разряд в жидкости, важное место в машиностроении занимает электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ). ЭГИШ эффективна в мелкосерийном и индивидуальном производстве сложных точных деталей из тонколистовых металлов и труб [1, 2]. При наличии лишь одного жесткого рабочего инструмента за счет импульсного характера нагружения, деформирования и взаимодействия заготовки с матрицей ЭГИШ при относительно низкой стоимости технологической оснастки обеспечивает лучшие показатели по параметрам пружинения и

предельного формоизменения по сравнению с традиционными способами штамповки [3]. Часто это актуально при штамповке деталей из особо тонколистовых металлов (толщиной менее 0,4…0,5 мм). Промышленное применение электрического разряда в жидкости для обработки металлов началось в 60-х годах прошлого столетия и сопровождалось исследованиями физики процесса. Экспериментальные исследования электрических и физико-механических процессов, определяющих ЭГИШ, В.Н. Чачина, Е.В. Кривицкого и ряда других исследователей создали основу для последующего теоретического моделирования технологий [4, 5].

Применение аналитических методов для моделирования ЭГИШ затруднено из-за нелинейности физико-механических процессов, лежащих в основе процессов. С определенными серьезными допущениями решались отдельные задачи: расчета разрядного тока при переменном сопротивлении плазменного канала, образования и расширения плазменного канала, распространения волны давления в рабочей жидкости, нагружения и деформирования заготовки, как это представлено, например, в работах [6, 7].

Возможность адекватного компьютерного моделирования ЭГИШ с учетом всего комплекса и особенностей технологий появилась только с развитием современной вычислительной техники и таких универсальных научных конечно-элементных комплексов, как LS-DYNA [8]. Одной из возможностей комплекса применительно к ЭГИШ является техника ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), которая может иметь несколько материалов в пределах одного элемента и допускают взаимодействие с произвольными лагранжевыми структурами. Это позволяет моделировать взаимодействия между газом плазменного канала и рабочей жидкостью, а также жидкостью и объектом сложной, меняющейся формы, которой является деформируемая заготовка. Моделирование всего комплекса физико-механических процессов стало возможным только после разработки модели канала разряда в комплексе LS-DYNA 971 [9, 10]. Решить задачи трехмерной гидромеханики с учетом реальной геометрии камеры и электродов, деформируемой заготовки удалось только в настоящее время [11-13].

Это дает возможность на новом уровне решать и осмысливать многие важные для проектирования технологии вопросы, не решенные, несмотря на длительную историю развития ЭГИШ. До сих пор количественно не определены распределение и временные законы импульсного давления внутри разрядной камеры небольшого объема с учетом податливости деформируемой заготовки. Для практической реализации процессов ЭГИШ важно знать соотношение влияния волны сжатия и гидропотока на деформирование заготовки, параметры механики деформирования и нагружения заготовки, уметь оценивать гидродинамический КПД.

Задачей данной работы являлась развитие механики нагружения и деформирования тонколистовой заготовки при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке с помощью анализа результатов копьютерного моделирования процесса с использование конечно-элементного комплекса LS-DYNA 971 на примере заготовки из особо тонколистового металла.

1. Схема процесса и мощность выделения энергии в канале разряда

Принцип электрогидроимпульсной вытяжки-формовки тонколистовой заготовки показан на рис. 1.

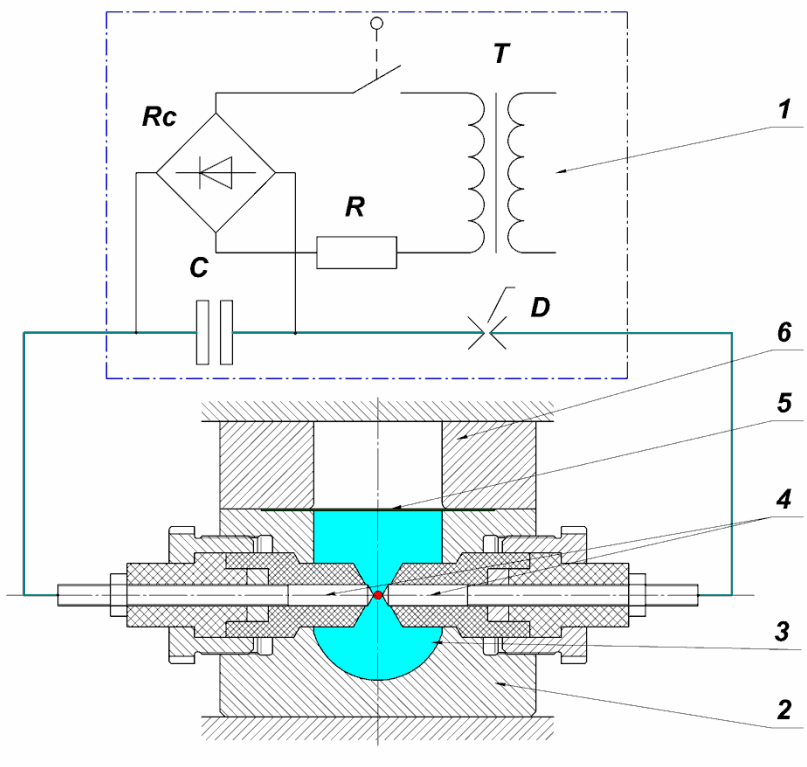


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной вытяжки-формовки:
1 – электроимпульсная установка, 2 – разрядная камера, 3 – рабочая жидкость, 4 – электроды, 5 – тонколистовая заготовка, 6 – матрица

Конденсаторная батарея C электрогидроимпульсной установки заряжается до напряжения несколько десятков киловольт от повышающего трансформатора T и высоковольтного выпрямителя R_c, R. При подаче управляющего импульса на разрядник D происходит пробой межэлектродного промежутка в рабочей жидкости разрядной камеры. Расширение образующейся плазменной парогазовой полости за счет адиабатического нагрева протекающими по ней сильными импульсными токами приводит к сжатию жидкости, импульсное давление воздействует на деформируемую заготовку, осуществляя требуемую формообразующую операцию. Для компьютерного моделирования процесса необходимо знать

зависимость мощности электрической энергии, вводимой в канал разряда $N(t)$. Такую зависимость в общем случае для произвольного разрядного контура можно получить расчетным путем [5, 7].

В данной работе рассмотрены гидродинамические явления в разрядной камере применительно к вытяжке-формовке конкретной заготовки из особо тонколистовой латуни Л68 толщиной 0,24 мм. Процесс осуществлялся на электроимпульсной установке с параметрами: максимальное напряжение заряда конденсаторной батареи – 5,8 кВ; емкость конденсаторной батареи – около 500 мкФ; собственная частота разрядного тока – 28 кГц; собственное сопротивление – менее 0,001 Ом.

Измерялись разрядный ток и напряжение на электродах по методике, описанной в работе [14], и определялась мощность ввода энергии в канал разряда

$$N = i^2(t)\cdot R_v(i, t).$$

Чтобы избежать погрешности от влияния наводок на измерения кривая функции строилась по точкам, при которых ток или производная тока по времени равнялись нулю [14]. Далее кривая удельной мощности введения электрической энергии в канал разряда ($n = N/V_0$) была аппроксимирована кусочно-линейной функцией

$n = n_1\cdot t/ t_1,\ t < t_1$; $n = n_1\cdot(t_2 - t)/(t_2 - t_1)$, $t_1 < t < t_2$;

$n = n_2\cdot(t - t_2)/(t_3 - t_2)$, $t_2 < t < t_3$; $n = n_2\cdot(t_4 - t)/(t_4 - t_3)$, $t_3 < t < t_4$; $n = 0$, $t > t_4$.

где V_0 – начальный объем плазменного канала в компьютерном расчете.

2. Расчетные данные и компьютерная модель процесса

При моделировании процесса в конечно-элементном комплексе LS-DYNA 971 применялась техника лагранжево-эйлеровой постановки – Arbitrary Lagrange Eulerian (ALE) с использованием принципа Multi-Material ALE Formulation. Этот подход позволяет существенно увеличить время счета до момента наступления неустойчивости, что весьма актуально при решении подобных задач. Размерности величин задавались в системе единиц: *т – мм – с*. В этом случае размерность рассчитываемого давления – МПА.

Моделирование процесса осуществлялось для вытяжки-формовки заготовки из латуни Л68 диаметром 108 мм, толщиной 0,24 мм в матрицу с диаметром очка 60 мм. Выходной диаметр разрядной камеры также равнялся 60 мм. Зазор между прижимом и матрицей оставался в процессе формоизменения заготовки постоянным и равным 0,28 мм. При расчетах материал заготовки полагался изотропным, и была выбрана модель MAT_POWER_LAW_PLASTICITY с параметрами динамической кривой деформационного упрочнения B = 925 т/(мм·с^2), m = 0,44. Упругие константы материала задавались: $E = 1{,}12\cdot10^5$ т/(мм·с^2) – модуль Юнга, ν = 0,35– коэффициент Пуассона, величина плотности бралась $\rho = 8{,}3\cdot10^{-9}$ т/мм^3. Предполагалось кулоновское трение со значениями коэффициента

трения при трении покоя $\mu = 0{,}2$ и $\mu = 0{,}15$ при движении.

Материал камеры, матрицы, электродов и прижима задавался моделью *RIGID*. Для жидкости использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID* с постоянным модулем объемного сжатия K = 2350 т/(мм·с^2). Предполагалось, что при отрицательном давлении 0,1 т/(мм·с^2) происходит кавитация воды.

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась модель *MAT_NULL*, совместно с уравнением состояния: *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK*. При этом задавалась кривая удельной мощности введения электрической энергии в канал разряда со следующими параметрами: t_1 = 25 мкс, t_2 = 59 мкс, t_3 = 86 мкс, t_4 = 107 мкс, $n_1 = 1{,}7 \cdot 10^6$ т/(мм·с^3), $n_2 = 0{,}85 \cdot 10^6$ т/(мм·с^3).

3. Результаты компьютерного моделирования и их анализ

Динамика развития плазменной полости показана на рисунках в таблице 1.

В начале выделения электрической энергии в канале разряда от плазменной парогазовой полости распространяется волна сжатия и примерно при $t \cong 50 \div 100$ мкс достигает поверхности податливой заготовки. В пределах этого времени форма парогазовой полости близка к форме шара, искаженного геометрией электродов. Когда волна сжатия достигает податливой заготовки, то начинается пластическая деформация заготовки. Давление вблизи деформируемой заготовки падает, и волна разгрузки идет в сторону плазменной полости. При этом плазменная полость начинает деформироваться под действием пришедшей волны разгрузки, а также отраженных волн от стенок разрядной камеры. На рисунке, соответствующему времени $t \cong 200$ мкс, видно начало отделения жидкости от верхней части электродов. Заготовка под действием полученного импульса давления разгоняется, и в центре происходит отрыв заготовки от жидкости (рисунок при временах $t \cong 300$ мкс). Процесс деформирования отдельных точек заготовки продолжается примерно до времени $t \cong 600 \div 700$ мкс.

Динамика деформирования самой заготовки представлена в таблице 2.

При времени $t \cong 65$ мкс видно начало деформирования заготовки. Примерно до времени $t \cong 250 \div 300$ мкс дно заготовки остается плоским в отличие от квазистатического деформирования. Это вызвано конечной скоростью распространения пластических волн в материале заготовки. Затем плоская часть дна заготовки превращается в форму, близкую для квазистатического деформирования.

Таблица 1

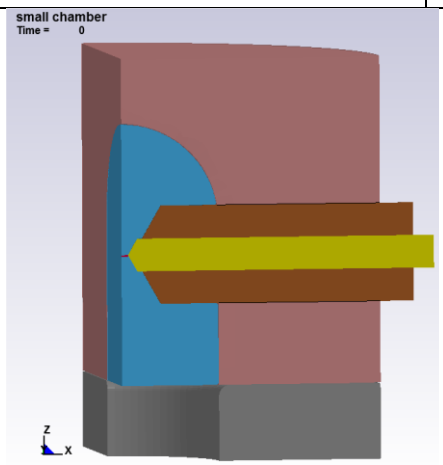
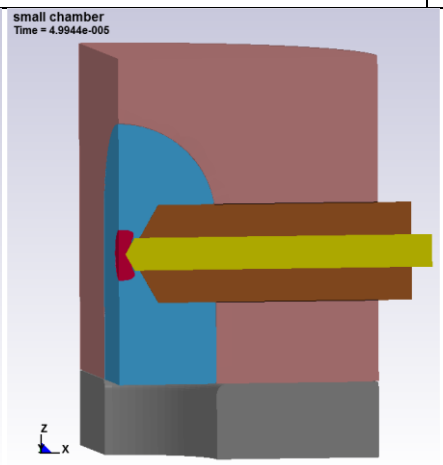
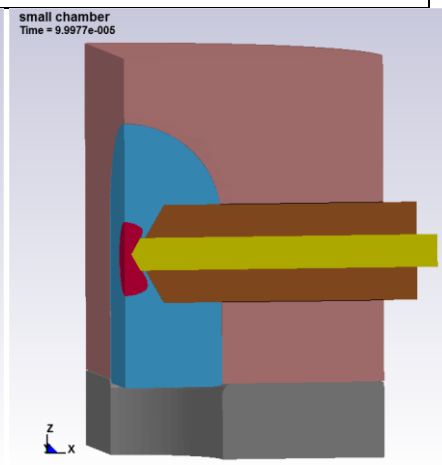
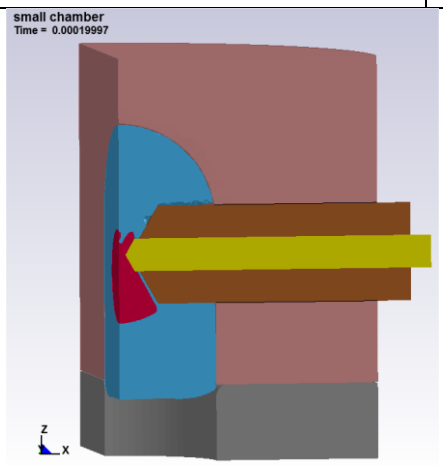
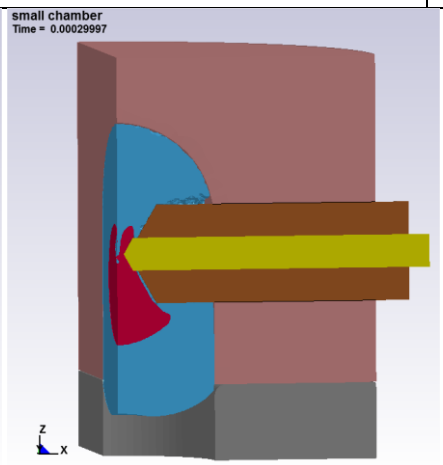
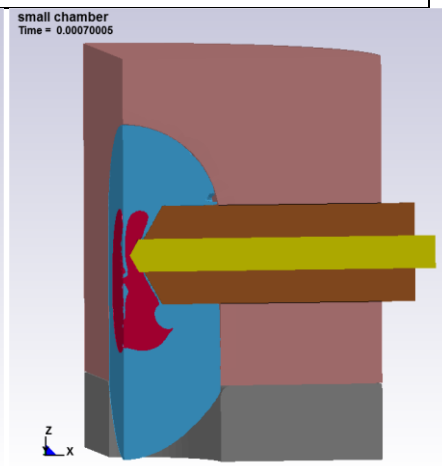
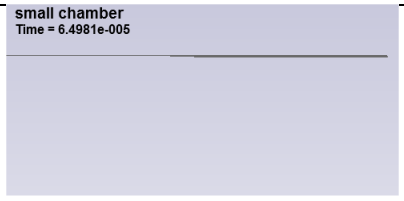
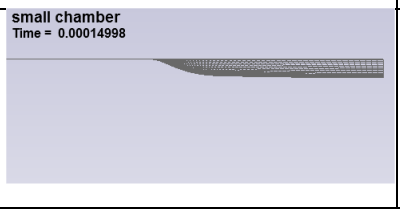
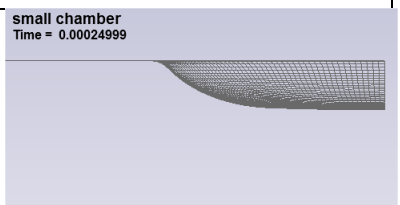
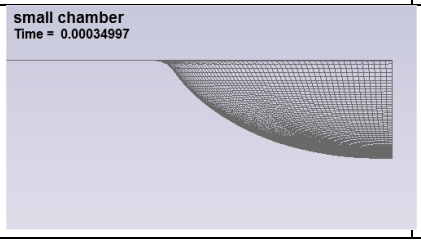
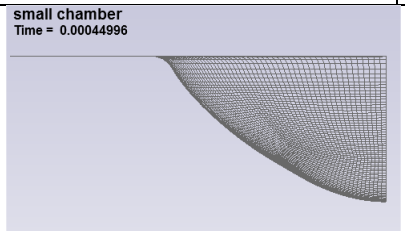
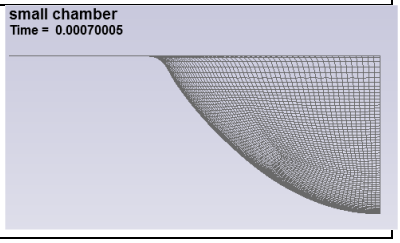
ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛОСТИ		
$t = 0$	$t \cong 50$ мкс	$t \cong 100$ мкс
		
$t \cong 200$ мкс	$t \cong 300$ мкс	$t \cong 700$ мкс
		

Таблица 2

ДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ		
$t \cong 65$ мкс	$t \cong 150$ мкс	$t \cong 250$ мкс
		
$t \cong 350$ мкс	$t \cong 450$ мкс	$t \cong 700$ мкс
		

Для оценки накопленной пластической деформации в конечно-элементных комплексах часто используется эффективная деформация – просуммированная по времени интенсивность тензора накопленных деформаций. На рис. 2 показана временная зависимость эффективной деформации для характерных точек заготовки. Из графика эффективной деформации в центре заготовки *A* (рис. 2, *а*) видны ступеньки при времени $t \cong 300$ мкс и $t \cong 400$ мкс соответствующие моментам отрыва центра заготовки от жидкости.

а) *б)*

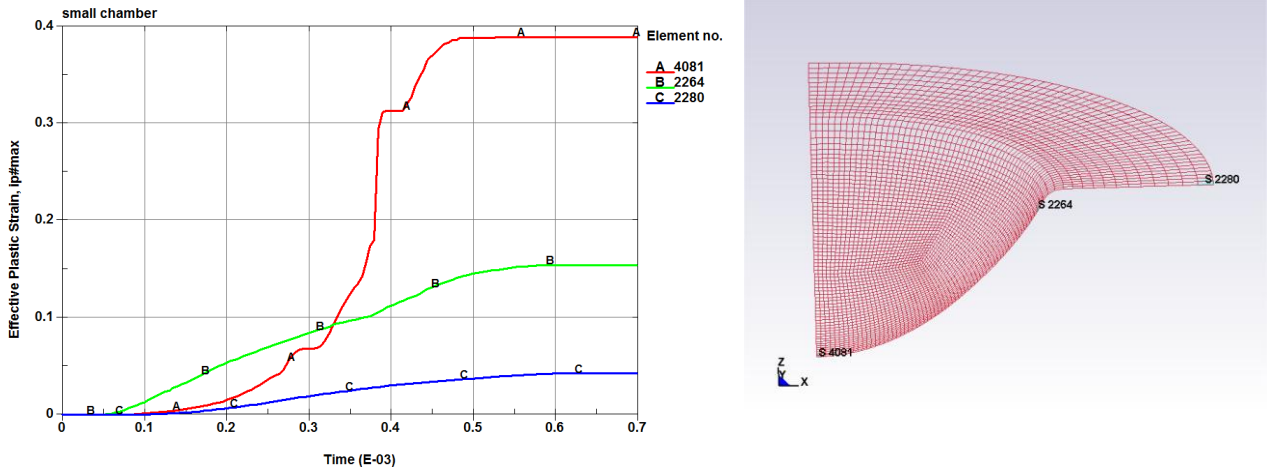


Рис. 2. Эффективная деформация (*а*) для характерных точек заготовки (*б*)

Графики давления в жидкости вблизи плазменной полости и центра деформируемой заготовки представлены на рис. 3, *а*.

а) *б)*

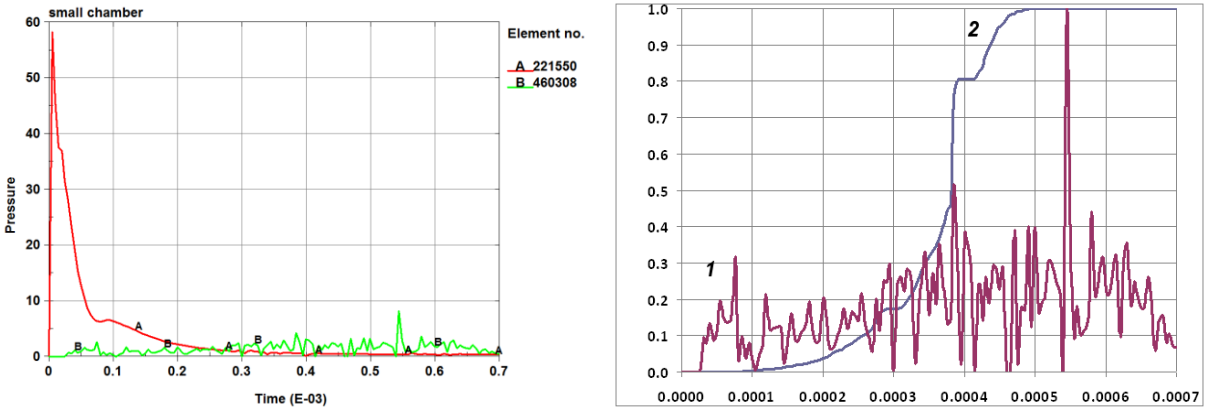


Рис. 3. Зависимость давления (в МПа) от времени (в секундах) (*а*): *A* – вблизи плазменной полости, *B* – вблизи центра заготовки) и совмещенного нормированного давления (*б*) вблизи центра заготовки (*1*) с нормированным графиком эффективной деформации (*2*) от времени в секундах

Видно, что давление вблизи заготовки существенно отличается по амплитуде и форме от давления вблизи канала разряда. На рис. 3, *б* нормированный (отнесенный к максимальной величине) график давления над центром заготовки совмещен с нормированным графиком эффективной деформации. Видно, что давление начальной волны сжатия (примерно до 100÷150 мкс) существенно меньше влияют на общую деформацию по сравнению с давлением гидропотока жидкости на остальном этапе деформирования. Это вызвано тем, что площадь данной части импульса мала по сравнению с площадью давления гидропотока. Выбросы давления и его пульсация определяются отражением волн давления от стенок камеры и незначительно влияют на рост эффективной деформации вследствие инерционности заготовки. Присутствие таких эффектов хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [14], в которой давление оценивалось по скорости вылета струи жидкости из небольшого отверстия в центре подвижной заготовки, фотографируемой сверхскоростным фоторегистратором.

Выводы. На основе компьютерных расчетов электрогидроимпульсной тонколистовой вытяжки-формовки с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA 971 определены некоторые закономерности динамики плазменной полости канала разряда, давления в разрядной камере, нагружения и деформирования заготовки. Показано незначительное влияние ударной волны на общую пластическую деформацию заготовки, которая определяется в большей степени давлением гидропотока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В.* Технологии высокоскоростного деформирования металлов. – Минск: Изд-во БНТУ, 2010. – 456 с.
2. *Тараненко М.Е.* Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. – Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. – 272 с.
3. Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении / В.Н.Чачин и др. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1987. – 231 с.
4. *Чачин В.Н.* Электрогидроимпульсная обработка машиностроительных материалов. – Минск: Изд-во Наука и техника, 1978. – 184 с.
5. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1986. – 208 с.
6. *Поздеев В.А.* Прикладная гидродинамика электрического разряда жидкости. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1980. – 192 с.
7. Разрядноимпульсная технология / Гаврилов Г.Н. и др. – Киев: Изд-во «Наукова думка», – 1979. – 164 с.

8. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.
9. *С.Ф.Головащенко, А.В.Мамутов, В.С.Мамутов.* Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка. – 2012. – № 4 (69) – С. 23-29.
10. *С.Ф.Головащенко, А.В.Мамутов, В.С.Мамутов* Применение комплекса LS-DYNA для расчета канала разряда при электрогидроимпульсной штамповке. Научно-технические ведомости СПбГПУ – сер. Наука и образование. – 2012. – №2 – 1 – (147), – С. 116-120.
11. *А.В.Мамутов, В.С.Мамутов*. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA. Научно-технические ведомости СПбГПУ – сер. Наука и образование. 2014. – № 1 (190) – С. 101-107.
12. Mamutov Viacheslav, Mamutov Alexander, Sergey Golovaschenko Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® 13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, June 8-10, 2014, p. 9.
13. Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219 (2015), pp. 84-100.
14. *Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.* Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. – Минск: Изд-во «Наука и техника», –1990.– 208 с.

V.S.Mamutov[1], G.N.Zdor[2]

MECHANICS OF THE LOADING AND DEFORMING AT ELECTRO-HYDRAULIC FORMING OF THIN SHEET METAL

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Belarusian National Technical University, Belarus.

Abstract

The mechanics of a loading and deforming of thin sheet metal at electro-hydraulic forming is analyzed. With using of finite-element complex LS-DYNA on a concrete example some features of dynamics of a plasma expansion in discharge channel, pressure in the discharge chamber, loadings and deformation of sheet metal part are received. Effects have shown the small influence of a shock wave on plastic strain of sheet metal part in comparison with influence of a hydrostream of a fluid.

Key words: electro-hydraulic forming of thin sheet metal, finite-element complex LS-DYNA, features of dynamics, plastic strain of sheet metal, shock wave, hydrostream of a fluid

REFERENCES

[1] Zdor G.N., Isaevich L.A., Kachanov I.V. Tehnologii vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. – Minsk: Izd-vo BNTU, 2010. – 456 p. (rus.)
[2] Taranenko M.E. Elektrogidravlicheskaia shtampovka: teoriia, oborudovanie, tehprocessy. – Harkov: Izd-vo HAI, 2011. – 272 p. (rus.)
[3] Elektrogidroimpulsnaia obrabotka materialov v mashinostroenii / V.N.Chachin i dr. – Minsk: Izd-vo "Nauka i tehnika", 1987. – 231 p. (rus.)
[4] Chachin V.N. Elektrogidroimpul'snaia obrabotka mashinostroitel'nyh materialov. – Minsk: Izd-vo Nauka i tehnika, 1978. – 184 p. (rus.)
[5] Krivickiy E.V. Dinamika elektrovzryva v zhidkosti. – Kiev: Izd-vo "Naukova dumka", 1986. – 208 p. (rus.)
[6] Pozdeev V.A. Prikladnaia gidrodinamika elektricheskogo razriada zhidkosti. – Kiev: Izd-vo "Naukova dumka", 1980. – 192 p. (rus.)
[7] Razriadnoimpul'snaia tehnologiia / Gavrilov G.N. i dr. – Kiev: Izd-vo "Naukova dumka", – 1979. – 164 p. (rus.)
[8] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006, 498 p.
[9] S.F.Golovashenko, A.V.Mamutov, V.S.Mamutov. Metodika komp'iuternogo modelirovaniia elektrogidroimpul'snogo formoizmeneniia tonkolistovyh metallov s primeneniem programmnogo kompleksa LS-DYNA 971 // Metalloobrabotka. – 2012. – N 4 (69) – pp. 23-29. (rus)
[10] S.F.Golovashenko, A.V.Mamutov, V.S.Mamutov Primenenie kompleksa LS-DYNA dlia rascheta kanala razriada pri elektrogidroimpul'snoy shtampovke. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU – ser. Nauka i obrazovanie. – 2012. – N2 – 1 – (147), – pp. 116-120. (rus)
[11] A.V.Mamutov, V.S.Mamutov. Modelirovanie elektrogidroimpul'snoy listovoy formovki s primeneniem kompleksa LS-DYNA. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU – ser. Nauka i obrazovanie. 2014. – N 1 (190) – pp. 101-107. (rus)
[12] Mamutov Viacheslav, Mamutov Alexander, Sergey Golovaschenko Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® 13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, June 8-10, 2014, p. 9.
[13] Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen. Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219 (2015), pp. 84-100.
[14] Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S. Metody issledovaniia vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. – Minsk: Izd-vo "Nauka i tehnika", – 1990. – 208 p. (rus)

УДК 621.78; DOI 10.1872/MMF-2016-107

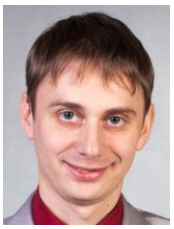
Попов А.И.[1], Тюхтяев М.И. [2], Радкевич М.М.[3],
Новиков В.И.[4], Кудрявцев В.Н.[5]

ТЕХНОЛОГИЯ СТРУЙНОЙ ФОКУСИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

[1]Попов Александр Иннокентьевич, к.т.н., доц.
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812) 552-93-02
E-mail:profbaikl@yandex.ru

[2]Михаил Иванович Тюхтяев, к.т.н ОАО «Силовые машины»
«Ленинградский металлический завод»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 363-34-10 (доб. 4-73-10),
E-mail: Tyukhtyaev_MI@lmz.power-m.ru

[3]Михаил Михайлович Радкевич - д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812)492-7658,
E-mail:radmich@mail.ru.



[4]Новиков Виталий Иванович,- к.т.н., доц. Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812) 552-93-02
E-mail:vitalynewage@gmail.com

[5]Кудрявцев Владимир Николаевич,- к.т.н., доц. Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург,
Тел.:8(812) 552-93-02
E-mail:kudryavtsevvn@mail.ru

Аннотация

Предложена технология струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки поверхности турбинных лопаток. Рассмотрены технологические возможности процесса обработки теплостойкой стали 20Х13. Показано, что в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки затрачивается значительно меньше энергии. Обработка осуществляется при температурах не вызывающих структурные

изменения материала. Микротвердость поверхностных слоев не изменяется. Данный техпроцесс позволяет существенно снизить шероховатость поверхностного слоя и уменьшить погрешности геометрии изделия, возникающие при обработке погружением.

Ключевые слова: струйная, фокусированная, электролитно-плазменная обработка, теплостойкая сталь, микротвердость, шероховатость, температура

Переход промышленности России к следующему седьмому технологическому укладу, в основе которого лежат роботостроение и нанотехнологии невозможен без создания инновационных продуктов в этой области [1]. Одним из таких продуктов охватывающим оба направления является технология фокусированной струйной электролитно-плазменной обработки для формирования поверхности турбинных лопаток [2].

Турбинные лопатки являются одним из самых сложных и дорогостоящих элементов современной турбины. Достижение КПД и надежности турбины во много связано с материалами, формой, и точностью геометрических параметров применяемых турбинных лопаток. Получение высокой точности геометрического профиля с заданным уровнем шероховатости при обработке жаропрочных, труднообрабатываемых материалов является сложной технологической задачей.

Совершенствование технологических процессов формообразования лопаток обусловлено следующими критериями: снижением общей стоимости изготовления лопатки, обеспечением заданной точности сложной криволинейной формы, максимальным снижением доли ручного труда.

Снижение общей стоимости изготовления турбинных лопаток является одной из основных задач современного турбинного производства. Не смотря на применение шлифовальных роботизированных комплексов, на ведущих предприятиях отрасли в виду сложности формы лопаток все ещё остается значительный объем ручных шлифовальных работ. Уменьшение доли ручного труда при производстве лопаток существенно снизит влияние человеческого фактора на точность и стабильность получаемых геометрических размеров и формы. Альтернативным технологическим процессом обработки лопаток на шлифовальных роботизированных комплексах является доводка поверхности изделия электролитом, при этом с поверхности удаляются микронеровности. Микронеровности, остающиеся после процесса шлифования, являются концентраторами напряжений, приводящих к разрушению лопатки [3].

Технология электролитно-плазменной обработки позволяет резко снизить число микронеровностей на поверхности, что повышает надежность лопатки, а значит и турбины в целом. Обработка одновременно не по всей поверхности лопатки, а ее локализация с постепенным доведением обработанной поверхности по всей площади лопатки на наш взгляд является более предпочтительной. Локальная обработка позволяет более гибко регулировать технологические параметры процесса и благодаря этому обрабатывать отдельные поверхности детали. Это достигается за счет струйного фокусированного пучка электролитной плазмы локализованной зоны с последующим перемещением катодного модуля с заданной высотой и скоростью над поверхностью лопатки. Данная обработка является менее энергетически затратная, более точная и экологически чистая [4].

В данной работе изложены результаты исследования основных технологических параметров струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки профиля лопаток паровых турбин в промышленных условиях. При этом определяли вольт - амперную характеристику процесса, оценивалось влияние процесса на микротвердость и шероховатость поверхности, изучался температурный режим процесса. Установлены требования к безопасности проведения работ.

Анализ литературных данных [5,6] и проведенных экспериментов показал, что одним из существенных преимуществ метода струйной фокусированной электролитно - плазменной обработки по сравнению с погружением детали в электролит является формирование в локальной зоне объемного плазменного разряда с повышенной плотностью тока на поверхности. Технологическая возможность создавать высокую плотность до 7 А/см² [7] имеется и при обработке погружением. При этом, как правило, наблюдается нарушение геометрических параметров изделия по длине [8], поскольку на более погруженной части изделия происходит большая размерная обработка детали по сравнению с частью, погруженной на меньшую глубину. Кроме того, существенным недостатком обработки детали погружением в ванну является нарушение геометрических параметров лопаток в зоне утонений пера, острых углов, и увеличение радиуса выходных кромок, что связано с более высоким зарядом на выступах и острых кромках.

Струйная обработка лопаток взамен обработки погружением приводит к управляемой обработке и повышению точности профиля лопатки в особенности на кромках и поверхностях малых радиусных переходов. Формирование в качестве инструмента в виде узкого фокусированного пучка плазменного шнура малого диаметра направленного к поверхности лопатки позволяет получать большие плотности тока в локальной зоне обработки и активизацию процессов

атомарного удаления поверхностных слоев. Данное преимущество позволяет увеличить скорость съема материала с поверхности лопаток, не нарушая геометрических параметров остальной части лопатки. Совмещение при этом параллельных процессов: окисления, ударного взаимодействия отрицательных ионов металла соли с атомами железа и хрома, с активизацией процессов анодного растворения позволяет в короткий промежуток времени удалять с поверхностные слои металла, обеспечивая при этом параметр шероховатости менее Ra 0,4 мкм, что соответствует требованиям конструкторской документации для профилей лопаток [3,9].

В перспективе это позволит создать управляемый инструмент, позволяющий производить несколько видов поверхностной обработки: предварительную размерную обработку, электролитно-плазменное полирование, нанесение функциональных покрытий.

Разработана физическая модель установки для поведения процесса струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки (рис.1.). Данная установка позволяет исследовать параметры процесса струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки. Максимальная затрачиваемая мощность установки для струйной фокусированной обработки на формирование разряда достигает 2000 Вт по сравнению с 2000 кВт [9] для обработки группы лопаток погружением в ванну с электролитом.

На рис.2 представлена вольт - амперная характеристика процесса, для которой характерно наличие нескольких участков: кривая подъема разрядного тока соответствующая анодному растворению подчиняющемуся закону Фарадея, двух ниспадающих участков коммутации [10] и двух участков стабилизации по току.

Установлено, что поверхностный плазменный разряд возникает в области напряжений от 180-230 В. И объемный плазменный разряд возникает в диапазоне напряжений 230-500 В.

Отмечено также, что процесс формирования поверхностного и объемного разряда имеет особенность в виде стекания разряда на поверхность в частности при приближении катодного модуля к поверхности изделия или отрыве пучка плазмы от поверхности и повторном ее соприкосновении с поверхностью за счет накопленного потенциала заряда (рис.3).

Исследование поверхности образцов, изготовленных из лопаток (стал 20Х13) в зоне стекания электрического заряда до и после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки наблюдаются блестящие участки округлой формы, напоминающие микрократеры. Микрократеры образуются в результате формирования плазменной дуги между электродами.

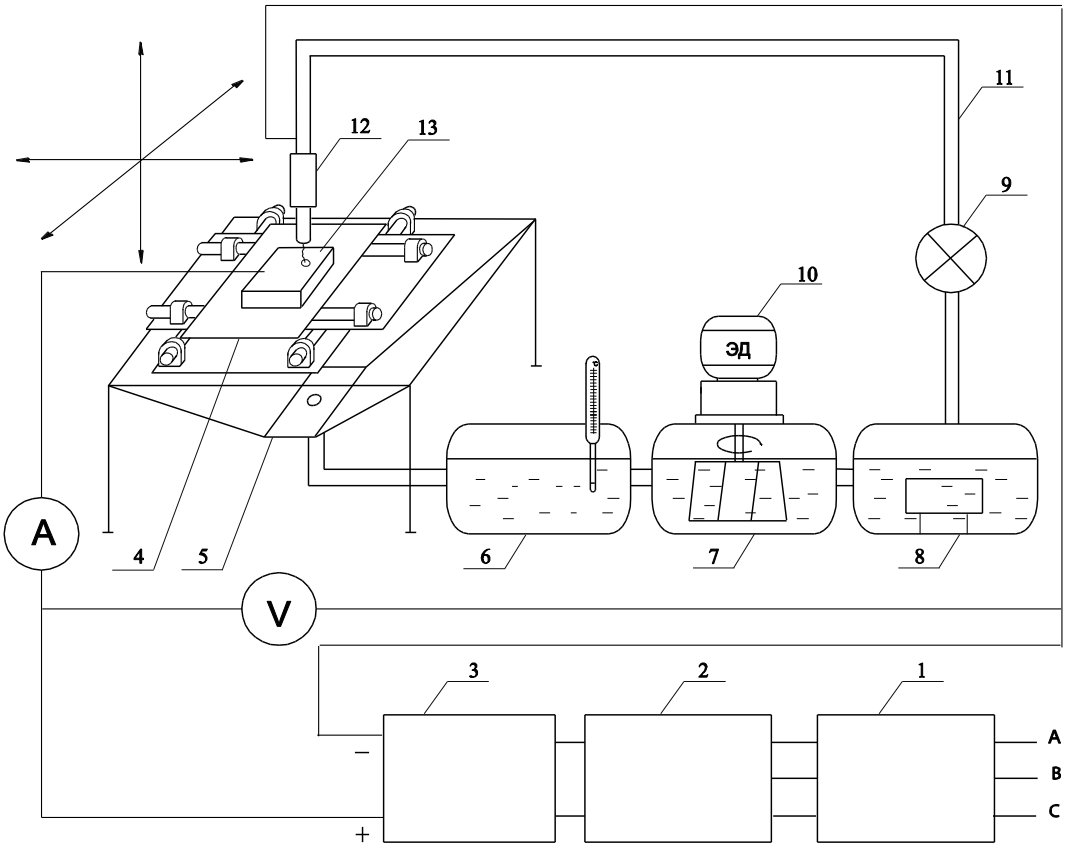


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения исследований струйной электролитно-плазменной обработки: 1- трансформатор; 2 - выпрямитель; 3- фильтр; 4 - двух координатный столик; 5 - сборник электролита; 6 - ванна контроля температуры; 7 - ванна перемешивания электролита; 8 - фильтр сбора отходов; 9 - импеллерный насос; 10 - электродвигатель; 11- трубка подвода электролита; 12 - узел перемещения в вертикальном положении; 13 – образец

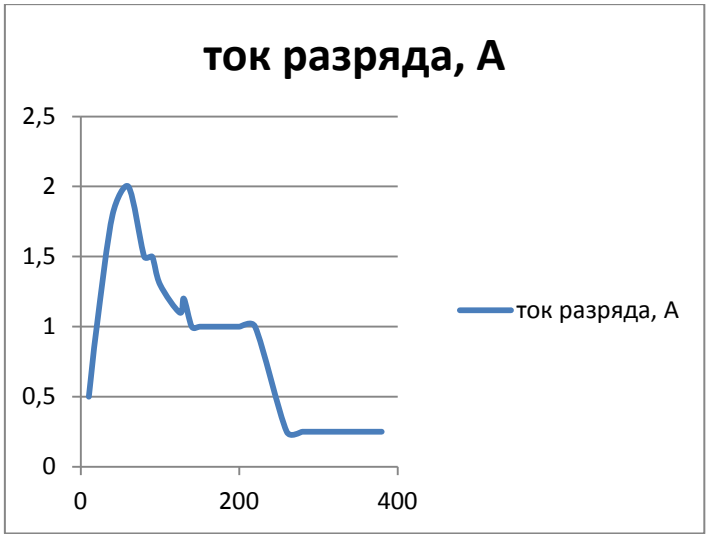


Рис. 2. Зависимость напряжение - ток на разрядном промежутке

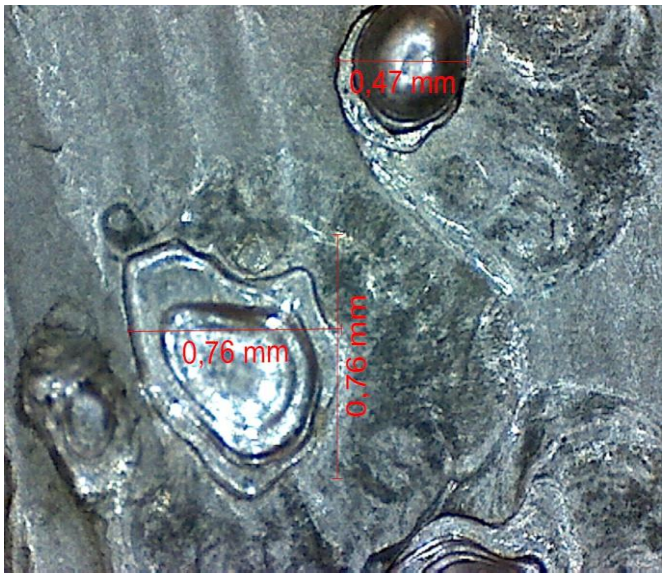


Рис. 3. Зона электрического пробоя на образце из стали 20Х13

Измерение микротвердости поверхности лопатки до обработки, после обработки и в зоне пробоя с использованием микротвердомера ПМТ-3 позволило оценить влияние процесса струйной электролитно-плазменной обработки на микротвердость поверхностных слоев образца из стали 20Х13(рис.4.)

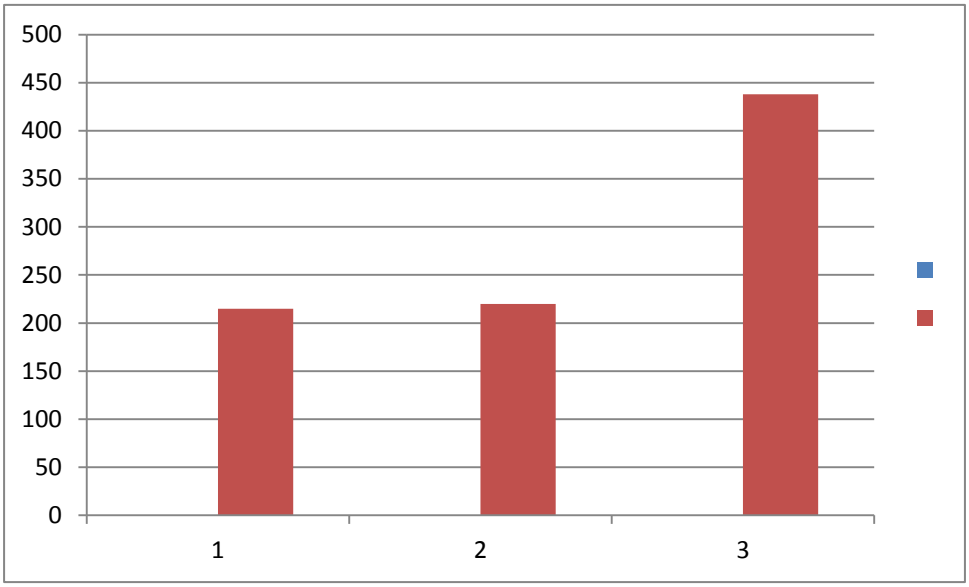


Рис.4. Оценка влияния струйной электролитно-плазменной обработки на микротвердость HV поверхностных слоев образца из стали 20Х13: 1- микротвердость образцов без полировки; 2- микротвердость образцов после струйной фокусированной электролитной - плазменной полировки; 3- микротвердость образцов после электрического пробоя

В результате проведенных исследований установлено, что после струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки микротвердость поверхностного слоя не изменяется и остается в пределах значений микротвердости до обработки. Значительное увеличение микротвердости поверхностного слоя наблюдается в случае электрического пробоя. При этом для стали 20Х13 увеличение микротвердости достигает по сравнению с исходной на 56-89% , что, по-видимому, связано, с термическим упрочнением поверхностных слоев стали вследствие быстрого локального нагрева и охлаждения.

Оценку шероховатости поверхностного слоя определяли на приборе «MarSurf PS1». Зафиксировано снижение шероховатости при струйной фокусированной электролитно - плазменной обработки в 2,5-3 раза (рис.5.)

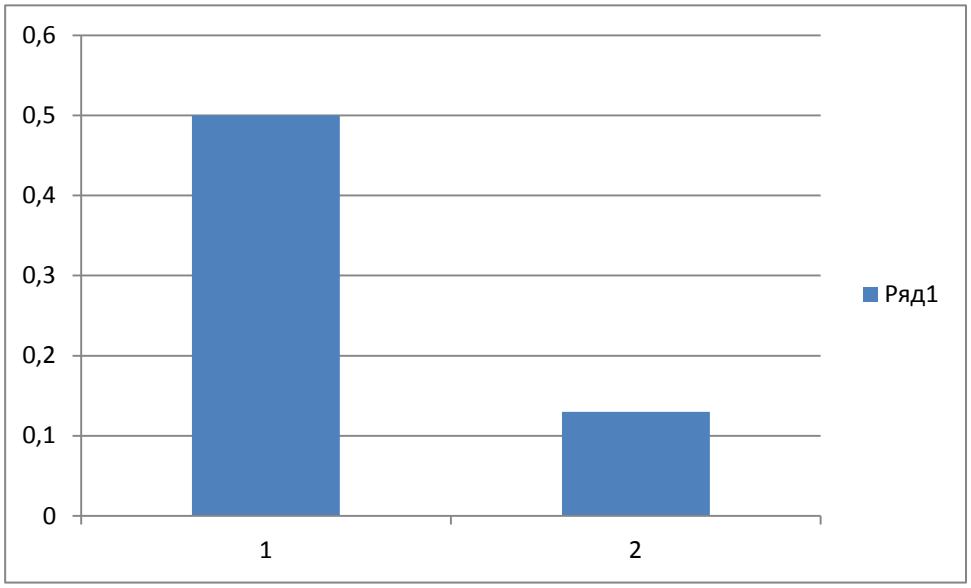


Рис.5. Влияние струйной электролитно-плазменной обработки на параметры шероховатости Ra поверхностного слоя для образцов из стали 20Х13: 1- без обработки; 2- после струйной фокусированной электролитной - плазменной полировки

Исследование температуры анода хромель - алюмелевой термопарой показало, что в процессе обработки изделие не нагревается выше температуры 110°С. Можно предположить, что в процессе обработки отсутствуют фазовые превращения в поверхностном слое материала, что и подтверждается результатами измерения микротвердости (рис.6).

Опытные работы на экспериментальной установке дают основание утверждать, что для проведения безопасных работ при струйной фокусированной обработке необходима защита органов дыхания и зрения, путем установки вентиляции и защитных экранов в зоне обработки детали. Установка вентиляции позволит удалить из зоны обработки продукты испарения электролитного раствора, а непроницаемые экраны защитят от излучения объемного плазменного разряда при высоких напряжениях.

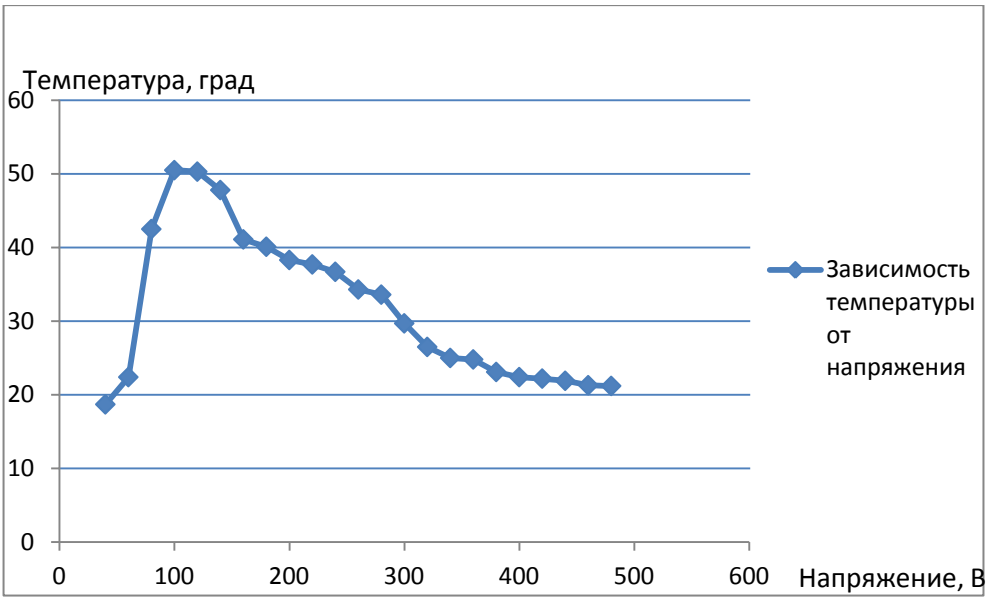


Рис. 6. Зависимость температуры анода от прилагаемого напряжения

Предлагаемый технологический процесс является значительно менее энергоемким и более экологически чистым, чем обработка погружением в ванну электролита, а также позволяет резко снизить отрицательное воздействие на обслуживающий персонал за счет снижения на несколько порядков площади и объемов используемого электролита.

Выводы

1. Оценка технологических возможностей и результатов экспериментов позволяет предполагать технологическую возможность применения метода струйной электролитно-плазменной обработки для процесса финишной обработки лопаток паровых турбин.
2. Развитие предлагаемой технологии в целом позволит повысить точность обработки и снизить затраты на технологический процесс получения лопаток паровых турбин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надеев А.И., Попова А.И., Сурина А.В., Свечников Ю.К. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов // Датчики и системы. - 2006. - N 11(90). - С.59-63.
2. Щербаков С.Р., Попов А.И., Кудрявцев В.Н. Исследование вольт-амперной характеристики процесса струйной электролитно-плазменной полировки //Материалы научного форума с междунар. участием «Неделя науки СПбПУ» 30 ноября-5декабря.2015.- с.158 -159 .
3. Новиков В. И., Попов А. И., Тюхтяев М. И., Зейдан М. Н. Возможности электролитно-плазменного полирования при обработке деталей с

различным начальным уровнем шероховатости поверхности// Металлообработка, 1(61)2011 Издательство «Политехника», СПб, С.13.
4. Веселовский А. П., Ушомирская Л. А. Интенсификация технологических процессов изготовления деталей машин при использовании различных видов энергии / Металлообработка. - 2010. - N 2. - С. 46-49. - ISSN 1684-6702
5. Гайсин Ал. Ф., Сон Э.Е. Паровоздушные разряды между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при пониженных давлениях//Теплофизика высоких температур, 2010, том 48, выпуск 3, 470-472.
6. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов/ И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 232 с. – ISBN 978-985-08-1215-5
7. Патент RU 2357019 Способ электролитно-плазменной обработки деталей
8. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов.– Москва: Техносфера, 2011.– 464 с.
9. Плотников Н. В., Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник УГАТУ.– Т.17, № 4 (57).– Уфа: УГАТУ, 2013.– С. 90–95.
10. Дураджи В.Н. Обработка алюминия в электролитной плазме при анодном процессе / В.Н. Дураджи, Д.Е. Капуткин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.3, №3. – С. 38-41.

A.Popov, M.Tyukhtyaev, M.Radkevich, V.Novikov, V.Kudryavtsev

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This technology may use for processing the surfaces of the blades of the turbine by metod focused electrolyte- plazma processing. These technological possibilities of the process focused electrolyte- plazma processing use for heat-resistant stainless steel 20X13. The expenseses to energy on realization of the process focused electrolyte- plazma processing far less. The process passes under low temperature and does not bring about structured change to material, does not change microhardness of the surface layer. This processing allows to reduce the roughness surface layer and reduce inaccuracy to geometries of the product, which there is when processing by submersion. The process has a possibility to automations.

Keywords: focused electrolyte- plazma processing, heat-resistant steel, microhardness, roughness, temperature

REFERENCES

[1] Nadeev A.I., Popova A.I., Surina A.V., Svechnikov J.K. Principles of automated support systems for the life cycle of innovative products //Automated system of principles - 2006. - N 11(90). Pp.59-63.

[2] Scherbakov S.R., Popov A.I., Kudryavtsev V.N. Research the current-voltage characteristics of the process jet electrolytic-plasma polishing//Materials Science Forum with Intern. participating/"Science Week SPbPU" on 30November-5December.2015. Pp.158 -159.

[3] Novikov V.I., Popov A.I., Tyukhtyaev M.I., M.N. Zeidan Opportunities for electrolytic-plasma polishing in the processing of parts with different initial level of surface roughness/ Metalworking, 1 (61) 2011 "Politehnica" Publishing House, St. Petersburg, P.13.

[4] Veselovsky A.P., Ushomirskaya L.A. Intensification of technological processes of manufacturing machine parts by using different aspectual /Metalworking. - 2010. - N 2. - S. 46-49. - ISSN 1684-6702

[5] Gysin Al. F., Son E.E. Vapor-air discharge between the jet electrolytic cathode and the metal anode at low// High Temperature, 2010, Volume 48, Issue 3, 470-472.

[6] Kulikov J.S. Electrolytic-plasma treatment of materials Igor Kulikov, SV Vashchenko AY Kamenev. - Minsk: Belarus science, 2010. – 232 c. – ISBN 978-985-08-1215-5

[7] Patent RU 2357019 Method for electrolytic-plasma treatment of details

[8] Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V., Lyudin V,B., Crete B.L., Borisov A.M. Plasma electrolytic modification of the surface of metals and splavov.- Moscow: the Technosphere, 2011. 464 p.

[9] Plotnikov N.V., Smyslov A.M., Tamindarov D.R. On the question of the model for electrolytic-plasma polishing surface //Bulletin UGATU.- T.17, № 4 (57) .- Ufa: USATU, 2013. Pp 90-95.

[10] Duradzhi V.N. Machining of aluminum in the electrolyte at the anode plasma process/ V.N. Duradzhi, D.E. Kaputkin //Engineering: network electronic scientific journal. - 2015. - Vol.3, №3. - Pp. 38-41.

УДК.621.735.79; DOI 10.1872/MMF-2016-108

М.М. Радкевич[1], Д.Ю. Фомин[2]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ШТАМПОВКИ

[1]Михаил Михайлович Радкевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология конструкционных материалов и материаловедение»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул.Политехническая д.29
тел. +7 (812) 552-9302

[2]Фомин Дмитрий Юрьевич – к.т.н., доцент кафедры «Технология конструкционных материалов и материаловедение», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
тел. +7 (812) 552-9302

Аннотация

Представлены рекомендации по выбору температурного режима деформационного воздействия при штамповке поковок. Сделана попытка провести математическое обоснование выбора метода штамповки. Приведены сведения об основных параметрах технологического процесса штамповки, определяющих экономическую эффективность производства изделий.

Ключевые слова: технологический процесс, метод штамповки, теплая штамповка, поковка, эффективность

Повышение эффективности технологических процессов заготовительного производства является актуальным вопросом для предприятий машиностроительного сектора. На наш взгляд в машиностроении рост эффективности процессов может достигаться за счет снижения затрат на производство заготовок при сохранении надежности и продления ресурса работы детали.

Решение этой непростой проблемы возможно за счет оптимизации и рационализации режимов деформационного и термического воздействия в совокупности с модернизацией агрегатной схемы реализации технологических процессов.

В данной статье изложен материал по оптимизации и рационализации технологического процесса за счет правильного выбора температурного режима штамповки, который влияет на стоимость производства заготовок через стоимость энергоносителей. Заметим, что по подсчетам корпорации

Hirschvogel энергозатраты на производство составляют до 20% себестоимости изделия [1,2].

Известны три основных метода штамповки: холодная, теплая, горячая [3-5] и их комбинации. Выбор метода штамповки рекомендуется производить, предварительно оценив эффективность каждого метода в отдельности для конкретного технологического процесса. Заключение о наиболее эффективном методе штамповки базируется на анализе преимуществ и недостатков каждого метода. Очевидно, оценить эффективность, сравнивая абсолютные показатели метода, такие как, механические свойства поковок, либо затраты на электроэнергию, не представляется возможным, ввиду большего разнообразия возможных техпроцессов и сталей. Поэтому сравнение методов штамповки предлагается осуществлять с помощью корреляционно-регрессионного анализа по относительным показателям на основании условного показателя качества изделия, выбранного метода штамповки. Указанный показатель качества метода, по сути, является индексом потенциала, то есть показатель качественных и количественных характеристик метода штамповки относительно друг друга в наибольшей степени влияющих на выбор наиболее эффективного (рационального) метода штамповки [6-9].

Сопоставление методов штамповки производилось по нескольким критериям сравнения:

1. Энергозатраты на электроэнергию, функционально обеспечивающую работу производственного оборудования.
2. Износ инструмента - износ ручья штампа, что в свою очередь определяет качество поковок, эксплуатационные затраты на ремонт и замену штампа.
3. Механическая обработка – объем требуемой механической обработки, зависящий от размерной точности и качества поверхности получаемых поковок.
4. Структура поковки – сравнивается однородность твердого раствора, микроструктура стали, определяющая механические свойства и эксплуатационные характеристики деталей.
5. Номенклатура стали – количество марок сталей, из которых возможно изготовить поковки в рамках оцениваемого метода штамповки.
6. Технологическая деформируемость – параметр, определяющий пространственно-геометрическую сложность изготавливаемых поковок.

Для проведения сравнительной оценки, выбранные характеристики сгруппированы в табл. 1 по трем основным критериям – экономическому (определяет себестоимость поковки); критериям качества (определяет эксплуатационные характеристики деталей); ограничивающему (определяет возможность применении, а по сути,

технологическую универсальность метода).

Таблица 1

Критерии сравнения методов объемной штамповки

Критерии сравнения	**Холодная штамповка**	**Теплая штамповка**	**Горячая штамповка**
Температура штамповки	комнатная температура	550°С - 950°С	950°С - 1200°С
Размерная точность	высокая, IT7-IT11	средняя, IT10-IT12	низкая, IT14-IT16
Качество поверхности, R_z	хорошее, 5-20 мкм	среднее, 30-50 мкм	низкое, 50-100 мкм
Критерии выбора метода штамповки:			
Группа I – Экономические критерии			
Энергозатраты	низкие	умеренные	высокие
Износ штампа	высокий	средний	низкий
Механическая обработка	минимальная	средняя	максимальная
Группа II – Критерии с точки зрения качества поковок			
Структура поковки	негомогенная	гомогенная, мелкозернистая	гомогенная, крупнозернистая
Группа III – Ограничивающие критерии			
Номенклатура стали	ограниченное количество	большое количество	большое количество
Технологическая деформируемость	низкая, ограниченная	хорошая	высокая

Из таблицы 1 видно, что зависимость эффективности, а следовательно, рациональности, применения того или иного метода определяется несколькими факторами (группой факторов).

Таким образом, для многофакторной зависимости использован метод множественной корреляции. Для этого качественные характеристики кодируются от 1 до 3 по принципу «чем лучше характеристика объекта, тем выше код, присваиваемый объекту».

Кодировка по основным параметрам сравнения представлена в табл. 2.

После кодирования производится приведение кодов к относительным величинам для того, чтобы сгладить влияние каждого из факторов на выбор метода штамповки (используемый метод предполагает в качестве первого приближения одинаковое влияние факторов). Для этого код объекта по каждому из факторов делят на максимальное значение, т.е. производят нормирование закодированных факторов. После приведения, максимальное значение кода любого фактора равно единице.

Таблица 2

Кодировка основных параметров сравнения методов объемной штамповки

Критерии сравнения	**Холодная штамповка**	**Теплая штамповка**	**Горячая штамповка**
Температура штамповки	комнатная температура	550°С - 950°С	950°С - 1200°С
Размерная точность	высокая, IT7-IT11	средняя, IT10-IT12	низкая, IT14-IT16
Качество поверхности, R_z	хорошее, 5-20 мкм	среднее, 30-50 мкм	низкое, 50-100 мкм
Критерии выбора метода штамповки:			
Группа I – Экономические критерии			
Энергозатраты	3	2	1
Износ штампа	1	2	3
Механическая обработка	3	2	1
Промежуточный итог по группе I	**7**	**6**	**5**
Группа II – Критерии с точки зрения качества поковок			
Структура поковки	1	3	2
Промежуточный итог по группе I и II	**8**	**9**	**7**
Группа III – Ограничивающие критерии			
Номенклатура стали	1	3	3
Технологическая деформируемость	1	2	3
ИТОГО	**10**	**14**	**13**

Результаты нормирования представлены в табл.3.

Таблица 3

Нормирование закодированных факторов сравнения

Критерии сравнения	**Холодная штамповка**	**Теплая штамповка**	**Горячая штамповка**
Энергозатраты	1.00	0.67	0.33
Износ штампа	0.33	0.67	1.00
Механическая обработка	1.00	0.67	0.33
Структура поковки	0.33	1.00	0.67
Номенклатура стали	0.33	1.00	1.00
Технологическая деформируемость	0.33	0.67	1.00
ИТОГО	**3**	**5**	**4**

Так как влияние каждого параметра не одинаково, то необходимо определить влияние каждого критерия, по которому сравниваются

режимы-аналоги на итоговый выбор метода штамповки. Для определения удельного веса критериев выбора использован метод анализа иерархий. Метод заключается в декомпозиции задачи на более простые составные части и дальнейшей обработке последовательных суждений по парным сравнениям. Метод анализа иерархий позволяет оценить противоречивость экспертных суждений и минимизировать ее.

Суть метода заключается в сравнении критериев выбора между собой по принципу более важный, менее важный и их оцифровке. При сравнении критерия с самим собой отношение равно единице. Сила суждения при оценке важности определяется с помощью цифровой фундаментальной шкалы абсолютных значений. Шкала относительной важности, разработанная автором метода Т.Саати [107-109], приведена в табл. 4.

Таблица 4

Шкала относительной важности

Интенсивность относительной важности	**Определение**	**Объяснение**
1	Равная важность	Равный вклад критериев в выбор
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному критерию выбора над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство критерия выбора над другим
7	Значительное превосходство	Одному из критериев дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного критерия над другим подтверждается наиболее сильно
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае

После этого составляется квадратная матрица парных сравнений

$$A = [a_{ij}]$$

Матрица расчета веса фактора представлена в табл. 5. Размерность матрицы n равна количеству критериев. При этом для элементов матрицы выполняется соотношение

$$a_{ij} = 1/a_{ji},$$

то есть матрица является обратно симметричной.

Веса факторов являются нормированными значениями компонентов собственного вектора

$$w = [w_i]$$

матрицы А. Компоненты собственного вектора матрицы вычисляются как среднее геометрическое значение соответствующих строк матрицы по формуле 1.

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} w_{ij}} \tag{1}$$

Тогда вес фактора (нормированное значение балла элемента сравнения) q_i определяется по формуле 2.

$$q_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{2}$$

Таблица 5

Матрица парных сравнений

Критерии сравнения	**Энергозатраты**	**Износ штампа**	**Механическая обработка**	**Структура поковки**	**Номенклатура стали**	Технологическая деформируемость
Энергозатраты	1.00	1.00	0.33	5.00	5.00	5.00
Износ штампа	1.00	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00
Механическая обработка	3.00	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00
Структура поковки	0.20	0.20	0.20	1.00	0.33	1.00
Номенклатура стали	0.20	0.20	0.20	3.00	1.00	1.00
Технологическая формуемость	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	1.00
Среднее геометрическое	0.54	0.45	0.37	2.69	1.86	2.24
Вес фактора	**0.07**	**0.05**	**0.05**	**0.33**	**0.23**	**0.27**

По результатам кодирования и нормирования закодированных факторов с учетом весов влияния, рассчитывается суммарный коэффициент качества или «индекс потенциала» объектов сравнения, как сумма кодов для каждого объекта. Расчет суммарного коэффициента качества отражен в табл. 6.

Таблица 6

Расчет суммарного коэффициента качества

Критерии сравнения	**Холодная штамповка**	**Теплая штамповка**	**Горячая штамповка**
Энергозатраты	0.07	0.04	0.02
Износ штампа	0.02	0.04	0.05
Механическая обработка	0.05	0.03	0.02
Структура поковки	0.11	0.33	0.22
Номенклатура стали	0.08	0.23	0.23
Деформируемость	0.09	0.18	0.27
Суммарный коэффициент качества	**0.41**	**0.85**	**0.82**

Выводы

Наивысшее расчетное значение суммарного коэффициента качества поковок, будет иметь место при изготовлении их по режимам теплой штамповки поковок. По сути это означает, что с точки зрения экономического потенциала теплая штамповка наиболее перспективный метод штамповки, который может быть рекомендован для изготовления деталей в рамках заготовительного производства. В отличие от холодной штамповки, теплая штамповка позволяет получить более широкий диапазон пространственно-геометрических конфигураций поковок, и в то же время обеспечивает большую точность изделий по сравнению с горячей штамповкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dahme, M. Forged Components / M. Dahme. – Germany: Egger, Landsberg am Lech, 2011. – 112 p.
2. Dahme, M. Möglichkeiten und Grenzen der Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung. / M. Dahme, M. Hirschvogel // Werkstatt u. Betrieb. – 1991. – №124. – P.865-868.
3. Радкевич, М.М. Технология упрочняющей программной механико-термической обработки / М.М. Радкевич. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 263 с.
4. Lange, K. Umformtechnik / K. Lange // Massivumformung. – 1988. – №2. – С.98-103.
5. Коджаспиров, Г.Е. Физические основы и ресурсосберегающие технологии изготовления изделий пластическим деформированием / Г.Е. Коджаспиров, А.И. Рудской, В.В. Рыбин. – СПб.: Наука, 2006. – 350 с.
6. Саати, Т.Л. Аналитическое планирование. Организация систем / Т.Л. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
7. Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати,

К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 278 с.
8. Саати, Т.Л. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы решений / Т.Л. Саати. – М.: Мир, 1973. – 304 с.
9. Саати, Т.Л. Принятие при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т.Л. Саати. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.

M.M. Radkevich, D.Yu. Фомин

RATIONAL TEMERATURE MODE DEFINITION UNDER FORGING PROCESS

all: Peter the Great St.Petersburg State Polytechnic University, Russia

Abstract

Recommendations regard to choice of temperature mode under forgings are presented. Attempt to provide mathematical justification for choice of forging method are offered. Information regard to main parameters of the technological process of forging influencing economic efficiency of production components are shown.

Keywords: technological process, forging method, warm forging, preform, efficiency

REFERENCES

[1] Dahme, M. Forged Components / M. Dahme. – Germany: Egger, Landsberg am Lech, 2011. – 112 p.
[2] Dahme, M. Möglichkeiten und Grenzen der Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung. / M. Dahme, M. Hirschvogel // Werkstatt u. Betrieb. – 1991. – №124. – P.865-868.
[3] Radkevich, M.M. Technology of mechanical-thermal treatment - SPb.: Polytechnic University, 2011. - 263 p.
[4] Lange, K. Umformtechnik / K. Lange // Massivumformung. – 1988. – №2. – P.98-103.
[5] Kodzhaspirov, G. Physical principles and resource-saving technologies of manufacturing products under plastic deformation / G. Kodzhaspirov, A.I. rudskoy, V.V. Rybin. - SPb.: Nauka, 2006. - 350 p.
[6] Sahati, TL Analytical planning. Organization systems / Sahati, K. Cairns. - M: Radio and Svyaz, 1991. - 224 p.
[7] Sahati, T.L. Decision making. The method of analysis of hierarchies / Sahati, K. Cairns. - M: Radio and Svyaz, 1991. - 278 p.
[8] Sahati, T.L. Integer optimization methods and related extremal problems - M: Mir, 1973. - 304 p.
[9] Sahati, T.L. Decision making dependencies and feedbacks: Analytical network - M: LCG, 2008. - 360 p.

УДК. 621.737.79; DOI 10.1872/MMF-2016-109

Л.А. Ушомирская[1], И.С. Кузьмичев[2]

ФИНИШНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТОКОМ СМЕСИ ПАРОГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПОВЫШЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

[1]Людмила Алексеевна Ушомирская – д.т.н., профессор.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: ushla1936@yandex.ru

[2]Кузьмичев Иван Сергеевич – студент, магистр.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Россия, Санкт-Петербург.
E-mail: Xilming@mail.ru

Аннотация

Электролитно-плазменное полирование (ЭПП) позволяет значительно улучшить качество поверхностного слоя, заранее обработанного (механически) изделия, обеспечивая его финишную обработку. Проведенные исследования позволили определить рациональные режимы обработки и подобранны электролиты под несколько групп конструкционных токопроводящих материалов и сплавов. Также была спроектирована и изготовлена автоматизированная установка для ЭПП токопроводящих изделий в объеме электролита и комплект специальной оснастки для реализации струйного ЭПП. Функция оснастки сводится к обеспечению принудительной прокачки электролита через полости заготовки и внедрения в классическую систему «Анод-электролит-катод» дополнительных анодных токоподводов необходимых для инициации пароплазменной смеси ионизированных компонентов электролита по всей площади внутренних поверхностей обрабатываемого изделия.

Ключевые слова: электролит, плазма, полирование, качество поверхности, автоматизированная установка, принудительная прокачка, оснастка, обработка отверстий, смесь парогазовых компонентов, ионизация.

Введение

Неизменным условием совершенствования любой технологии является улучшение сильных сторон и исключение недостатков, что

справедливо и для технологий обработки материалов в контексте электрофизических и электрохимических методов.

Более совершенный метод, лишенный недостатков электрохимии связанных с использованием агрессивных щелочей и кислот, является метод ЭПП. Полирование металлов происходит в области напряжений 200-350В и плотности тока 0,2...0,8 А/см^2. При напряжении более 200В вокруг анода при переходе от пузырькового кипения к пленочному, у границ детали где плотность тока возрастает до значений, при которых электролит ионизируется по всей площади обрабатываемого изделия, образуется тонкая (50–100 мкм) пароплазменная оболочка (ППО). При этом напряженность электрического поля в ППО достигает 10^4 - 10^5 В/см [1].

Актуальность

Полирование данным методом позволяет получать качество поверхностного слоя до Ra 0,01 мкм, при этом время обработки детали (τ) занимает не более 5 минут. Помимо увеличения чистоты поверхности, происходит ряд других улучшений поверхностного слоя, которые усиливают коррозионную стойкость, также повышается отражающая способность поверхностей изделий, обработанных электролитной плазмой.

ЭПП может широко применяться в различных отраслях промышленности для полировки широкой номенклатуры изделий, в особенности для тонкостенных изделий сложной формы, ввиду отсутствия сил и свойства электролита, как любого вещества в жидком агрегатном состоянии, повторять форму емкости, в которую налиты, заполняя все полости. Возникающий в ППО комплекс химических и физических процессов, обеспечивает повышение класса чистоты поверхности на порядок превосходящие результат достигаемый классическими электрохимическими или абразивными методами.

Цели

1. Разработка установки для электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных поверхностей посредствам экструзии рабочей смеси внутрь полостей или отверстий обрабатываемых изделий, при обеспечении возможности управлять основными электрическими и гидравлическими параметрами, влияющими на качество обработки.
2. Разработка технологии обработки внутренних поверхностей потоком смеси парогазовых компонентов при повышенном напряжении.

Установка экструзионного электролитно-плазменного полирования (ЭЭПП-100, рис. 1.) должна обеспечивать:

а. гибкость и простоту переналадки для обеспечения возможности обработки деталей различной номенклатуры, изготовленных из разных токопроводящих материалов, таких как: низко- и высокоуглеродистые,

нержавеющие, режущие и специальные стали; медь, алюминий, титан и сплавы на их основе и т. д..

б. Поддержание температуры электролита в оптимальном диапазоне. Предусмотрено оборудование для нагрева/охлаждения/циркуляции электролита, измерительная аппаратура, система автоматического управления и регулирования.

в. Отвод испарений из зоны обработки посредствам вытяжной системы с гибким рукавом.

г. Надёжную фиксацию и автоматизированное возвратно-поступательное перемещение детали в диэлектрическом зажимном приспособлении.

д. Возможность применения специального оборудования для струйной обработки внутренних сложнопрофильных поверхностей. Для этого конструктивно предусмотрены места установки специальной оснастки.

е. Возможность отслеживания параметров потока и их регулирования, а также фильтрация электролита на выходе из зоны обработки посредством соответствующих элементов гидравлической системы, спроектированной таким образом, чтобы минимизировать воздействие факторов, приводящих к деградации электролита и обеспечить гибкость при выборе параметров потока рабочей среды в зоне обработки. [2].

а) б)

Рис. 1. Модули установки ЭЭПП-100.
а – установка полирования; б – источник питания.
1 – привод вертикального перемещения; 2 – обмотки 3-х фазного источника питания АПР; 3 – гидравлическая система; 4 – вентиляционная система

Установку ЭЭПП-100 можно условно разбить на четыре технологических модуля:

модуль 1 – обеспечивает необходимую кинематику возвратно-поступательного перемещения по вертикали фиксирующего механизма по средствам передачи винт-гайка. Гайкой является ведомый шкив, ходовой винт жестко завязан с двумя вертикальными направляющими. Ведущий шкив сидит на выходном валу планетарного редуктора с передаточным отношением 50. За привод вращения был выбран электродвигатель постоянного тока n = 1000-2000 об/мин при диапазоне напряжений U = 15 – 30 В.

Модуль 2 – источник питания модели АПР 401 У4 обеспечивает необходимую мощность для обработки крупногабаритных токопроводящих изделий. Возможность ступенчатого регулирования напряжения от 200В до 350В с шагом в 25В обеспечена монтажом дополнительных обмоток и переключателей. Для получения постоянного тока без пульсаций после диодного моста предусмотрена батарея конденсаторов. Это позволяет приблизиться к теоретической прямой линии уровня напряжения в цепи. Блок предохранителей зачищает силовую линию от незапланированных перегрузок.

Основополагающий электрический параметр, отличающий ЭПП от других видов электрохимических и электрофизических методов обработки, является величина плотности тока - $j = 0{,}2 - 0{,}8$ А/см^2, зависящая от состава и температуры электролита. Примем, что площадь обрабатываемой поверхности образца не превышает 350 см^2, $j = 0{,}4$ А/см^2, тогда сила тока I = 140А. Обеспечение напряжения происходит от трехфазного источника питания АПР 401, способного обеспечить обработку до 3 заготовок такой площади, так как рассчитан на силу тока I до 500А.

Модуль 3 – гидросистема, а именно – химический насос ХМ80-50-200КУ2, электролитный бак, полиуретановые армированные шланги, регуляторы расхода, кассетный фильтр, штуцера и разветвители, трубчатые электронагреватели (ТЭН), электролитная ванна, клапана, датчики расхода, температуры и давления. При реализации ЭПП в зоне обработки происходит изменение химического состава электролита и интенсивное выделение тепловой энергии. Система перемешивание рабочей жидкости посредством экструзии через сопла питателей решает эту проблему. Выбран химический насос, ХМ80-50-200КУ2 производительностью более 2 м^3/час, для осуществления многоканальной экструзии рабочей жидкости в рабочую ванну или специальную оснастку со скоростью потока $V_{\text{потока1}} = 0{,}2 - 1{,}5$ м^3/час на главном питателе и $V_{\text{потока2}} = 0{,}05 - 0{,}5$ м^3/час на дополнительных питателях, что позволяет полировать внутренние поверхности сложнопрофильных изделий. Разветвление основного канала на питатели позволяет вести обработку различными схемами полирования: в ванной и зонной

обработкой с применением специальной оснастки для деталей различных габаритов и форм-фактора. Гидросистема изготовлена с учетом всех особенностей ЭПП и позволяет работать с температурами Т до 100°С и давлением до трех атмосфер.

Модуль 4 – вентиляционная система. Гибкий рукав связан с изолирующим несущим колпаком, а воздушный насос ВКС 1/105-5 обеспечивает отвод интенсивных испарений рабочей жидкости в процессе работы установки [3].

Первым этапом разработки технологии обработки отверстий потоком смеси парогазовых компонентов стал эксперимент с использованием классической схемы обработки методом ЭПП в объеме электролита (рис. 2.).

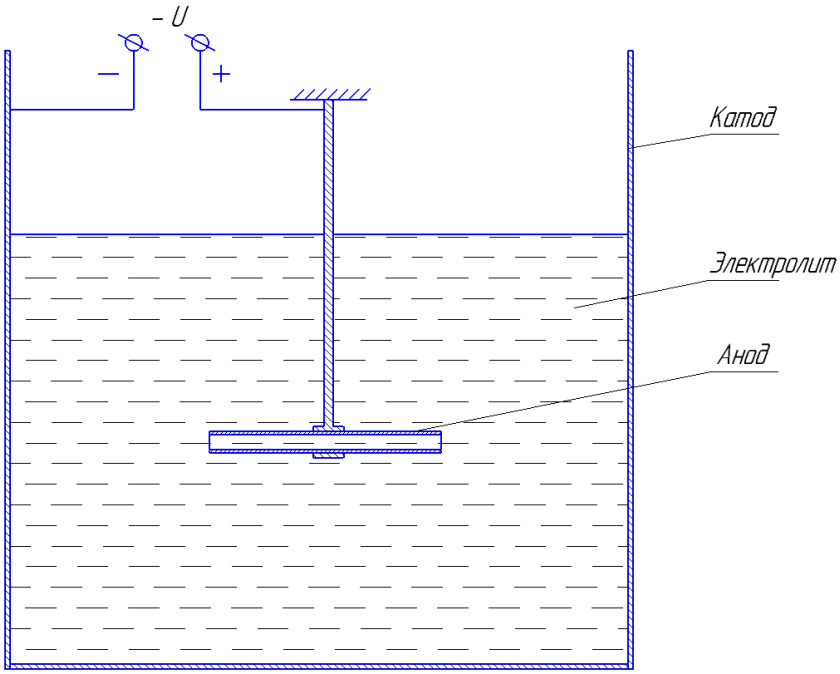


Рис. 2. Типовая схема ЭПП

Как и ожидалось обработка коцентрировалась на наружних поверхностях изделия. На внутренних поверхностях концов заготовки обработка тоже присутствовала, но эффект полирования значительно снижался по приближению к середине обрабатываемого канала. Получено, что у концов трубки шероховатость поверхности Ra = 0,02 мкм, а шероховатость отверстия в середине трубки Ra = 0,63 мкм что соответствует исходному значению.

Было предложено дополнить классическую схему ЭПП, системой принудительной прокачки электролита.

Проведенные эксперименты на установке ЭЭПП-100 показали, что классическая технология ЭПП, дополненная системой принудительной

прокачки электролита (рис. 3.), частично улучшила показатели обработки внутренних поверхностей, но не дала ожидаемого эффекта.

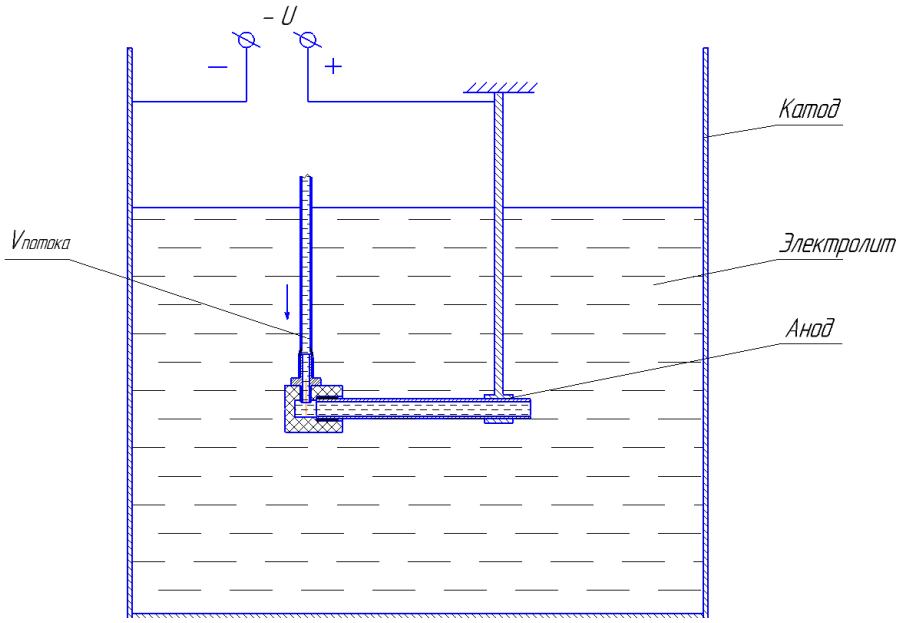


Рис. 3. Схема ЭПП с системой принудительной прокачки электролита (ЭЭПП)

Были получены значения параметра шероховатости Ra = 0,3 мкм в отверстии образца - медная труба, наружный диаметр D = 12 мм, внутренний диаметр d = 10 мм, длинна l = 150 мм, при исходной Ra = 0,63 мкм. При этом значение шероховатости является неравномерным по длине трубки: становится грубее от конца трубки, на котором монтируется насадок к середине образца, и достигает наименьшего значения Ra = 0,02 мкм по направлению к выходу канала.

Данный факт обусловлен природой электрического тока, который движется в направлении наименьшего сопротивления. Из-за недостаточной напряженности электрического поля в удаленных местах обрабатываемого изделия электролит не переходит в стадию кипения, что делает невозможным образование ППО.

Изученные особенности образования ППО, непосредственно необходимой для протекания процесса ЭПП, позволили определить закономерности ее образования. Как известно, существует два типа кипения жидкости: пузырьковое и пленочное. Для того чтобы в процессе ЭПП происходило снижение шероховатости путем съема микровыступов с поверхности детали, на аноде должен поддерживаться пленочный тип кипения электролита. В процессе кипения гидратированные молекулы участвуют в обмене с молекулами паровой фазы, что способствует переносу отдельных ионов раствора в оболочку [4].

Под паровой пленкой в данном случае понимается смесь жидкого и парообразного электролита, ионов и электронов растворенных веществ в

электролите, анионов металлической детали, а также присутствие пузырьков с газом. Только при достаточном напряжении поверхность анода приобретает явно выраженный отрицательный заряд, обусловленный повышенной концентрацией анионов в прилегающем к заготовке слое электролита, вследствие чего этот тонкий слой ионизируется под действием высокой локальной напряженности поля, между положительно заряженной поверхность анода и отрицательно заряженным катодом. Таким образом у поверхности анода образуется высокотемпературная плазма, которая является своего рода инструментом метода ЭПП [5].

Соответственно на удаленных от места подключения участках заготовки возникают условия, препятствующие образованию ППО. В основном это следствие недостаточной для кипения и последующей ионизации, компонентов электролита, напряженности электрического поля.

Было предложено использование дополнительных анодных токоподводов, в местах, где напряженность электрического поля снижена по причинам возникающего гальванического экрана, образованного самими стенками обрабатываемого изделия и поверхностями элементов оснастки, а также дополнительного катода-штуцера (рис. 4.). Данные элементы оснастки облегчают инициацию ППО по всей площади внутренних поверхностей изделия, посредством обеспечения достаточной напряженности электрического поля в удаленных местах зоны обработки. Поддержание определенной скорости прокачки электролита в канале обрабатываемой заготовки для реализации непрерывного процесса создания и обновления смеси парогазовых ионизированных компонентов электролита, обеспечивает постоянство выходных параметров.

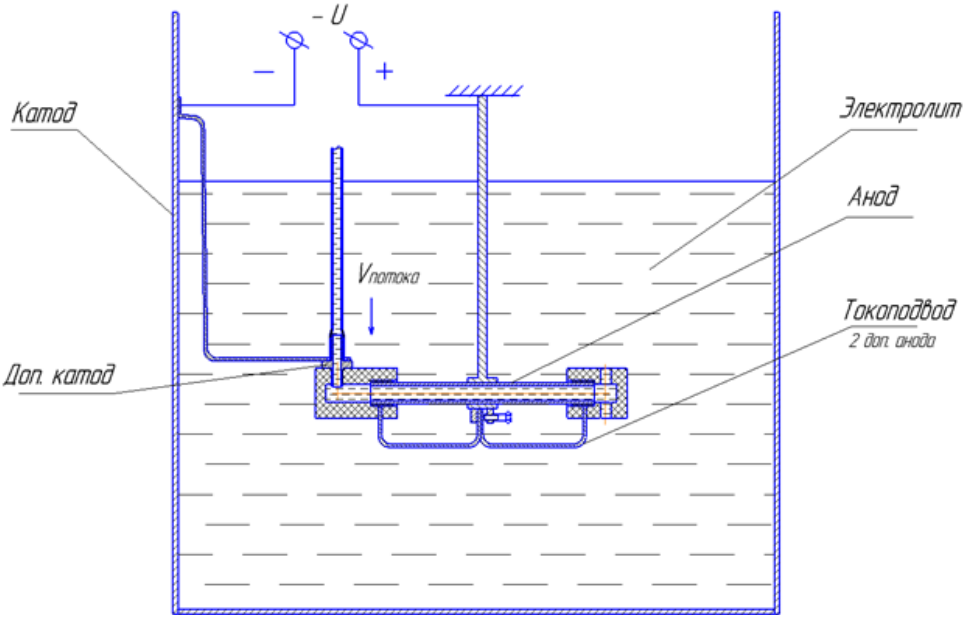


Рис. 4. Схема ЭЭПП с анодными токоподводами и дополнительным катодом

Таким образом, была разработана технология обработки цилиндрических отверстий потоком смеси парогазовых компонентов при повышенном напряжении, найдены основные закономерности для обеспечения постоянства выходных характеристик. При обработке меди и сплавов на ее основе получаемое качество поверхностного слоя Ra находятся в пределах 0,06 – 0,12 мкм, а также отработаны оптимальные режимы обработки: U = 275 – 300В, $V_{\text{потока}} = 0{,}1 - 0{,}4$ м^3/час для отверстий d = 10 – 16 мм; T = 75 – 90°C; τ = 1 – 5 мин.

Выводы

1. Спроектирована и изготовлена автоматизированная, гибкая установка ЭЭПП-100 и комплект специальной оснастки, позволяющие осуществлять обработку наружных и внутренних сложнопрофильных поверхностей. Позволяет вести регулировку основных параметров в следующих пределах: U = 200 – 350В; мощность N до 120 кВт; подача S = 2 – 4 м/мин; $V_{\text{потока}} = 0{,}2 - 1{,}5$ м^3/час на главном питателе; T = 40 – 95°C; τ = 1 – 5 мин.
2. Разработана технология обработки цилиндрических отверстий потоком смеси парогазовых компонентов при повышенном напряжении, найдены основные закономерности для реализации ЭПП при обработке отверстий и обеспечено постоянство выходных характеристик. При обработке меди и сплавов на ее основе получаемое качество поверхностного слоя Ra находятся в пределах 0,06 – 0,12 мкм, а также отработаны оптимальные режимы обработки при реализации данной схемы полирования отверстий: U = 275 – 300В, $V_{\text{потока}} = 0{,}1 - 0{,}4$ м^3/час для отверстий d = 10 – 16 мм; T = 75 – 90°C; τ = 1 – 5 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волнко А.П. Некоторые особенности технологии ЭПП аустенитой нержавеющей стали.
2. Электротехнологии: лаб. практикум/ А.Г. Алексеев, А.В. Виноградов, М.Т. Коротких, С.В. Кюбарсэл, Л.А. Ушомирская; Научная редакция Л.А. Ушомирская и М.А. Шатерин. СПб.; изд-во СПБГТУ, 2000 – 76с.
3. Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. УДК. 621.525. Разработка установки ЭЭПП-100 для экструзионного электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных внутренних поверхностей.
4. Грилихес С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов /под ред. П. М. Вячеславова. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.
5. Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). Томск: ТПУ, 2003. 244 с.

L.A. Ushomirskaya, I.S. Kuzmichev

INNER SURFACE FINISHING USING THE FLOW OF VAPOR-GAS MIXTURE WITH BOOSTED VOLTAGE

all: St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Electrolyte-plasma polishing (EPP) can significantly improve the quality of premachined surface layer as the finishing method. Conducted research lead to determining rational processing modes and finding electrolytes for several groups of conductive materials and alloys. Also automated EPP apparatus for conductive details was designed along with set of special equipment for EPP. The function of this equipment is to force the flow of electrolyte through the billet and inject additional anodic conductors into classical "anode-electrolyte-cathode" system for initializing steam-plasma mixture of ionized electrolyte components all over the inner surface of machined product.

Key words: electrolyte, plasma, polishing, surface quality, automated apparatus, forced flow, equipment, hole processing, vapor-gas mixture, ionization.

REFERENCES

[1] Volenko A.P Some features of technology EPP austenite stainless steel (rus.)

[2] Electotechnology: lab. workshop / A.G. Alekseev, A.V. Vinogradov, M.T. Korotkih, S.V. Qbarsel, L.A. Ushomirskaya; Science redaction L.A. Ushomirskaya and M.A. Shaterin. SPb.; SPbGTU publishing house, 2000 – 76p. (rus.)

[3] Science week SPbPU: proceedings of the scientific forum with international participation. Institute of metallurgy mechanical engineering and transport. Part 1. SPb.: polytechnical University publishing house, 2015. UDC. 621.525. The development apparatus EEPP-100 for extrusion of electrolytic-plasma for polishing inner and external surfaces. (rus.)

[4] Griliches S.Ya. Degreasing, etching and polishing of metals / edited by P.M. Vyacheslavova. L.: Mechanical engineering, 1983. 101p. (rus.)

[5] Vorobev G.A., Poholkov U.P., Korolev U.D., Merkulov V.I. Physics of dielectrics (area of strong fields). Tomsk: TPU, 2003. 244p. (rus.)

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕТЕВОЙ МАГИСТЕРСКОЙ ПРОГРАММЫ В РАМКАХ ПРОЕКТА «ТЕМПУС»

УДК 37.378; DOI 10.1872/MMF-2016-110

Ж.С. Абдыкеров[1], О.М. Замятина[2], А.И.Мозгалева[3], Ю.В.Папина[4]

ВНЕДРЕНИЕ ИГРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОГРАММУ МАГИСТЕРСКОЙ ПОДГОТОВКИ В РАМКАХ ПРОЕКТА «ТЕМПУС» В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

[1]Абдыкеров Жанат Сергеевич, студент Томского политехнического университета, лаборант ТОИПКРО
Россия, Томск
E-mail: zhanatab@mail.ru

[2]Замятина Оксана Михайловна, канд. техн. наук, доцент кафедры оптимизации систем управления Томского политехнического университета, ректор ТОИПКРО
Россия, Томск
E-mail: zamyatina@tpu.ru

[3]Мозгалева Алена Игоревна, студент Томского политехнического университета
Россия, Томск
E-mail: mozgaleva.alena@mail.ru

[4]Папина Юлия Владимировна, студент Томского политехнического университета
Россия, Томск
E-mail: Papinayuliya@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены игровые технологии как инструмент повышения мотивации студентов и качества преподавания дисциплин в рамках магистерских программ проектов TEMPUS ACES и SUCCESS.

В теоретической части работы показаны основные механизмы игры как инструмента образовательного процесса, с подробным описанием составляющих и связующих звеньев.

Практическая часть работы представляет собой разработанный игровой компонент (далее игра), который планируется использовать при проведении мониторинга и оценке компетенций студентов, согласно требованиям ФГОС в рамках проекта TEMPUS. Выявлено, что данные методы наиболее полезны для решения проблем мотивации к обучению и на этапе мониторинга уровня овладения студентами компетенциями, требуемыми в том числе российскими ФГОС.

В качестве результата планируется внедрение игровых методов, а также частичная геймификация процесса обучения. Ожидается, что данные

технологии смогут быть эффективно использованы в программе подготовки магистров.

Ключевые слова: геймификация образовательного процесса, игровые компоненты, компетенции, магистерская программа TEMPUS.

Введение

С 2013 года в России официально введено трехуровневое образование, состоящие из уровней: бакалавриат, магистратура, аспирантура. В основу программ бакалавриата легли уже существующие программы специалитета. А при формировании программ магистратуры и аспирантуры возникла необходимость разработки новых образовательных компонентов.

Другим нововведением, требующим разработки новых образовательных форматов, стало внедрение компетентностно-ориентированного подхода, который официально введен в стандарты высшего образования с принятием ФГОС третьего поколения [2, 3, 4, 5], на основании Болонского соглашения, к которому присоединилась Россия. Данная методика предполагает работу по подбору учебной программы в соответствии с требуемыми профессиональными и общекультурными компетенциями, которыми должен обладать выпускник. Базовый набор компетенций будущего выпускника должен быть назначен в соответствии с требованиями предприятий-работодателей и принят к исполнению во всех вузах, ведущих подготовку по разрабатываемому направлению.

В работе [6,] выделяют следующую проблему, связанную с разработкой магистерских программ, – ориентация на имеющиеся ресурсы, в большей части человеческие и материальные, а не на запросы рынка труда. В этом случае ВУЗ при создании новой программы (или модернизации уже имеющейся) формирует учебный план из имеющихся курсов и обеспечивающих их преподавателей, что негативно сказывается на его конкурентоспособности на рынке образовательных услуг.

В таких условиях наиболее актуальны программы, сочетающие в себе результаты тесного сотрудничества между ВУЗами, работодателями и студентами и направленные на подготовку кадров, соответствующих требованиям современных стандартов. Одним из таких проектов являются магистерские программы проектов TEMPUS ACES и SUCCESS.

Проект TEMPUS ACES посвящен разработке магистерской программы в сфере прикладных вычислений в науке и технике, соответствующей принципам Болонского процесса, и внедрение ее во всех ВУЗах партнерах (ВУЗы из России и Белоруссии). В настоящее время в Томском политехническом университете в рамках проекта TEMPUS ACES реализуется программа подготовки магистров по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и информатика»[7].

Проект TEMPUS SUCCESS направлен на разработку сетевой магистерской программы в области обеспечения эффективности технологиче-

ских процессов жизненного цикла изделия и внедрение ее во всех ВУЗах партнерах. В ТПУ в качестве направления подготовки для данной программы было выбрано 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» [7].

В разработке обеих программ участвуют представители высших учебных заведений таких стран, как Австрия, Финляндия, Португалия, Германия и др. Помимо этого в проекте задействованы российские и иностранные предприятия-работодатели. Проект направлен на расширение списка программ дополнительной профессиональной подготовки специалистов промышленных предприятий, преподавателей и студентов ВУЗов; модернизацию оборудования, задействованного в учебном процессе; стажировки и обмен опытом с представителями российских и европейских университетов.

Для разработки списка компетенций, которыми должен обладать выпускник магистерских программ проектов TEMPUS ACES и SUCCESS было проведено анкетирование заинтересованных стейкхолдеров: выпускников, работодателей, студентов и преподавателей [3,9,12]. В результате опроса всех групп участников данного исследования были определены наиболее востребованные общепрофессиональные, общекультурные и профессиональные компетенции [11]. Результаты опроса показали, что важнейшими компетенциями выпускников, по мнению стейкхолдеров такими являются:

- способность использовать и применять углубленные знания в области прикладной математики и информатики [6,18];
- способность разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых задач проектной и производственно-технологической деятельности [6,13].

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к разработке новых компонентов образовательных программ магистратуры TEMPUS, в учебный процесс необходимо ввести новые образовательные методы и форматы. Так система обучения в виде лекций и практических занятий весьма эффективно способствует пониманию материала курса, развитию способности применить знания в учебной дисциплине и учебной среде. Однако, знания, полученные в учебных аудиториях необходимо применять на практике, а значит, в курсе должны присутствовать занятия, направленные и на формирование компетенций [8,10,19,20]. При этом необходимо учитывать ряд факторов и особенностей проекта TEMPUS, таких как:

- сетевое обучение;
- взаимодополняемость или взаимозаменяемость программ обучения в университетах-партнерах;
- компетентностно-ориентированный подход, с учетом требований компаний работодателей.

Таким образом, можно выявить проблему поиска, разработки и внедрения в образовательный процесс новых технологий и методов обучения.

На сегодняшний день достаточно эффективными являются активные формы обучения [15,16,17]. Одной из возможных активных форм обучения для внедрения в программу магистратуры является разработка и проведение игр в образовательном процессе, то есть геймификация дисциплин [1,14].

Целью данной работы является разработка и представление результатов внедрения игры в рамках дисциплин магистерских программ проектов TEMPUS ACES и SUCCESS по направлениям «Прикладная математика и информатика» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Игра, как инструмент формирования инженерно-технических компетенций

Культурные корни игры лежать глубоко в истории. Задаваясь вопросом «Что есть игра?», невозможно определять игру безотносительно человека. Первостепенная задача понимания сути игры - различение человека и игры. Для решения этой задачи нужно дать ответ на вопрос: что появилось раньше игра или человек?

Первостепенно на ум приходит – человек. Однако, умение играть присуще не только человеку, но и животному. Уже в самых простейших формах поведения животных, можно различить некоторые признаки игры:

- соблюдается определенный ритуал поз и движений, дающий понять другой особи, что сейчас будет игра;
- соблюдаются правила (например, животные во время игры не прокусывают друг другу уши, не наносят травм, при этом имитируя крайнюю степень озлобленности и получая искреннее удовольствие).

Исходя из рассуждений, можно сделать вывод, что игра может существовать без вмешательства человекf в виде определенной деятельности, согласно некоторым ритуалам. Следовательно, первый признак игры – это деятельность, подчиняющаяся определенным правилам.

Игра, как процесс, имеет два ограничивающих признака. Первый - ограничение временем. У любой игры есть начало, а значит, есть и конец, а бесконечных игр не существует. Игрок всегда понимает, когда игра началась и когда закончилась, даже если это явно не отслеживается.

Второй ограничивающий признак - это ограничение пространством. Любая игра разворачивается в определенном игровом поле. В шахматах это - шахматная доска, в компьютерной игре - виртуальное пространство, созданное разработчиком, в футболе – футбольное поле и т.д. Покидая пространство игры, игрок покидает и саму игру.

Таким образом, игра – это деятельность, подчиняющаяся определенным правилам, ограниченная временем и пространством.

Тем не менее, под данное определение попадает почти любая деятель-

ность человека, включая даже ту, которая игрой быть не может. Следуя данной логике, даже рутинная деятельность, например, поездка на автобусе, поход в ресторан, любая работа, превращается в игру. Следовательно, данное определение неверно или неполно.

Уточнить определение поможет следующий вопрос: «Можно ли заставить человека играть?». Ответ – нет. Человека нельзя заставить играть, при этом заставив получать удовольствие от процесса, нельзя заставить чувствовать игровое напряжение, азарт, желание победить в борьбе, или желание что-либо продемонстрировать. Можно лишь заставить следовать правилам и выполнять определенные действия, но в этом случае игрой данная деятельность являться не будет. Эффективность от такого процесса, при котором участник не получает удовлетворение от выполненной работы стремится к нулю.

Исходя из вышесказанного, можно построить определение игры и игрового процесса. Игра – вид свободной деятельности, подчиняющей определенным правилам, ограниченный временем и пространством.

Для внедрения игры в образовательный контент, необходимо определить задачи использования игры в данном процессе. Исходя из поставленной цели исследования, можно выделить три основные задачи внедрения игровых компонент в образовательный процесс:

1. Формирование необходимых компетенций.
2. Развитие и возможность применения компетенций.
3. Проверка имеющихся компетенций.

Другими словами, в данной сфере игра используется как методология или технология достижения вышеуказанных целей. Для этого необходимо вникнуть в ее структуру, и распределить, какой механизм отвечает за достижение той или иной цели.

Составляющие игры:

1. Правила – структурообразующий элемент игры. Правила определяют рамки и границы игры. Игру без правил создать невозможно.
2. Игровая механика – способ взаимодействия человека и игры, то есть механизм, через который человек взаимодействует с игрой. Количество видов игровой механики не велико, в сравнении, например, с видами игровых действий. Следовательно, существуют игры, имеющие одинаковую игровую механику. Например, шахматы и шашки, где способ взаимодействия игрока и игры одинаковый - передвижение фигурок по игровому полю, но игры разные. Или крестики-нолики и, например, такие настольные игры как «Quarto» и «Корова 006», или пасьянс. Механика у всех игр одна - сбор определенной последовательности признаков, а игры абсолютно разные.
3. Игровые процедуры – набор действия, которые игрок может совершать в рамках одной игры. Все действия укладываются в рамки выбранной игровой механики. Они всегда строго ограничены и понят-

ны. Действия, не входящие в этот набор, будут нарушением правил, за редким исключением.

4. Игровые ресурсы – объекты, помогающие игроку пройти игру. Ресурсы всегда ограничены. В зависимости от игры ресурсами могут выступать абсолютно разные вещи: от фигурок, до времени и знаний.
5. Конфликт. Создание ситуации конфликта или борьбы является одним из самых мотивирующих факторов продолжать игру. Если говорить об играх в целом, то все они преследуют всего две цели, это борьба за что-то или демонстрация чего-либо. Соответственно, важно выстроить правила, процедуры и ресурсы игры таким образом, чтобы была создана ситуация конфликта.
6. Ситуация неясности результата. Неинтересно играть в игры с предсказуемым результатом. И если ситуация конфликта является мотиватором для продолжения игры, то неясность результата является мотивом для того, чтобы вступить в игровой процесс. Это одна из главных задач для создания игры – выстраивание игрового баланса, где каждый участник игры имеет шансы на победу [1].

Существует ряд структурных элементов, позволяющих привлечь игроков и обеспечить их более глубокую вовлеченность, но они не так важны в общем контексте ведения образовательного процесса, так как требуют намного больше времени и усилий при разработке игрового элемента.

Рассмотрим вышесказанное, на примере разбора структуры игры и ее влияния на формирование, развитие или проверку заданных компетенций.

Игровой компонент программы «TeslaBOOM@Tomsk»

В процессе работы над проектом, был разработан и проведен игровой чемпионат TeslaBOOM@Tomsk.

В ходе эксперимента группа учащихся магистратуры в количестве 15 человек была поделена на команды по 5 человек. Студентам назначена дата начала и окончания игры – вводное и зачётное занятие, соответственно.

Цели игры:

1. Структуризация имеющиеся знаний по предмету, построение связи между теорией и воплощением ее на практике, развитие способности применять имеющиеся знания на практике.

2. Мотивация участников к самостоятельному изучению учебных материалов дисциплины.

3. Создание условий повышенной конкуренции, мотивация к посещению практических и лабораторных занятий.

Правила игры:

В игре могут принять участие X команд по 5 человек в каждой.

Перед участниками стоит задача построить и развить собственный город с использованием достижений научно-технического прогресса, которые можно получить, выполняя определенные задания различных этапов игры.

Количество этапов зависит от количества команд. Основной идеей игры является связь между изученными явлениями, законами, теориями с конкретными элементами инфраструктуры города.

На каждом этапе участникам выдается задание, после выполнения которого участники получают наклейки с изображением объекта современного мира, соответствующего той или иной теме практики или лабораторной работы; либо наклейки с изображением «ресурсов», за которые можно приобрести элемент инфраструктуры или улучшить имеющуюся инфраструктуру.

Наклейки инфраструктуры каждая из команд должна наклеить на поле, выданное командам перед началом игры на этапе подготовки.

Все элементы инфраструктуры разделены на три уровня:

- 1-ый – лучший, за который команда получает 3 балла,
- 2-ой – средний, за который команда получает 2 балла,
- 3-й – худший, за который команда получает 1 балл.

Таким образом, имеется 3 вида ресурсов и 7 видов инфраструктур. Обмен ресурсов на инфраструктуры происходит в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. Карта примера обмена ресурсов и инфраструктур в игре TeslaBOOM@Tomsk

ИНФРАСТРУКТУРА	**ВИДЫ**		
«ЗДАНИЯ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	«Высотка»	«Хрущевка»	«Хижина»
	3 руда 3 пластик 1 дерево Хрущевка + 1 руда + 1 пластик Хижина + 2 руда и 2 пластик	2 руда 1 пластик 1 дерево Хижина + 1 руда + 1 пластик	1 дерево 1 руда
«МОСТЫ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	Подвесной	Опорный	Деревянный
	3 руда 3 пластик 2 дерево Опорный мост + 1 руда Деревянный мост + 2 руда + 1 пластик + 2 дерево	2 руда 2 пластик Деревянный мост + 1 руда + 2 пластик	1 дерево 1 руда
«АВТОМОБИЛИ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	«Современное авто»	«Авто из 19 века»	«Телега»
	3 руда 3 пластик 1 дерево Авто из 19 века + 1 руда и 2 пластик Телега + 3 руда	2 руда 1 пластика Телега + 2 руда	2 дерево
«ПОЕЗДА»	Скоростной поезд	Поезд	Паровоз

НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	3 руда 3 пластик Поезд + 1 руда и 2 пластик Паровоз + 2 руда + 2 пластик	3 руда 1 пластик Паровоз + 1 руда и 1 пластик	2 руда
«ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	Солнечные батареи	АЭС	ТЭС
	3 руда 3 пластик АЭС + 2 дерево + 1 пластик ТЭС + 2 руда + 2 пластик	2 руда 2 пластик ТЭС + 1 пластик, 1 руда + 2 дерево	1 руда 1 пластик 1 дерево
«ГОРОДСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	Светодиод	Фонарный столб	Факел
	3 руды 3 пластика Фонарный столб + 1 руда + 2 пластика и 1 дерево. Факел + 3 руды + 1 пластик.	2 руды 1 пластик 2 дерева Факел + 1 руда + 1 дерево + 1 пластик.	1 дерева 1 руда
«ФОТОАППАРАТ» НЕОБХОДИМЫЕ РЕСУРСЫ, ЕД.	Современный	Начала 20-го века	Начала 19-го века
	3 пластика 3 руды Начало 20-го века + 2 руды, 2 пластика. Начала 19-го века + 2 дерева + 3 пластика + 1 руда	3 пластика 2 руды 1 дерево Начала 19-го века + 2 руды и 2 дерево	1 руда 2 пластика

Обмен ресурсами происходит после прохождения всех этапов, на моменте общего сбора и подведения итогов.

Каждый этап носит имя одной из инфраструктур и связан с какой-либо областью, соответствующей изученному на занятии материалу. Каждый из этапов представляет собой лабораторное или практическое занятие, в процессе которого студенты выполняют поставленные задачи и получают ресурсы или карточки инфраструктуры. Желательно простроить занятие так, чтобы дать максимальное количество практической работы, т.е. проводить в лабораториях ВУЗов с соответствующим оборудованием.

У каждой команды есть маршрутный лист, проходя который, участники, выполняют задания, строят собственный уникальный город. Победитель игры определяется по уровню современности города, т.е. по развитости инфраструктур.

Основная задача участников в этой игре – построить наиболее развитый город, при этом студенты должны проявить и/или развить компетенции, обозначенные в требованиях к данному курсу.

Подобного рода игры возможно применять в различных областях инженерного обучения и различных дисциплинах. Задания игры напрямую зависят от выбранного предмета/дисциплины и тематики изучаемого мо-

дуля. В данном примере показан элементарный уровень, который можно дополнить более узкими профессиональными элементами в зависимости от выбранного предмета обучения. Так, например, используя в содержании этапов практические и лабораторные занятия, связанные с процессами, аппаратами и оборудованием, применяемым в машиностроительной сфере, можно строить не город, а какое-либо производство. При этом студентов легко «погрузить» в наиболее близкий к реальному процесс, что позволит развить и, в последующем, проверить и проанализировать уровень овладения компетенциями, заданными программой курса.

Заключение

В заключение следует отметить, что данная разработка в Томском политехническом университете уже была апробирована на студентах и школьниках. Результаты данного чемпионата позволили проанализировать эффективность игровых методов в процессе обучения студентов и школьников. Полученные результаты можно свести к следующим выводам:

1. Геймификация образовательного процесса повышает мотивацию студента к посещению занятий, активной работе и выполнению дополнительных заданий. При этом вовлеченность студента в учебный процесс естественная и вызвана здоровым чувством конкуренции.
2. Игра служит хорошим инструментом для оценки деятельности студента, причем как для оценки работы на определенном занятии, так и для итоговой оценки курса.
3. Внедрение игровых технологий требует от преподавателя более тщательной обработки информации для проведения занятий, создает необходимость разнообразить практики и лабораторные работы.
4. Результаты игры, а также мониторинг самого процесса являются корректными маркерами для оценки компетенций студентов, заданных программой курса.
5. Помимо компетенций, заданных программой, игра позволяет развить и оценить общекультурные компетенции студента. Например, лидерство, умение принятия решения и работы в команде.

Ожидается также, что внедрение подобных технологий при сетевом обучении в университете-партнере проектов ТЕМПУС поможет облегчить адаптационный период, создаст возможность легко приобщиться к обучению в иной академической и культурной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайленко Т. М. Игровые технологии как вид педагогических технологий / Педагогика: традиции и инновации: материалы междунар. науч. конф. Т. I. – Челябинск: Два комсомольца, 2011. – С. 140-146.
2. Замятина О.М., Гончарук Ю.О., Мозгалева П.И. Проведение оценки компетенций студентов с применением интернет-технологий // Образовательные технологии. 2013. № 4. С. 79-83.

3. Замятина О. М., Мозгалева П. И. Усовершенствование программы элитной технической подготовки: компетентностно-ориентированый подход // Инновации в образовании. 2013. № 10. С. 36-45 .
4. Гончарук Ю. О., Мозгалева П. И., Замятина О. М. Создание базы данных компетенций в рамках разработки интернет-приложения для организации проектной деятельности ТПУ // Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых: сборник докладов IV Всероссийской конференции студентов Элитного технического образования. 2013. С. 116-119.
5. Замятина О.М., Кобызь Г.В. Разработка алгоритмов оценки и повышения уровня компетенций студентов // Успехи современного естествознания. 2015. № 3. С. 181-189.
6. Стародубцева Д. В., Замятина О. М., Гончарук Ю. О. Проектирование и разработка образовательных программ магистерской подготовки в области информационных технологий и машиностроения (на примерах программ «Прикладная математика и информатика» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в рамках проектов TEMPUS SUCCESS и ACES) // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 15. – С. 41–45. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95150.htm.
7. Самсонова Е.С., Замятина О.М., Рыбушкина С.В. Участие университета в зарубежных грантовых программах и фондах // Совет ректоров. 2011. № 12. С. 68-71.
8. Черкасов М.Н. Инновационные методы обучения студентов / «Инновации в науке»: материалы XIV Международной заочной научно-практической конференции под ред. Я. А. Полонского. 2012.
9. Zamyatina O.M., Solodovnikova O.M, Denchuk D. Formation and Analysis of Competencies in Elite Engineering Specialists. // Proceedings of the 17 International Conference ICL2013, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. 2013.
10. Замятина О. М., Мозгалева П. И., Солодовникова О. М., Гончарук Ю. О. Современные методы педагогики для вовлечения и стимулирования научно-технического творчества детей и молодежи // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 15. – С. 31–35. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95148.htm.
11. Zamyatina O. M., Mozgaleva P. I., IT Implementation in the Educational Process of Future Engineers by Means of the Project Activities and Competences Assessment // IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2013): proceedings, Berlin, March 13-15, 2013. - Berlin: C. Hanser, 2013 - p. 1170-1176.
12. Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M. Competence Component of the Project-Oriented Training of Elite Engineering Specialists// IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2014): proceedings, Istanbul, April 3-5, 2014. – New York: IEEE, 2014 - p. 114-118.
13. Gulyaeva K.V., Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M. Development of Information System for Students' Project Activity Management // IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2014): proceedings, Istanbul, April 3-5, 2014. – New York: IEEE, 2014 - p. 824-831.
14. Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. and Zamyatina O.M. The Project Fair: The

Gamification Experience of Students' Project Activity // The 8th European Conference on Games Based Learning ECGBL 2014: proceedings, Berlin, October 9-10, 2014. Vol. 1. P. 423-429.
15. Zamyatina O.M., Yurutkina T.Y., Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. Implementation of Games in Mathematics and Physics Modules // The 8th European Conference on Games Based Learning ECGBL 2014: proceedings, Berlin, October 9-10, 2014. Vol. 2. P. 652-661.
16. Zamyatina O.M., Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. Elite engineering education programme development based on CDIO standarts // 18 International Conference Interactive Collaborative Learning (ICL-2014): proceedings, Dubai, 3-6 December, 2014. P.919-923.
17. Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M., K.V. Gulyaeva Database design of information system for students' project activity managemen // 18 International Conference Interactive Collaborative Learning (ICL-2014): proceedings, Dubai, 3-6 December, 2014. P. 886-890.
18. Замятина О.М., Мозгалева П.И., Гончарук Ю.О. Игровые технологии в преподавании дисциплины «Математическое моделирование» // Научно-методический электронный журнал "Концепт". 2015. Т. 15. С. 36-40. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95149.htm.
19. Замятина О. М., Мозгалева П. И., Юруткина Т. Ю. Применение игровых технологий в модулях «физика» и «математика» // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 15. – С. 46–50. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95151.htm.
20. Замятина О. М., Абдыкеров Ж. С. Формирование и оценка компетенций обучающихся путем геймификации образовательного процесса // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 15. – С. 26–30. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95147.htm.

J.S. Abdykerov[1,2], O.M. Zamyatina[1,2], A.I.Mozgaleva[1], Yu.V.Papina[1]

INTRODUCTION OF GAMING TECHNOLOGY IN A TEMPUS MASTER`S PROGRAMS IN TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

[1] Tomsk Polytechnical University, Russia
[2] Tomsk Regional Teachers Professional Re-training Institute, Russia

Abstract

The paper deals with the development of game technologies as an instrument to increase students' motivation and the quality of teaching of disciplines within the master's programs and projects TEMPUS ACES SUCCESS.

The theoretical part of the work includes the basic mechanisms of the game are shown as a tool of the educational process, with a detailed description of the components and connecting links.

The practical part of the work is developed by the gaming component (the game), which is planned to be used in monitoring and evaluation of students' competencies, according to the requirements of the National Education Stand-

ards in the framework of TEMPUS project. It was revealed that these methods are the most useful for solving the problems of motivation to studying process and at the stage of monitoring the level of competencies students required including Russian National Education Standards.

As a result it is planned to introduce gaming techniques and gamification to the certain learning processes. It is expected that these technologies can be used effectively in the Master's program.

Key words: gamification of educational processes, game components, competences, Master's program TEMPUS, active learning methods

REFERENCES

[1] Mikhaylenko T.M. Gaming technologies as a kind of educational methods / Education: Tradition and Innovation: Proceedings of the international. scientific. Conf. T. I. - Chelyabinsk: Two Komsomolets, 2011. - P. 140-146.

[2] Zamyatina O.M., Goncharuk J.O., Mozgaleva P.I. Assessment of student competencies using Internet technologies // Educational technologies. 2013. № 4. P. 79-83.

[3] Zamyatina O.M., Mozgaleva P.I. Improvement of the elite technical training programs: the competence-based approach // of Innovation in education. 2013. № 10. P. 36-45.

[4] Goncharuk O.Y., Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M. Creating a database of competencies in the development of Internet applications for the organization of project activities TPU // Resource-efficient technologies - the energy and enthusiasm of the young: a collection of the IV All-Russian Conference of Students Elite technical education.. 2013. P. 116-119.

[5] Zamyatina O.M., Kobyz G.V. Development of algorithms for evaluation and improvement of students' competencies // Successes of modern science. 2015. № 3. P. 181-189.

[6] Starodubtseva D.V., Zamyatina of O.M., Goncharuk Y.O. Design and development of educational master's programs in the Information Technology and Engineering (in courses "Applied Mathematics and Computer Science" and "Design and technological support of machine-building production" in the framework of TEMPUS SUCCESS ACES projects) // Scientifically-methodical electronic magazine "Concept". - 2015. - T. 15. - P. 41-45. - URL: http://e - koncept.ru/2015/95150.htm.

[7] Samsonova E.S., Zamyatina of O.M., Rybushkina S.V. The participation of the university in international grant programs and funds // Council of Rectors.. 2011. № 12. P. 68-71.

[8] Cherkasov MN Innovative methods of teaching students / "Innovations in Science": materials of the XIV International correspondence scientific-practical conference, ed. YA Polonsky. 2012.

[9] Zamyatina O.M., Solodovnikova O.M., Denchuk D. (2013). Formation and Analysis of Competencies in Elite Engineering Specialists. // Proceedings of the 17 International Conference ICL2013, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, September 27 – 29, 2013.

[10] Zamyatina O.M., Mozgaleva P.I., Solodovnikova O.M., Goncharuk Y.O. The modern methods of pedagogics for involving and stimulation of scientific and technical work of children and young people // Scientifically-methodical electronic magazine "Концепт". - 2015. - Т. 15. - P. 31-35. - URL: http://e - koncept.ru/2015/95148.htm.
[11] Zamyatina O. M., Mozgaleva P. I., IT Implementation in the Educational Process of Future Engineers by Means of the Project Activities and Competences Assessment // IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2013): proceedings, Berlin, March 13-15, 2013. - Berlin: C. Hanser, 2013 - p. 1170-1176.
[12] Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M. Competence Component of the Project-Oriented Training of Elite Engineering Specialists// IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2014): proceedings, Istanbul, April 3-5, 2014. – New York: IEEE, 2014 - p. 114-118.
[13] Gulyaeva K.V., Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M. Development of Information System for Students' Project Activity Management // IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON -2014): proceedings, Istanbul, April 3-5, 2014. – New York: IEEE, 2014 - p. 824-831.
[14] Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. and Zamyatina O.M. The Project Fair: The Gamification Experience of Students' Project Activity // The 8th European Conference on Games Based Learning ECGBL 2014: proceedings, Berlin, October 9-10, 2014. Vol. 1. P. 423-429.
[15] Zamyatina O.M., Yurutkina T.Y., Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. Implementation of Games in Mathematics and Physics Modules // The 8th European Conference on Games Based Learning ECGBL 2014: proceedings, Berlin, October 9-10, 2014. Vol. 2. P. 652-661.
[16] Zamyatina O.M., Mozgaleva P.I., Gulyaeva K.V. Elite engineering education programme development based on CDIO standarts // 18 International Conference Interactive Collaborative Learning (ICL-2014): proceedings, Dubai, 3-6 December, 2014. P.919-923.
[17] Mozgaleva P.I., Zamyatina O.M., K.V. Gulyaeva Database design of information system for students' project activity managemen // 18 International Conference Interactive Collaborative Learning (ICL-2014): proceedings, Dubai, 3-6 December, 2014. P. 886-890.
[18] Zamyatina O. M., Mozgalev P. I., Goncharuk Yu.O. Game technologies in teaching discipline "Mathematical modeling" // The Scientific and methodical electronic magazine "Концепт". 2015. Т. 15. P. 36-40. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95149.htm.
[19] Zamyatina O. M., Mozgalev P. I., Yurutkina T. Yu. Application of game technologies in "Physics" and "Mathematics" modules // The Scientific and methodical electronic magazine "Концепт". – 2015. – Т. 15. – P. 46-50. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95151.htm.
[20] Zamyatina O. M., Abdykerov Zh. S. Formation and an assessment of the competences which are trained by gamification of educational process // The Scientific and methodical electronic magazine "Концепт". – 2015. – Т. 15. – P. 26-30. – URL: http://e-koncept.ru/2015/95147.htm.

УДК 620.179.1; DOI 10.1872/MMF-2016-111

О.Ю. Александрова[1], А.В. Снегирева[2], М.А.Мордвин[3]

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОНИКАЮЩИХ РАСТВОРОВ И ЭФФЕКТЕ БАРКАГАУЗЕНА

[1]Ольга Юрьевна Александрова, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: Park.olga@list.ru

[2]Анна Вячеславовна Снегирева, младший научный сотрудник
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: avs.pnrpu@gmail.com

[3]Михаил Анатольевич Мордвин, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: mmordvin@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена вопросу применимости неразрушающих методов контроля при проведении анализа дефектов поверхностного слоя зубчатого колеса. Приведены методики проведения и результаты контроля рабочих поверхностей образца зубчатого колеса с использованием методов неразрушающего контроля, основанных на использовании проникающих растворов и эффекте Баркагаузена.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, эффект Баркгаузена, капиллярный метод, зубчатое колесо, поверхностные дефекты.

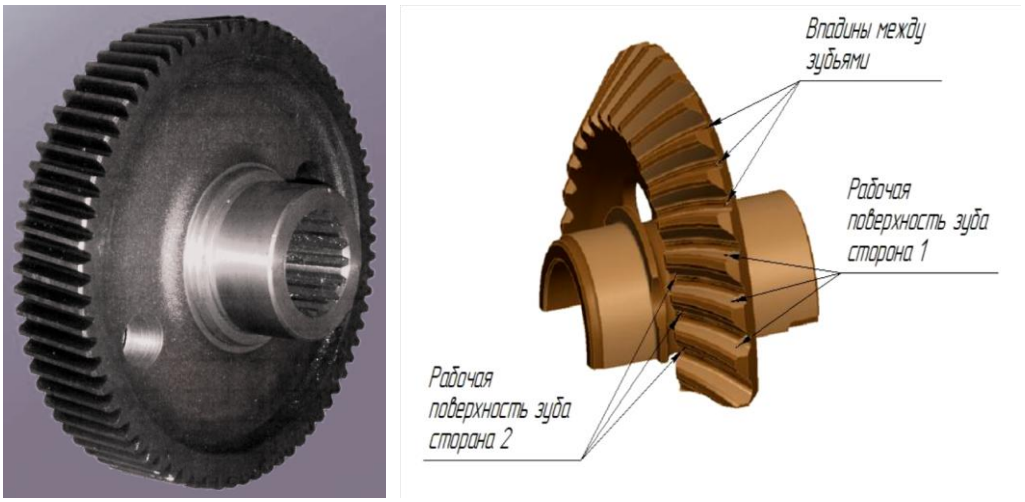
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218)

Зубчатое колесо является одной из наиболее широко распространенных деталей в изделиях машиностроения, при этом в ходе эксплуатации его рабочие поверхности испытывают постоянные нагрузки, которые определяют высокие требования к качеству их изготовления.

В процессе изготовления зубчатых колёс возможно образование поверхностных дефектов различных типов, таких как прижоги, изменения микроструктуры, трещины, несплошности, поры и др. Проведение контроля качества рабочих поверхностей неразрушающими методами позволяет выявить образовавшиеся дефекты, на основании которых судить о качестве детали, техническом состоянии и пригодности к работе.

В соответствии с ГОСТ 18353-79 [1] существует широкая номенклатура методов неразрушающего контроля (НК) основанных на различных физических принципах. В зависимости от вида возможных дефектов определяется метод контроля. Для контроля рабочих поверхностей зубчатых колес (рис. 1) применимы следующие виды неразрушающего контроля: акустический, магнитный, метод проникающих веществ.

В соответствии с технологическим процессом изготовления рассматриваемой детали для определения поверхностных дефектов рабочей поверхности используется магнитопорошковый метод НК. Участки поверхности зубчатого колеса, на которых производится контроль дефектов, обозначены на рис.1б.



а – пример конструкции детали, б - зоны контроля рабочих поверхностей зубчатых колес

Рис.1 Зубчатое колесо как объект НК

В основе магнитопорошкового метода неразрушающего контроля (МПК) лежит способность регистрации различных магнитных полей рассеяния, возникающих над местом образования дефектов при локальном намагничивании, используя в виде индикаторного вещества - порошка с ферромагнитными свойствами или магнитной суспензии [1].

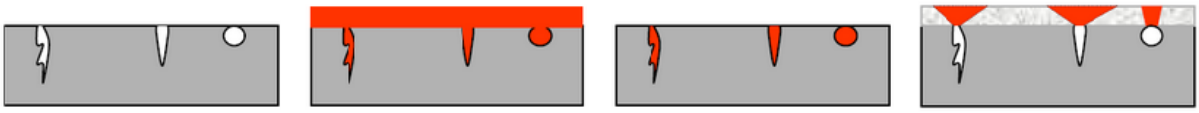
В связи с наличием у магнитопорошкового метода ряда недостатков, таких как невозможность проведения контроля на объектах, на поверхности которых не обеспечена необходимая зона для намагничивания и нанесения индикаторных материалов, невозможность выявления трещин менее 2 мкм, снижение чувствительности метода при толщине покрытия более

100-150 мкм, а также зависимость результатов от состояния и шероховатости контролируемой поверхности, способа нанесения и свойств дефектоскопического материала, вида и силы тока [2, 3, 4], необходимо оценить возможность и эффективность использования для поставленной задачи других методов НК поверхности. В качестве альтернативных методов НК были выбраны методы, основанные на использовании проникающих растворов и эффекте Баркагаузена.

Физические основы и методика проведения контроля капиллярным методом

Капиллярные методы (КМ) НК позволяют обнаружить дефекты в поверхностном слое и основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующих индикаторных следов. [4]

Проведение НК капиллярным методом включает в себя четыре этапа: очистка контролируемой поверхности, нанесение пенетранта, способного проникать в дефекты, удаление избытка пенетранта с помощью очистителей, нанесения проявителя (рис. 2).



а б в г

а – очистка; б – нанесение пенетранта; в – удаление пенетранта; г – нанесения проявителя

Рис. 2 Этапы проведения КМ

КМ НК основан на явлении смачивания, большое значение на результат оказывают характеристики проникающей жидкости: низкое поверхностное натяжение, высокая смачиваемость и низкая вязкость. [5]

Результаты НК КМ являются промежуточными и для подтверждения наличия и характера дефектов необходимо применение других методов НК.

Физические основы и методика проведения НК на основе использования эффект Баркгаузена

Метод шумов Баркгаузена основан на концепции индуктивного изменения амплитуды шумоподобных сигналов, которые генерируются в ферромагнитном образце при приложении магнитного поля [6]. Это изменение является результатом микроскопических движений стенок магнитных доменов внутри материала (Рис. 3).

Во время движения доменных стенок в катушке, расположенной рядом с материалом, возникает электрический импульс, амплитуда которого именуется магнитоупругим параметром (mp). На её изменение влияют лю-

бые явления, препятствующие движению доменных стенок. Это могут быть инородные включения, осадки, дислокации, границы зерен, остаточные напряжения и другие изменения поверхностного слоя [7].

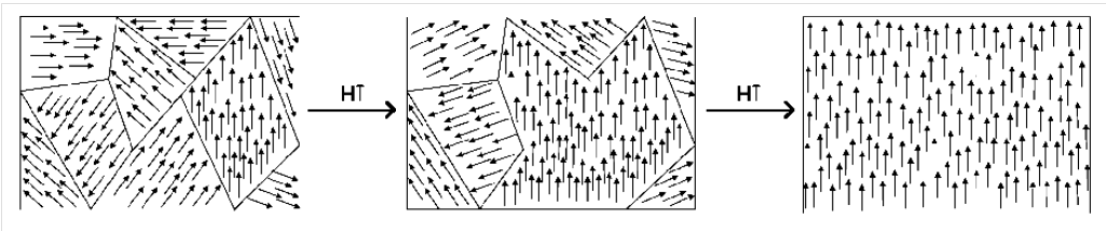


Рис. 3 Перестройка доменной структуры материала при внешнем воздействии (рост напряжённости магнитного поля (Н)

Чувствительность метода ШБ определяется магнитными характеристиками материала объекта контроля, шероховатостью поверхности и др [8].

Планирование экспериментального сравнения методов НК

Для сравнения методов НК, основанных на использовании проникающих растворов и эффекте Баркгаузена, с точки зрения целесообразности и эффективности их применения в качестве основного метода определения дефектов на рабочих поверхностях зубчатых колес были сформулированы следующие критерии:

- Глубина проникновения в поверхность при проведении контроля
- Степень автоматизации метода
- Использование химикатов при проведении НК
- Время, затраченное на проведение НК
- Наглядность представления результатов

Объектом контроля являются рабочие поверхности зубьев сектора зубчатого колеса – 14 впадин между зубьями и боковые поверхности 15 зубьев (измерения проводились с каждой стороны зуба).

При проведении НК методом ШБ применяют следующие средства измерений и вспомогательные устройства:

- цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 350 (рис.4а);
- датчик для измерения шестерен (рис.4б);
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением ViewScan для записи сигнала с датчика и последующего анализа данных.

При проведении НК рабочей поверхности зубчатого колеса датчик должен фиксироваться строго в определенном положении относительно контролируемой поверхности. При проведении неавтоматизированного контроля (рис.5), когда положение датчика задается рукой контролера, не допускается его смещение и колебание относительно поверхности. [9]

а б

а - цифровой анализатор ШБ Rollscan 350; б - датчик для измерения зубчатых колес

Рис. 4 Оборудование для НК зубчатых колес методом ШБ

Рис 5 Проведение НК впадины между зубьями колеса методом ШБ

При уровне ШБ выше установленного порогового значения его текущая величина записывается в виде диаграммы изменения магнитного параметра относительно времени t. Кратковременный скачок значения магнитного параметра может свидетельствовать о наличии дефекта на поверхности.

При проведении НК рабочей поверхности зубчатого колеса КМ определение дефектов производится в соответствии с ГОСТ 18442-80. Контролируемая поверхность должна быть обезжирена и очищена от внешних загрязнений, таких как отработанное масло, металлическая стружка и др (рис.6). Поскольку контролируемая поверхность имеет темный оттенок используется пенетрант белого цвета. После удаления излишков пенетрата необходимо нанести проявитель красного цвета. Определение дефектов контролиреумой поверхности после нанесения пенетрата и проявителя выполняется визуально контролером и фиксируется в виде протокола контроля.

Результаты эксперимента

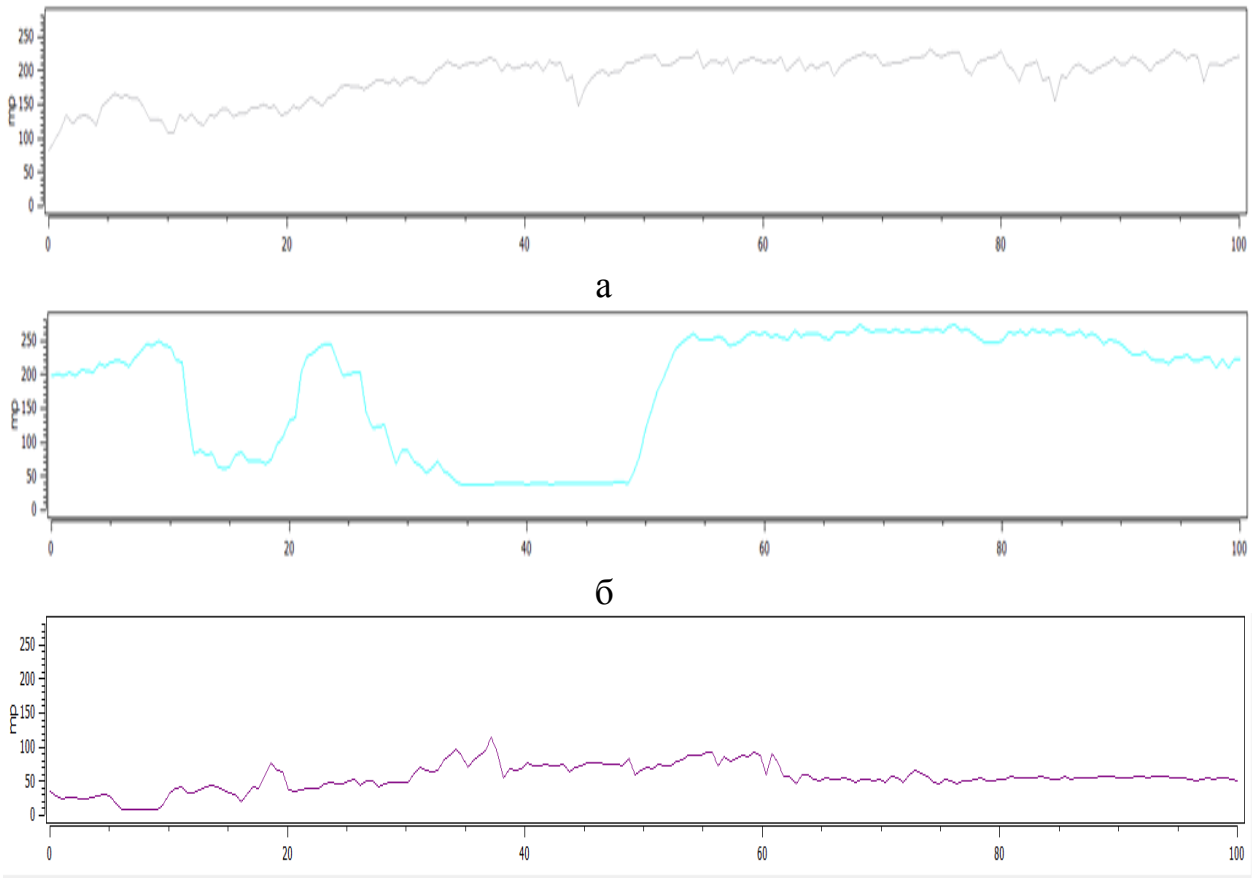
В результате анализа диаграмм изменения магнитного параметра, полученных при сканировании впадин между зубьями объекта с использованием цифрового анализатора ШБ Rollscan 350, (рис. 7) сформулированы

следующие заключения. На диаграммах изменения магнитного параметра при сканировании впадин 5, 6, 12 присутствуют скачки уровня mp, что соответствует наличию дефектов поверхности в зоне этих впадин. При этом невозможно определить характер дефекта и величину его площади.

а б в

а – очистка; б – нанесение пенетранта; в – нанесение проявителя

Рис. 6 Этапы НК рабочей поверхности зубчатого колеса КМ



а

б

в

а – для впадины 5, б – для впадины 6, в – для впадины 12

Рис. 7 Диаграмма изменения магнитного параметра от времени

При визуальном контроле боковых поверхностей зубьев объекта можно отметить нарушение поверхностной цементации в области 1-го, 2-го и

3-го и 12-го зуба с одной стороны и 2-го, 3-го, 13-го и 15-го зуба с другой стороны. Этим областям соответствуют скачкообразные изменения диаграммы магнитного потока (рис. 8, 10) и высокие значения среднего уровня mp (рис. 9, 11). Величина магнитоупругого параметра при проверке поверхностей остальных зубьев колеблется незначительно.

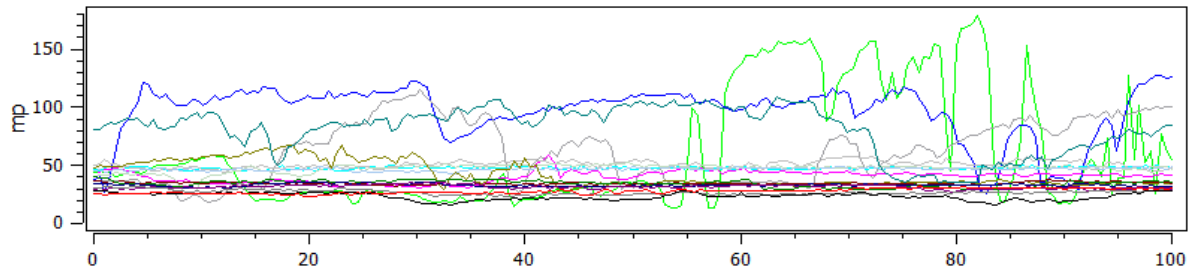


Рис. 8 Диаграмма изменения величины mp от времени при сканировании боковой поверхности зубьев с одной стороны

Номер	Имя	С	Макс.	Пред...	При	Мин.	Средн.	Откл...	Числ...	Макс./...	Макс./...	Мин./...	Макс.-...	К...
1	График 3	И	178.80	-	82.0	13.40	62.46	49.57	201	13.34	2.86	0.21	165.40	1
2	График 4	И	126.90	-	98.5	26.10	95.95	23.29	198	4.86	1.32	0.27	100.80	1
3	График 5	И	115.60	-	30.3	18.60	62.13	26.14	199	6.22	1.86	0.30	97.00	1
4	График 6	И	50.00	-	92.5	45.00	47.69	1.13	202	1.11	1.05	0.94	5.00	1
5	График 7	И	58.20	-	42.2	30.80	40.31	4.94	200	1.89	1.44	0.76	27.40	1
6	График 8	И	58.00	-	70.6	44.10	50.81	3.08	202	1.32	1.14	0.87	13.90	1
7	График 9	И	52.60	-	49.5	25.20	47.34	3.98	201	2.09	1.11	0.53	27.40	1
8	График 10	И	49.50	-	50.0	42.30	46.75	1.23	201	1.17	1.06	0.90	7.20	1
9	График 11	И	67.80	-	23.0	27.60	42.37	10.80	201	2.46	1.60	0.65	40.20	1
10	График 12	И	37.40	-	88.5	32.40	34.54	1.04	201	1.15	1.08	0.94	5.00	1
11	График 13	И	40.60	-	0.0	28.90	34.34	2.74	202	1.40	1.18	0.84	11.70	1
12	График 14	И	36.10	-	19.0	30.40	33.12	1.17	201	1.19	1.09	0.92	5.70	1
13	График 15	И	108.80	-	63.3	35.40	81.13	20.06	200	3.07	1.34	0.44	73.40	1
14	График 16	И	35.10	-	29.4	27.20	31.54	1.63	202	1.29	1.11	0.86	7.90	1
15	График 17	И	32.30	-	3.5	22.90	26.87	1.99	200	1.41	1.20	0.85	9.40	1
16	График 18	И	28.30	-	98.0	16.20	23.37	3.07	201	1.75	1.21	0.69	12.10	1
17	График 19	И	31.80	-	80.6	22.90	27.79	2.07	202	1.39	1.14	0.82	8.90	1

Рис. 9 Сводная таблица значений mp, полученных при сканировании боковой поверхности зубьев с одной стороны

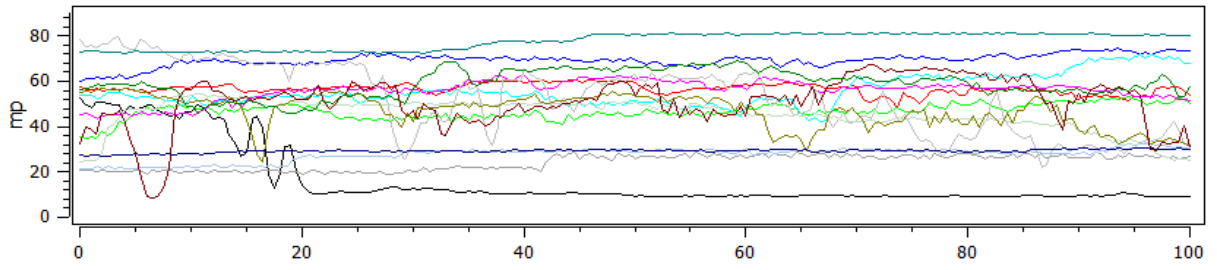


Рис. 10 Диаграмма изменения величины mp от времени при сканировании боковой поверхности зубьев со второй стороны

В результате проведения контроля поверхности объекта с помощью КМ были обнаружены следующие дефекты:

- прижоги во впадине 6;
- микротрещины на поверхности впадины 12.

По боковым поверхностям всех зубьев объекта наблюдается нарушение цементации с хаотичным распределением трещин.

Номер	Имя	С	Макс.	Пред...	При	Мин.	Средн.	Откл...	Числ...	Макс./...	Макс./...	Мин./...	Макс.-...	К...
1	График 1	И	52.90	-	0.0	8.90	16.43	13.49	201	5.94	3.22	0.54	44.00	1
2	График 2	И	60.60	-	41.6	48.40	56.72	2.27	198	1.25	1.07	0.85	12.20	1
3	График 3	И	53.00	-	94.5	34.70	46.77	3.36	201	1.53	1.13	0.74	18.30	1
4	График 4	И	74.40	-	93.4	59.80	69.37	2.77	199	1.24	1.07	0.86	14.60	1
5	График 5	И	29.00	-	44.5	18.90	24.33	3.34	201	1.53	1.19	0.78	10.10	1
6	График 6	И	71.70	-	96.5	42.40	55.78	6.72	199	1.69	1.29	0.76	29.30	1
7	График 7	И	63.00	-	39.9	43.40	55.93	4.60	199	1.45	1.13	0.78	19.60	1
8	График 8	И	79.60	-	3.5	21.80	52.77	15.16	203	3.65	1.51	0.41	57.80	1
9	График 9	И	54.60	-	10.5	24.40	45.34	6.82	201	2.24	1.20	0.54	30.20	1
10	График 10	И	32.60	-	96.5	21.50	27.77	2.95	199	1.52	1.17	0.77	11.10	1
11	График 11	И	57.00	-	2.0	24.60	47.05	7.12	201	2.32	1.21	0.52	32.40	1
12	График 12	И	67.30	-	71.0	8.30	51.09	10.83	201	8.11	1.32	0.16	59.00	1
13	График 13	И	68.90	-	59.1	45.70	59.08	5.96	199	1.51	1.17	0.77	23.20	1
14	График 14	И	30.80	-	96.5	26.90	29.25	0.73	203	1.14	1.05	0.92	3.90	1
15	График 15	И	81.70	-	77.1	72.50	77.75	3.64	202	1.13	1.05	0.93	9.20	1

Рис. 11 Сводная таблица значений mp, полученных при сканировании боковой поверхности зубьев со второй стороны

Таким образом, на основе данных проведенного эксперимента по определению дефектов на рабочих поверхностях зубчатого колеса, можно сравнить рассматриваемые методы НК с использованием ранее сформулированных критериев. Характеристики методов НК, основанных на использовании эффекта Баркгаузена и проникающих жидкостей, в соответствии с критериями сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1 Сравнительный анализ методов НК

№	Критерий сравнения	Характеристики	
		метод ШБ	КМ
1	Глубина проникновения в поверхность при проведении контроля	до 300 мкм	до 100 мкм
2	Степень автоматизации при проведении контроля и обработке его результатов	средняя (только запись результатов)	отсутствует
3	Использование опасных и вредных веществ при проведении НК	нет	да
4	Время, затраченное на проведение НК	30 минут	60 минут
5	Наглядность представления результатов	средняя, невозможно определить вид дефекта	очень высокая, вид дефекта определяется однозначно

В результате сравнения методов НК по рассмотренным критериям можно сформулировать следующие выводы:

1. Для определения поверхностных дефектов с использованием метода ШБ характерна более высокая чувствительность, чем при визуальном осмотре детали в ходе проведения контроля КМ;
2. Для автоматизации операций проведения контроля поверхности по методу ШБ с целью сокращения времени, затрачиваемого на одну деталь, достаточно использовать приспособления, обеспечивающие точное позиционирование датчика относительно контролируемой поверхности, тогда

как для контроля КМ необходимы средства автоматизации всех этапов процесса, включая обработку результирующих изображений.

3. При контроле с использованием рассмотренных методов могут быть выявлены только дефекты поверхностного слоя, толщиной до 0,3 мм, поэтому при разработке технологических процессов контроля необходимо сочетать их с другими методами НК для контроля слоев материала детали, расположенных на большем расстоянии от поверхности.

Таким образом, при решении задачи определения дефектов на рабочей поверхности зубчатых колес в качестве основного метода НК, могут быть использованы оба рассмотренных метода, при этом метод ШБ обеспечивает большую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Издательство стандартов, 1980 – 12с.
2. Расширение области применения магнитопорошкового метода неразрушающего контроля / Белов А. А. [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. - №10-1.- с. 66-69
3. И. И. Толмачев, Ю. В. Осадчих. Повышение качества проведения магнитопорошковой дефектоскопии объектов с подповерхностными дефектами // Вестник науки Сибири. – 2014. - № 2(12). – с. 81-83
4. Применение методов неразрушающего контроля для выявления коррозионных поражений элементов конструкций летательных аппаратов / Кацура А. В. [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2011. - №1(34). – с. 101-104.
5. ГОСТ 18442-80 Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. Общие требования. – М.: Издательство стандартов, 1981 – 16с.
6. С. М. Сайфутдинов. Капиллярный контроль: история и современное состояние // В мире неразрушающего контроля. – 2008. - № 1 (39). – с. 14-18
7. Г.В. Ломаев, Ю.М. Мерзляков Эффект Баркгаузена. / Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004. - 164 с.
8. Л. Суоминен. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена // В мире неразрушающего контроля. – 2011. - № 2 (52). – с. 74-78
9. В. Л. Венгринович, Д. А. Винтов. Распределение шумов Баркгаузена в зоне концентрации напряжений при усталостных испытаниях стали 10ХСНД // Контроль. Диагностика. – 2015. - № 8. – с. 31-38.
10. Ломаев Г. В. , Каримова Г. В. Датчики Баркгаузена: монография / Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2008. - 368 с.

O.Ju. Aleksandrova, A.V. Snegireva, M.A.Mordvin

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE NON-DESTRUCTIVE METHODS BASED ON APPLYING OF PENETRATING LIQUIDS AND BARKHAUSEN EFFECT FOR GEAR WORKING SURFACE CONTROL

Abstract

The article deal with acceptability of non-destructive testing for gear surface defects analysis. Testing techniques and results for working surfaces of sample gear received by non-destructive testing methods based on applying of penetrating liquids and Barkhausen effect is described.

Key words: non-destructive testing, Barkhausen effect, capillary method, gear, surface defects.

REFERENCES

[1] GOST 18353-79 Nondestructive check. Classification of types and methods. – M.: Standard publisher, 1980 – 12p.
[2] Improvement of the magnaflux nondestructive testing application field / Belov A. A. [and others] // Current problems of the humanities and sciences. – 2015. - N10-1.- p. 66-69
[3] I. I. Tolmachev, Ju. V. Osadchih. Quality improvement of magnaflux inspection for objects with subsurface defect // Siberian science reporter. – 2014. - N 2(12). – p. 81-83
[4] Nondestructive testing methods using for the detection of aircraft constructional details corrosion damage / Kacura A. V. [and others] // Siberian State Aerospace University named after Academician MF Reshetnev reporter. – 2011. - N1(34). – p. 101-104.
[5] GOST 18442-80 Nondestructive testing. Capillary methods. General requirements. – M.: Standard publisher, 1981 – 16p.
[6] S. M. Sajfutdinov. The liquid penetrant test: history and the current state // In the world of nondestructive testing. – 2008. - N1 (39). – pp. 14-18
[7] G.V. Lomaev, Ju.M. Merzljakov Barkhausen effect. / Izhevsk: ISTU publisher, 2004. - 164 p.
[8] L. Suominen. Grinding defects detection in ferromagnetics parts using Barkhausen effect // In the world of nondestructive testing. – 2011. - N2 (52). – pp. 74-78
[9] V. L. Vengrinovich, D. A. Vintov. Barkhausen noises profiles in stress concentration zones fatigue testing of the steel 10HSND // Control and Diagnostics. – 2015. - N8. – pp. 31-38.
[10] Lomaev G. V. , Karimova G. V. Barkhausen Sensors: monography / Izhevsk: ISTU publisher, 2008. - 368 p.

УДК 621.92(07); DOI 10.1872/MMF-2016-112

В.В. Батуев[1], И.В. Дьячкова[2]

СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

[1]Виктор Викторович Батуев, к.т.н., доцент
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Россия, Челябинск
E-mail: batuevvv@yandex.ru.

[2]Ирина Валерьевна Дьячкова, студент
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Россия, Челябинск
E-mail: dyachkovaiv@yandex.ru.

Аннотация

В статье рассмотрены методы управления точностью обработки пространственно-сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ. Дана оценка эффективности перечисленных методов и методики инженерного проектирования, основанной на одном из них. С целью снижения трудоемкости проектирования операций механической обработки поверхностей пространственно-сложной формы предложена методика инженерного проектирования. Анализ эффективности применения данной методики показал снижение трудоемкости проектирования операций в среднем на 40%.

Ключевые слова: фрезерование, геометрические параметры зоны резания, погрешность размера динамической настройки, отжимы, методика инженерного проектирования, снижение трудоемкости проектирования, проектирование операции

Для современного машиностроения характерно изготовление большой номенклатуры деталей пространственно-сложной формы. К таким деталям относятся: лопатки турбин, крыльчатки, формообразующая оснастка и т.д. Особенностью данного вида деталей являются не только сложная форма, но и высокие технические требования, предъявляемые к их точности и шероховатости [6, 8, 9, 10].

Основным способом получения деталей пространственно-сложной формы является обработка их на фрезерных станках с ЧПУ, а методом

подготовки управляющих программ CAM (Computer Aided Manufacturing) системы. Данные системы позволяют быстро производить проектирование операции механической обработки, осуществлять расчет траектории режущего инструмента и получать управляющую программу. Однако все решения, связанные с последовательностью обработки, выбором режущего инструмента, заданием технологических параметров принимаются на основе субъективного опыта технолога. В результате проектные решения далеки от совершенства, что приводит к длительному процессу внедрения детали в производство (изменение последовательности обработки детали, коррекция режимов резания, дополнительная обработка части или всех поверхностей детали и др.). Поэтому задача, связанная с повышением качества принимаемых технологом решений и, как следствие, снижением трудоемкости внедрения деталей в производство является актуальной [7].

Укрупненно технологический процесс изготовления детали пространственно-сложной формы можно представить в виде последовательного выполнения следующих стадий:

- черновое фрезерование;
- чистовое фрезерование;
- отделочно-доводочная обработка.

Черновая стадия служит для снятия напуска (как правило, послойного) и приближения конфигурации заготовки к форме готовой детали. Чистовая стадия служит для снятия ступенчатого припуска, полученного на черновой стадии, и обеспечения точности размеров и формы готовой детали. На отделочно-доводочной стадии обеспечивается заданная шероховатость.

Поскольку обеспечение заданной точности осуществляется на чистовой стадии, следовательно, именно с ней связаны наибольшие затраты времени на отделочно-доводочную обработку и общую трудоемкость изготовления детали.

На точность чистового фрезерования влияет нестабильность сил резания, возникающих в процессе обработки. Для управления точностью чистового фрезерования существуют два основных метода:

1) стабилизация сил резания путем изменения режимов резания;

2) стабилизация сил резания путем управления геометрией зоны резания.

Первый метод заключается в стабилизации сил резания путем управления подачей. Для реализации данного метода в работах [3, 4] разработана математическая модель управления подачей, обеспечивающей заданную точность. Такая модель построена на основе аналитических зависимостей, адекватно отражающих процесс взаимодействия инструмента и заготовки, и связывает режимные параметры обработки с выходными показателями детали в широком диапазоне варьирования переменных. Предоставленная модель (1), обладающая гибкостью и

возможностью адаптации к различным условиям объемного фрезерования, учитывает влияние стратегий черновой обработки и позволяет рассчитать подачу для любого участка детали пространственно-сложной формы с учетом допустимой погрешности обработки.

$$S_z = \frac{\Delta N\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2+1}-\sum_{n=1}^{z}\sum_{j=1}^{k}\left(\int_{\varphi_{нпj}}^{\varphi_{впj}} 0{,}252\,\sigma_i l_з\right)}{\sum_{n=1}^{z}\sum_{j=1}^{k}\left(\int_{\varphi_{нпj}}^{\varphi_{впj}} 1{,}15\,\sigma_i \frac{a}{\sin\beta_1}\right)} \cdot$$

$$\cdot\frac{\left[\frac{l^3}{3EJ_{пр}}\cdot\left(\mu\left(\cos\psi\frac{\partial z}{\partial y}+\sin\psi\frac{\partial z}{\partial x}\right)+\sin\varphi\left(\sin\psi\frac{\partial z}{\partial y}-\right.\right.\right.}{\left[\frac{l^3}{3EJ_{пр}}\cdot\left(\cos\beta\left(\cos\psi\frac{\partial z}{\partial y}+\sin\psi\frac{\partial z}{\partial x}\right)+\sin\beta\sin\varphi\cdot\right.\right.} \quad (1)$$

$$\left.\left.\left.\left.\left.\left.\left.-\cos\psi\frac{\partial z}{\partial x}\right)\right)+\frac{\cos\varphi}{j_{zc}}\right]Rd\varphi\right)\right.$$

$$\left.\left.\left.\left.\cdot\left(\sin\psi\frac{\partial z}{\partial y}-\cos\frac{\partial z}{\partial x}\right)\right)+\frac{\sin\beta\cos\varphi}{j_{zc}}\right]Rd\varphi\right)\right.,$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — величины упругих перемещений по соответствующим координатам; $\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}$ — частные производные функции $z = \phi(x, y)$ по аргументам x и y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности в соответствующих координатах), ΔN — величина упругих перемещений, σ_i — интенсивность напряжений, $l_з$ — величина фаски затупления, z — количество зубьев фрезы; k — количество участков активной части режущей кромки, a — толщина среза, $\varphi_в$, $\varphi_н$ центральные углы между осью вращения фрезы и крайними точками пересечения лезвия с припуском, β_1 — угол сдвига, R — радиус фрезы, μ — коэффициент трения, φ — угол профиля в рассматриваемой точке режущей кромки, ψ — угол контакта зуба фрезы в рассматриваемой точке, E — модуль упругости первого рода; l — вылет фрезы, $J_{пр}$ — приведенный момент инерции, j_{zc} — жесткость технологической системы.

Второй метод заключается в стабилизации сил резания путем изменения геометрических параметров зоны резания (толщина срезаемого

слоя, положение и длина активной части режущей кромки). Для реализации данного метода в работах [1, 2] разработаны формулы, позволяющие рассчитать геометрические параметры зоны резания при фрезеровании пространственно-сложной поверхности концевой радиусной или сферической фрезой. Данные формулы с учетом модели (1) и при максимальной допустимой подаче S_z позволяют стабилизировать величину упругих перемещений при различных углах наклона обрабатываемой поверхности. По результатам исследований разработана методика инженерного проектирования операции чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск [3]. Результатом этой методики является расчетное формирование зон обработки (односвязных областей в пределах одной пространственно-сложной поверхности), где допускается одинаковое значение вектора подачи, обеспечивающего заданную погрешность размера динамической настройки.

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Разбиение поверхности пространственно-сложной формы на элементарные участки путем проецирования сетки с заданным размером ячейки на пространственно-сложную поверхность с целью их анализа и последующего формирования из них зон обработки.
2. Определение углов наклона элементарного участка.
3. Определение ожидаемых погрешностей размера динамической настройки в пределах элементарного участка при разных направлениях вектора подачи относительно этого участка.
4. Путем решения комбинаторной задачи о покрытиях, формирование зон обработки (односвязных областей), где допускается одинаковая проекция вектора подачи, обеспечивающего заданную погрешность размера динамической настройки.
5. Окончательное формирование контура зон обработки с учетом перекрытия смежных областей и ввод параметров вектора подачи в CAM систему.

При оценке производительности обработки перечисленными методами управления точностью доказано, что наибольшей эффективностью отличается метод стабилизация сил резания путем управления геометрией зоны резания, поскольку при этом в качестве задаваемого параметра является наибольшая подача, допускаемая технологической системой [5].

Однако опыт практического применения показал, что методика инженерного проектирования, разработанная для реализации второго метода управления, слишком трудоемка, что значительно ограничивает область ее применения.

С целью снижения трудоемкости проектирования операции механической обработки авторами предлагается рассматривать

пространственно-сложную поверхность как совокупность элементарных геометрических элементов, таких как плоскость, сфера, цилиндр и т.д., для каждого из которых расчетно-обоснованно назначается стратегия из перечня типовых, предлагаемых CAM системой и параметры для этой стратегии (вектор подачи).

Для реализации поставленной задачи предлагается методика, основанная на анализе типовых графиков (рис. 1) определения ожидаемых погрешностей размера динамической настройки при различных дискретных углах наклона обрабатываемой поверхности.

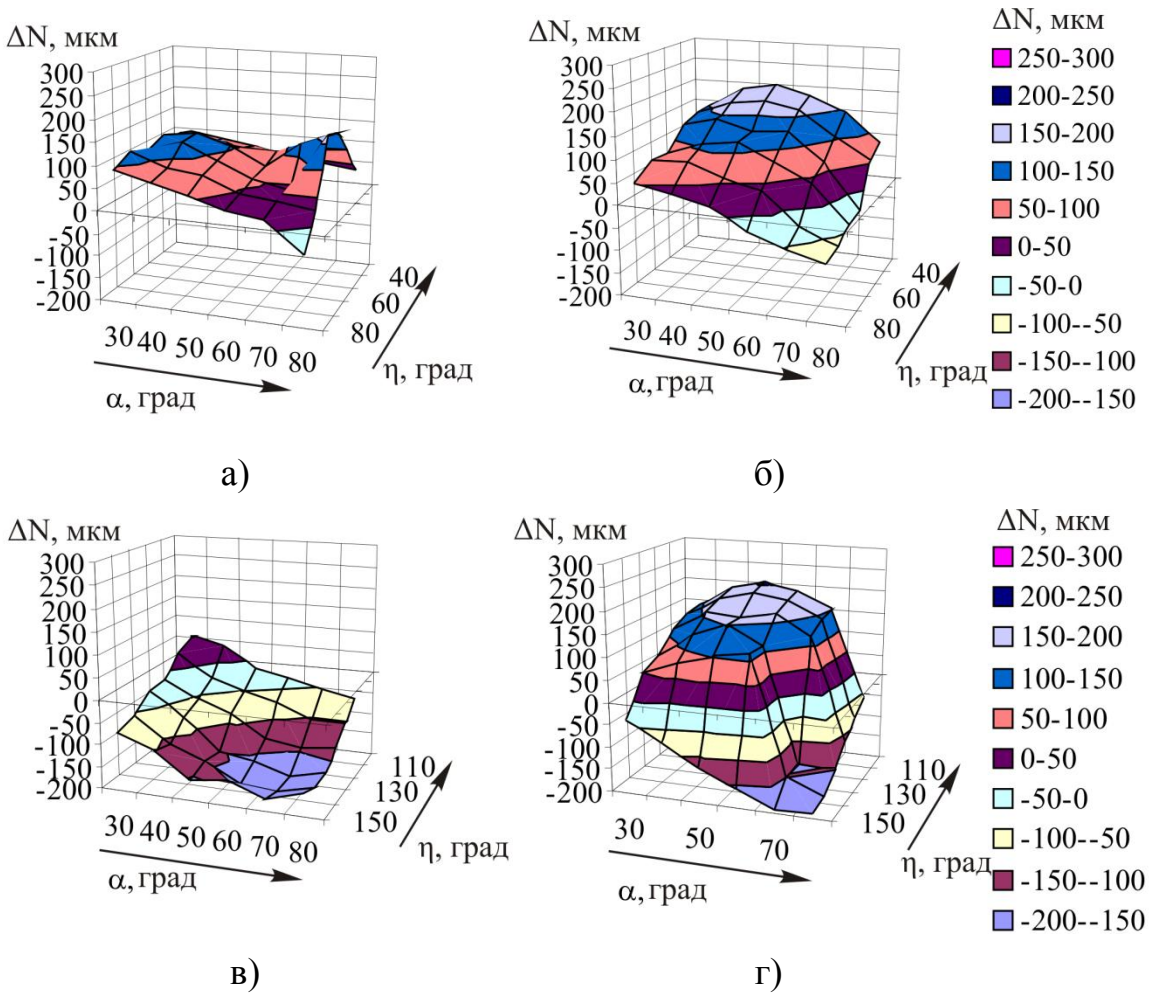


Рис. 1. Графики погрешности размера динамической настройки в зависимости от углов наклона обрабатываемой поверхности α и η при Sz=0,1 мм/зуб; dz=2 мм; “+Sпер”=+1,5 мм (а, в); “-Sпер”=-1,5 мм (б, г).

Данная методика состоит из следующих этапов:

1. Разбиение пространственно-сложной поверхности на элементарные геометрические элементы.

2. Назначение в CAM системе рекомендованных видов и параметров стратегий для каждого элементарного геометрического элемента с учетом заданной точности.

3. Назначение последовательности обработки элементарных геометрических элементов.

Реализация предложенной методики позволила снизить трудоемкость проектирования операции механической обработки пространственно-сложных поверхностей в среднем на 40% при обеспечении простоты и надежности проектных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуев В.А., Батуев В.В. Математическая модель зоны резания при многокоординатном фрезеровании [Электронный ресурс] // Наука ЮУрГУ Материалы 66-й научной конференции. 2014. С. 381-387. URL: http://dspace.susu.ac.ru/xmlui/handle/0001.74/4399
2. Батуев В.В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2006. – № 3. С. 119-123.
3. Батуев В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: дис. канд. техн. наук // Челябинск: ЮУрГУ, 2007. – 208 с.
4. Батуев В.В., Батуев В.А. Обеспечение наибольшей производительности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ // Технологическое обеспечение машиностроительных производств. Сборник научных трудов I Международной заочной научно-технической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра технологии машиностроения. 2014. С. 368-374.
5. Батуев В.В., Гузеев В.И. Расчет погрешности размера динамической настройки с учетом динамики резания // Фундаментальные исследования. – 2015. – №12-5. – С. 877-881.
6. Гузеев В.И. Теория и методика производительности контурной обработки деталей разной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: дис. докт. техн. наук // Челябинск: ЧГТУ. – 1994. – 517 с.
7. Гузеев В.И. Повышение эффективности интегрированных технологических процессов на стадиях проектирования и реализации // Наукоемкие технологии в машиностроении. М: Машиностроение. – 2014. – №7. – С. 34-41.
8. Достижение точности обработки деталей контурным фрезерованием на станках с ЧПУ / Тимирязев В.А. [и др.] // Технология машиностроения. Москва. – 2014. – №10. – С. 24-27.
9. Пайкин Д.Б. Формирование микрогеометрии поверхности при фрезеровании сложных поверхностей сферическими фрезами // Проблемы механики

современных машин. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. –2012. – С. 273-274.
10. Тахман С.И. Исследование особенностей контурного фрезерования с целью достижения заданной точности и повышения производительности обработки на фрезерных станках с ЧПУ: автореф. дис. канд. техн. наук // Новосибирск. – 1974. – 16 с.

V.V. Batuev, I.V. Djachkova

REDUCING THE COMPLEXITY OF MACHINING OPERATIONS DESIGN SPATIALLY COMPLEX SURFACE

all: Federal State Funded Educational Institution of Higher Professional Education «South Ural State University» (National Research University), Russia

Abstract

The article describes the methods of management precision processing spatially-complex surfaces on CNC milling machines. The estimation of the effectiveness of these methods and techniques of engineering design based on one of them. In order to reduce the complexity of designing machining operations surfaces spatially complex shape the technique of engineering design. Analysis of the effectiveness of this method showed a decrease in the complexity of the design operations by an average of 40%.
Keywords: milling, the geometric parameters of the cutting area, the error of dynamic configuration size, spin, methods of engineering design, reducing the complexity of the design, engineering operations.

Key words: milling, the geometric parameters of the cutting area, the error of dynamic configuration size, spin, methods of engineering design, reducing the complexity of the design, engineering operations.

REFEVENCES

[1] Batuev V.A., Batuev V.V. Mathematical model of the cutting area with multi-axis milling [Electronic resource] // Materials Science SUSU 66th Scientific Conference. 2014. 381-387 pp. URL: http://dspace.susu.ac.ru/xmlui/handle/0001.74/4399 (rus.)
[2] Batuev V.V. Calculation of the shear layer thickness in milling spatially complex surfaces having a stepped allowance // Proceedings of the Tchelyabinsk Scientific Center. – 2006. no. 3. 119-123 pp. (rus.)
[3] Batuev V.V. Increased productivity and precision finish milling spatially complex surfaces with a stepped allowance // Tchelyabinsk. 2007. 208 p. (rus.)
[4] Batuev V.V., Batuev V.A. Providing the highest performance space-fine milling of complex surfaces on CNC machines // Tchelyabinsk. 2014. 368-374 pp. (rus.)

[5] Batuev V.V., Guzeev V.I. Calculating the size of the error of dynamic configuration based on cutting dynamics // Fundamental research. 2015. no. 12-5. 877-881 pp. (rus.)
[6] Guzeev V.I. Theory and methods of contouring performance of different parts of precision lathes and CNC milling machines // Tchelyabinsk. 1994. 517 p. (rus.)
[7] Guzeev V.I. Improving the efficiency of the integrated processes at the design stage and implementation // High Tech in Mechanical Engineering. M: Engineering. 2014. no. 7. 34-41 pp. (rus.)
[8] Achieving precision parts processing contour milling on CNC machines / Timiryazev V. A. [et al.] // Technology of mechanical engineering. Moscow. 2014. no. 10. 24-27 pp. (rus.)
[9] Paikin D.B. Formation of surface microgeometry during milling of complex surfaces spherical cutters // Problems of modern machines. Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management. 2012. 273-274 pp. (rus.)
[10] Tahman S.I. Investigation of the features of contour milling in order to achieve the specified accuracy and increasing productivity in the CNC milling machines // Novosibirsk. 1974. 16 p. (rus.)

УДК 339.944; DOI 10.1872/MMF-2016-113

С.Е. Буханченко[1], А.Е. Пугачёва[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АДДИТИВНО ПОЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ

[1]Сергей Евгеньевич Буханченко, к.т.н., заведующий кафедрой
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, Томск
E-mail: triboss@tpu.ru

[2]Пугачёва Анна Евгеньевна, магистрант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, Томск
E-mail: ae_pugacheva@list.ru

Аннотация

В статье поставлена задача исследования свойств конструкционных материалов, полученных методом послойного синтеза, применительно узлам трения технических систем. В результате анализа показаны возможности технологии, исследованы достоинства и недостатки данного метода.

Ключевые слова: аддитивные технологии, микроструктура, механические свойства.

Производство современных машин и их узлов представляет собой разнообразие выбора технологий и материалов, однако существуют технологии, которые не используются достаточно широко по той причине, что недостаточно изучены их механические свойства, структура и область применения. Аддитивные технологии (AF – Additive Manufacturing), или технологии послойного синтеза, сегодня одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Они позволяют существенно ускорить НИОКР и решить задачи подготовки производства, а в ряде случаев уже активно применяются для производства различной продукции. Аддитивные технологии являются ярким примером того, что при минимальных экономических затратах возможно получать качественные изделия в минимальные сроки. При этом привлечение ресурсоэффективных технологий в сферу машиностроения актуально, так как важным аспектом является снижение негативного влияния на окружающую среду и уменьшение затрат на производство изделий.

Цель исследования заключается в изучении структуры и механических свойств аддитивно полученных конструкционных материалов при динамических режимах нагружения узлов трения технических систем.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ технологий получения и характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов.
2. Выбор оптимальной технологии 3D печати для узлов трения технических систем.
3. Определить перечень механических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов, определяющих триботехнические свойства узлов трения.
4. Исследовать структуры аддитивно полученных конструкционных материалов.

В настоящее время наиболее используемыми в получении металлических деталей можно считать следующие аддитивные методы: лазерное спекание и вакуумно-дуговое напыление.

Электронно-лучевое напыление. Принцип действия электронно-лучевого испарителя: для формирования потока электронов предназначена электронная пушка (рис.1), состоящая из вольфрамового термокатода и фокусирующей системы. Внешний вид установки электронно-лучевого напыления представлен на рис. 2.

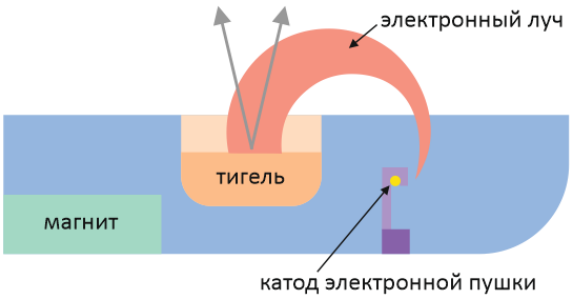


Рис. 1. Схема электронно-лучевого испарителя.

Рис. 2. Установка электронно-лучевого напыления Arcam Q10.

Электроны проходят эту систему, ускоряются за счет разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Отклоняющую систему создает магнитное поле, перпендикулярное направлению движения выходящих из фокусирующей системы пушки электронов. Это поле направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля, причем в месте падения луча создается локальная зона разогрева и испарения вещества из жидкой фазы. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой пленки на подложке, которая обычно располагается на определенном расстоянии над

испарителем. Изменяя ток в катушке управляющего отклоняющей системой электромагнита, можно сканировать лучом вдоль тигля, что предотвращает образование «кратера» в испаряемом материале.

К недостаткам электронно-лучевого испарения следует отнести:

- высокое ускоряющее напряжение (порядка 10 кВ);
- вследствие затрат энергии на образование вторичных электронов низкий КПД установок (до 25% энергии первичного пучка), нагрев тигля, рентгеновское и УФ-излучение;
- при бомбардировке наносимых пленок вторичными электронами генерацию радиационных дефектов;
- по сравнению с магнетронным напылением низкую стехиометрию пленок;
- вследствие низкой энергии осаждаемых частиц плохую адгезию тонких пленок к основе;
- заряжение напыляемой поверхности статическим зарядом, который может вызвать пробои по пленке и нарушить ее адгезию;
- не высокую производительность.

К преимуществам метода относятся:

- возможность нанесения пленок металлов (в том числе тугоплавких), сплавов, полупроводниковых соединений и диэлектриков с температурой плавления вплоть до 3500°С;
- высокая скорость испарения веществ (от 1 до 10 нм/м) и возможность регулирования ее в широких пределах за счет изменения подводимой к испарителю мощности;
- возможность получения при высоком вакууме покрытий, практически свободных от загрязнений; их чистота определяется чистотой используемого для напыления материала;
- равномерность получаемых покрытий;
- свободная диффузия атомов вещества испарителя в рабочей камере, прямолинейное их движение без столкновения с остаточными молекулами компонентов воздуха и бесполезного рассеивания материала в объеме камеры, исключение химического взаимодействия напыляемого вещества с остатками воздуха [1].

Лазерное спекание. Выборочное лазерное спекание (SLS) – метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Технология основана на последовательном спекании слоев (рис. 3) порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная

плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей.

Процесс включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка 200Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения спекания слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал, лазер начинает спекать следующий слой. Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон [2].

Интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для сложных элементов конструкции. Не спеченный порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново: производство можно считать фактически безотходным.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Технология обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными производственными методами:

- возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки;
- производство практически безотходно, что выгодно отличает подобного рода печать от субтрактивных технологий;
- возможность создания нескольких моделей одновременно с ограничением по размеру рабочей камеры;
- построение моделей занимает порядка несколько часов, что несоизмеримо более выгодно, чем литейный процесс, который

может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла.

С другой стороны, у технологии есть и свои недостатки:

- детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают достаточной монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы, или детали, произведенные субтрактивными методами.

Технологии послойного лазерного спекания используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий.

В данной исследовательской работе была задействована установка лазерного спекания фирмы Arcam AB - Arcam Q20, так как она имеет ряд преимуществ и широко представлена на российском рынке.

Arcam Q20 (рис. 4) - разработка в области аддитивного производства Additive Manufacturing от фирмы Arcam AB. Она спроектирована для быстрого производства больших, сложных металлических деталей.[3].

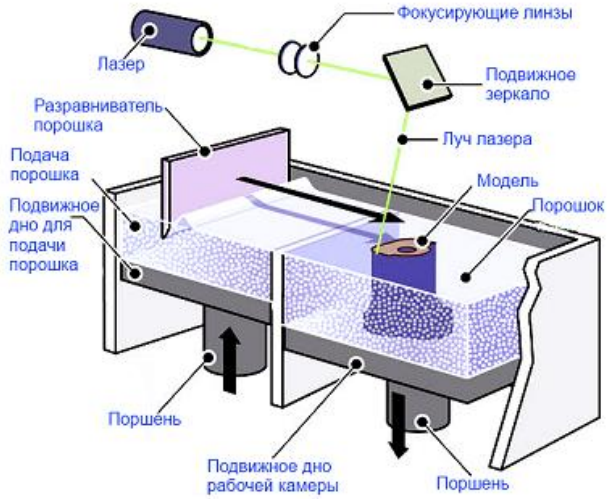


Рис. 3. Принцип работы принтера, основанного на лазерном спекании.

Рис. 4. Установка лазерного спекания Arcam Q20.

Установка Arcam Q20 обеспечивает работу с различными сплавами: на основе титана, никеля, алюминия, а также сталями и некоторыми другими.

Наиболее показательными для триботехнических характеристик аддитивно полученных конструкционных материалов являются исследования структуры, пористости поверхности и твёрдости. Наибольший интерес для исследования поверхностных характеристик заготовок и деталей, работающих при трении, является пористость — доля объёма пор в общем объёме пористого тела. Характер пористости является

словесной характеристикой материала и его определение зависит от отрасли применения [5].

Кроме того, необходимо рассмотреть твёрдость материала, так как характеристика износа зависит от твердости материала.

Кроме классических установок для определения твёрдости используются также портативные, которые позволяют измерить твёрдость любых хорошо отполированных поверхностей. Таким устройством является твердомер ультразвуковой МЕТ-У1, который реализует метод ультразвукового контактного импеданса (UCI).

Для проведения экспериментов были выбраны следующие конструкционные материалы, которые интересны для исследования с точки зрения трибологии.

1. Порошок фирмы EOS Titanium Ti64, сплав Ti6Al4V, принадлежащий к (α+β)-классу, в странах зарубежья является одним из самых востребованных сплавов из титана. Аналогом этого сплава на отечественном рынке является сплав ВТ6.

   Этот сплав имеет повышенную стойкость к водороду, что препятствует водородному и коррозионному изнашиванию. Наличие в его составе алюминия делает его более прочным и жаропрочным. Ванадий же в составе титана увеличивает его прочность и пластичность.
2. Порошок фирмы EOS stainless steel PH 1. Нержавеющая сталь в форме мелкодисперсного порошка.

   Этот тип стали характеризуется высокой коррозийной стойкостью и превосходными механическими свойствами, особенно в дисперсионно-твердеющем состоянии. Кроме того, он широко используется в различных областях медицины, аэрокосмической отрасли и других инженерных приложениях требующих высокой прочности, твердости и коррозийной стойкости. Материал идеально подходит для построения деталей, например, полнофункциональные металлические прототипы, малая серия продукции, индивидуальные изделия или запчасти. Изготовление при стандартных параметрах и 20 мкм толщине слоя построения, детали получаются полностью сплавленные. Детали, изготовленные из материала EOS StainlessSteel PH1, могут подвергаться механической обработке, обработке на электроэрозионном станке, сварке, микродробестрйной обработке, полировке и покрытию.

Из рассмотренных выше материалов были получены образцы (рис. 5, 6). На титановом сплаве можно заметить путь лазера - полосы, которые были подвергнуты шлифованию и полировке.

На обработанных поверхностях исследованы пористость (рис. 7,9,10) и структура (рис. 8) под инвертированным микроскопом Axio Vert A1.

Рис. 5. EOS Titanium Ti 64.

Рис. 6. EOS stainless steel PH 1.

Вместе с тем, для сплава EOS stainless steel PH1 был проведено травление, которое помогло исследовать структуру. Структура аддитивно полученной стали похожа на структуру обычной ферритной стали хорошего качества. Пористость аддитивно полученной стали стандартная, не отличается от образцов, полученным традиционным путём, распределение пор равномерное по поверхности.

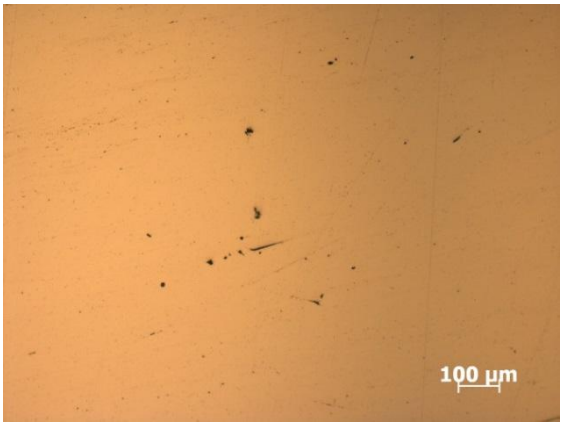


Рис. 7. Пористость EOS stainless steel PH1.

Рис. 8. Структура EOS stainless steel PH1.

Что касается титанового сплава, то поры распределены следующим образом: крупные по периметру (рис. 9), а мелкие в центре (рис. 10). Поры, для использования в парах трения, могут быть полезны, так как будут удерживать смазку внутри себя и предотвратят преждевременный износ и выход из строя детали. Так же, пористостью при печати можно управлять, но стоит помнить, что при увеличении пористости уменьшается прочность, что может негативно сказаться на деталях, работающих при ударных нагрузках.

После изучения структуры, была измерена твёрдость по Виккерсу образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления из оригинальных порошков фирмы EOS.

Таблица 1.Твердость образцов по Виккерсу.

Твердость						
материал	EOS Titanium Ti64			EOS stainless steel PH 1		
значение	820	828	828	431	434	439

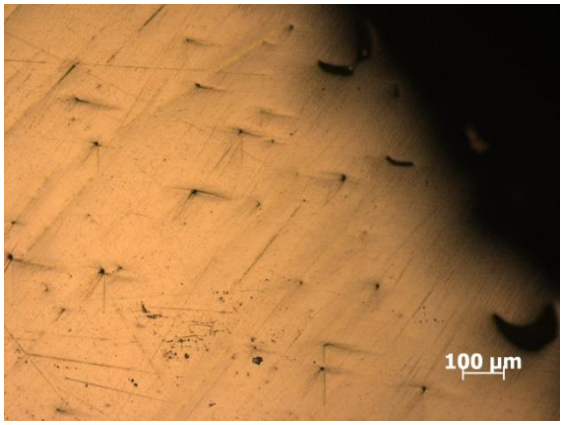


Рис. 9. Пористость EOS Titanium Ti64 мелкие поры.

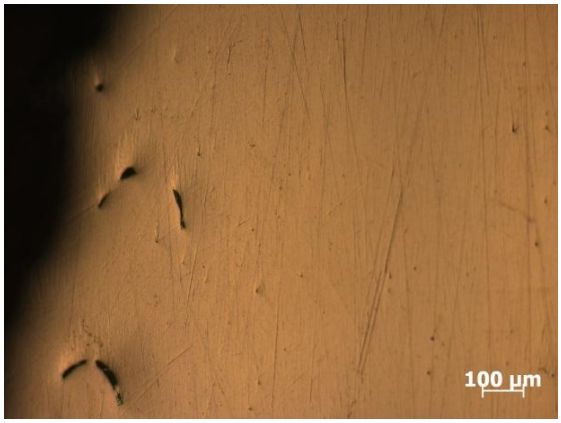


Рис. 10. Пористость EOS Titanium Ti64 крупные поры.

Значения табличных данных отличается от заявленных производителем. Скорее всего, это результат погрешности твердомера или поверхностного упрочнения вследствие механической обработки.

В некоторых случаях, таких, как при сложной геометрии или малой серии, экономически выгодно использовать аддитивные методы получения заготовок и деталей.

По всем проведённым исследованиям можно сделать вывод, что образцы, полученные методом лазерного спекания, могут использоваться для изготовления деталей. Если говорить про более узкую направленность – исследование триботехнических свойств при динамических режимах нагружения узлов, то стоит исследовать образцы при работе на трение, что и станет вектором развития данной работы.

Работа выполнялась в рамках проекта ТЕМПУС 4.1271.Т.2014 «Международная магистратура «Обеспечение эффективности технологических процессов жизненного цикла изделия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование:// Иванов А., Смирнов Б. Наноиндустрия научно-технический журнал. – М.: 2012, №6.
2. http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/ (дата обращения 5.04.2016).
3. http://abuniversal.ru/ (дата обращения 2.04.2016).
4. Беккерт М. Справочник по металлографическому травлению// Беккерт М., Клемм Х. - М.: Металлургия, 1979.
5. Житников Ю.З. Определение пористости материалов// Житников Ю.З. М.: Контроль. Диагностика 2004, №4. С.40-43.
6. Геллер Ю.А. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи// Геллер Ю.А., Рахштадт А. Г. -М.: Металлургия, 1975.

S.E. Bukhanchenko, A.E. Pugacheva

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES ADDITIVELY PRODUCE METALLIC ELEMENTS OF THE PRODUCT

all: Tomsk Polytechnic University, Russia

Abstract

In the article the task of the study of structural properties of materials obtained by layering synthesis applied friction units of technical systems. The analysis shows the possibilities of technology, studied the advantages and disadvantages of this method.

Key words: additive technology, microstructure, mechanical properties.

REFERENCES

[1] Ivanov A. electron beam evaporation: technology and equipment: // Ivanov A., Smirnov B. Nanoindustry scientific and technical magazine. - Moscow, 2012, №6.
[2] http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/ (date of the application).
[3] http://abuniversal.ru/ (date of the application).
[4] M. Beckert Reference metallographic etching // Beckert M., H. Klemm - M.: Metallurgy, 1979.
[5] Zhitnikov Yu. Z. Determination of porosity materials // Zhitnikov Yu. Z. M.: Control. Diagnostics 2004, №4. P.40-43
[6] Geller Yu. A. Materials science: methods of analysis, laboratory work and tasks // Geller Yu. A., Rahshtadt A.G. -M.: Metallurgy, 1975.

УДК 62-529; DOI 10.1872/MMF-2016-114

С.Е. Буханченко[1], В.В. Федоров[2], А.П. Щербанский[3]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ ТОРСИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ И ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИЯХ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

[1]Сергей Евгеньевич Буханченко, к.т.н., заведующий кафедрой
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск
E-mail: triboss@tpu.ru

[2]Владислав Викторович Федоров, магистрант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск
E-mail: vvf4@tpu.ru

[3]Александр Петрович Щербанский, магистрант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск
E-mail: aps9@tpu.ru

Аннотация

На основе разработанной математической модели исследованы динамические режимы работы торсионной системы, реализованной на базе сервопривода, при вращательном и возвратно-вращательном движениях исполнительного органа. Для обеспечения требуемого закона вращения исполнительного органа определены законы управляющего воздействия, учитывающие влияние динамического нагружения торсионной системы.

Ключевые слова: автоматическое управление, динамический режим, торсионная система.

Сегодня в процессе эксплуатации узлы современных технических систем большинства машин и механизмов подвержены сложному динамическому нагружению (скоростному, силовому, температурному, вибрационному и т.п.), что приводит к их высокой нагруженности, существенному снижению долговечности и работоспособности [1].

Согласно статистике, 85–90% технических систем выходят из строя по причине износа, который обусловлен возникновением трения между относительно движущимися частями. Как правило, расходы на восстановление изношенных узлов составляют 30%-40% от стоимости новой технической системы.

Решение данной проблемы сводится к созданию современных средств испытания конструкционных материалов и смазочных сред, например, триботехнических, способных с максимальным подобием воспроизводить условия функционирования реальных технических систем.

К сожалению, современные триботехнические устройства испытания далеки от создания реальных условий функционирования технических систем, в силу наличия в их конструкции различных элементов, приводящих к искажению законов скоростного и силового нагружения [2]. Следовательно, для повышения достоверности триботехнических испытаний конструкционных материалов и смазочных сред, проводимых на триботехнических устройствах испытания, необходимо обеспечить требуемый закон нагружения исполнительного органа при его определенном угловом положении в механизме при вращательном или возвратно-вращательном движениях при наличии внешнего силового динамического нагружения.

Для решения поставленной задачи проведено математическое моделирование динамических режимов вращательного и возвратно-вращательного нагружения торсионных систем с использованием методик и подходов, применяемых в теории автоматического управления. Определена передаточная функция привода вращения, для проведения дальнейшего анализа.

При формировании закона нагружения учтены погрешности, приводящие к искажению заданного закона движения исполнительного органа. Погрешности обусловлены динамическими свойствами электромеханических звеньев.

На основе составленной физической модели рис.1 передача энергии осуществляется от двигателя 1 через упругий элемент 2 к исполнительному органу 3. Для (определения момента на валу двигателя) воспользуемся балансом мощностей в механической части привода.

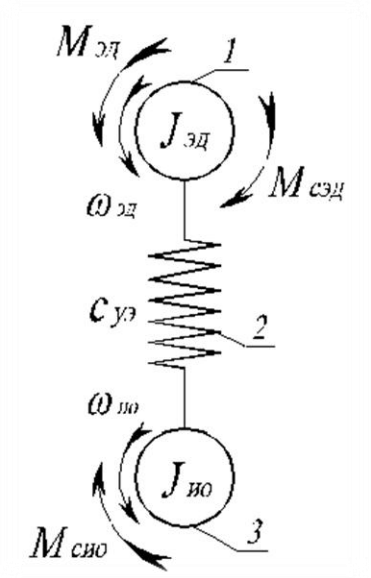


Рис. 1. Физическая модель привода главного движения.

Для теоретического исследования режимов работы узла скоростного динамического нагружения технической системы была построена блок-схема, изображенная на рис. 2.

Привод главного движения исполнительного органа состоит из блока управления, отслеживающего угловую скорость вращения и электродвижущий момент на валу электродвигателя через обратную

отрицательную связь, механического передаточного устройства – упругого элемента (торсиона) и исполнительного органа. Упругий элемент соединяет вал электродвигателя с валом исполнительного органа. В приводе предусмотрены обратные связи по отслеживанию угла поворота вала электродвигателя и углу закручивания упругого элемента (разности углов поворота между валом электродвигателя и исполнительного органа).

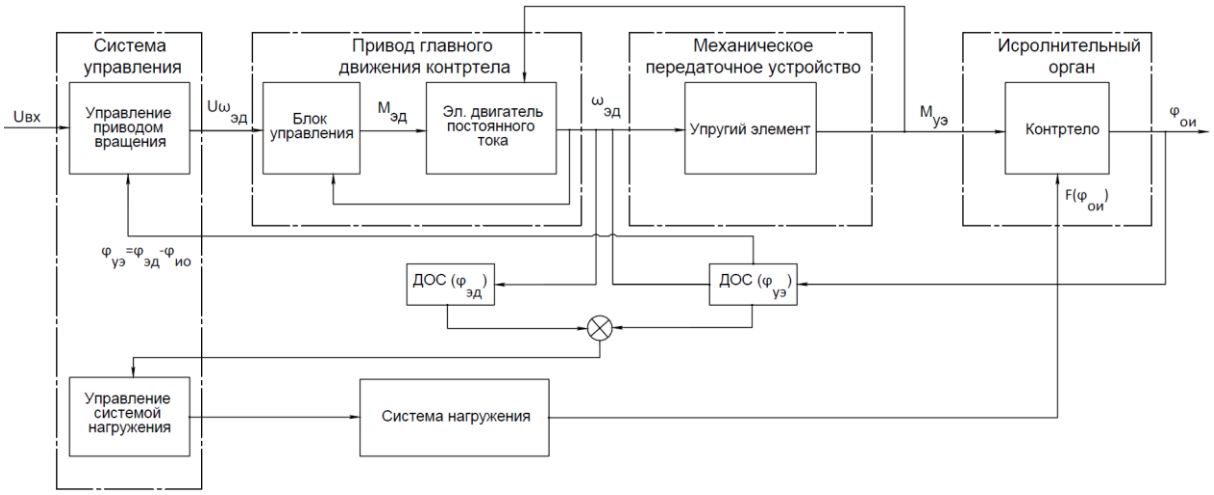


Рис. 2. Блок-схема узла динамического нагружения.

Система управления в процессе работы обеспечивает заданный закон изменения скорости вращения исполнительного органа технической системы и определяет действительный угол его поворота путем суммирования значений угла поворота вала электродвигателя и угла закручивания упругого элемента, при этом в требуемый момент времени обеспечивает приложение нормальной нагрузки на исполнительный орган. Таким образом, обеспечивается формирование заданного закона нагружения исполнительного органа при определенном его угловом положении.

В соответствии с блок-схемой была разработана структурная схема узла скоростного динамического нагружения, представленная на рис. 3. По этой структурной схеме производилось построение математической модели работы узда скоростного динамического нагружения реальной технической системы.

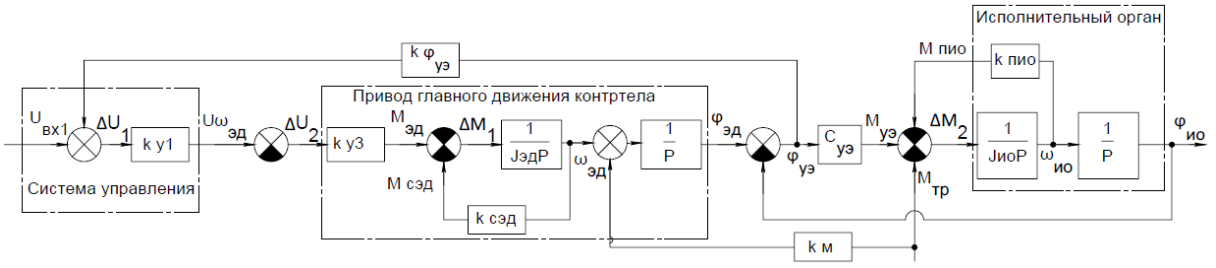


Рис. 3.Структурная схема узла динамического нагружения.

В соответствии со структурной схемой (рис.3) работа привода главного движения исполнительного органа будет описываться системой дифференциальных уравнений в виде

$$\begin{cases} T_1^2 \dfrac{d^2\varphi_{эд}}{dt^2} + 2\,\xi_1\,T_1 \dfrac{d\varphi_{эд}}{dt} + \varphi_{эд} = K_1\,U_{вх1} + \varphi_{ио} \\ T_2^2 \dfrac{d^2\varphi_{ио}}{dt^2} + 2\,\xi_2\,T_2 \dfrac{d\varphi_{ио}}{dt} + \varphi_{ио} = \varphi_{эд} + K_2\,M_{тр} \end{cases}, \qquad (1)$$

Из системы уравнений (1) можно получить две передаточные функции. Для получения первой примем $\varphi_{ио} \equiv 0$ в первом уравнении системы (1) и произведем замену оператора дифференцирования d/dt на p, тогда передаточная функция примет вид

$$W_1(p) = \frac{\varphi_{эд}}{U_{вх1}} = \frac{K_1}{T_1^2\ p^2 + 2\,\xi_1\,T_1\ p + 1}, \qquad 2)$$

и характеризует изменение $\varphi_{эд}$ от напряжения $U_{вх1}$ при отсутствии $\varphi_{ио}$.

Для получения второй – примем $\varphi_{эд} \equiv 0$ во втором уравнении системы (1) и произведем замену оператора дифференцирования d/dt на p, тогда передаточная функция примет вид

$$W_2(p) = \frac{\varphi_{ио}}{M_{тр}} = \frac{K_2}{T_2^2\ p^2 + 2\,\xi_2\,T_2\ p + 1}, \qquad 3)$$

Как видно искажение угловой скорости вращения вала электродвигателя $\omega_{эд}$, соответственно его угла поворота $\varphi_{эд}$ системы “электродвигатель – упругий элемент” в значительной степени определяется жесткостью упругого элемента $c_{уэ}$, негативное влияние которого компенсируется, согласно структурной схеме (рис. 3), благодаря обратной связи по углу закручивания упругого элемента $k_{фуэ}$. С другой стороны, искажение угловой скорости вращения исполнительного органа $\omega_{ио}$, соответственно его угла поворота $\varphi_{ио}$, и угла закручивания упругого элемента $\varphi_{уэ}$ системы “упругий элемент – исполнительный орган” в значительной степени определяется соотношение потерь на трение в исполнительном органе и жесткости упругого элемента $c_{уэ}$.

В данном работе интерес представляет задача определения влияния коэффициента обратной связи по углу закручивания упругого элемента при постоянстве его жесткости и потерь на терние в исполнительном органе на искажение угловой скорости вращения вала электродвигателя, соответственно его угла поворота, при различных режимах нагружения.

Для математического моделирования режимов нагружения написано приложение на базе программного обеспечения LabVIEV компании National Instruments (рис.4а, 4б).

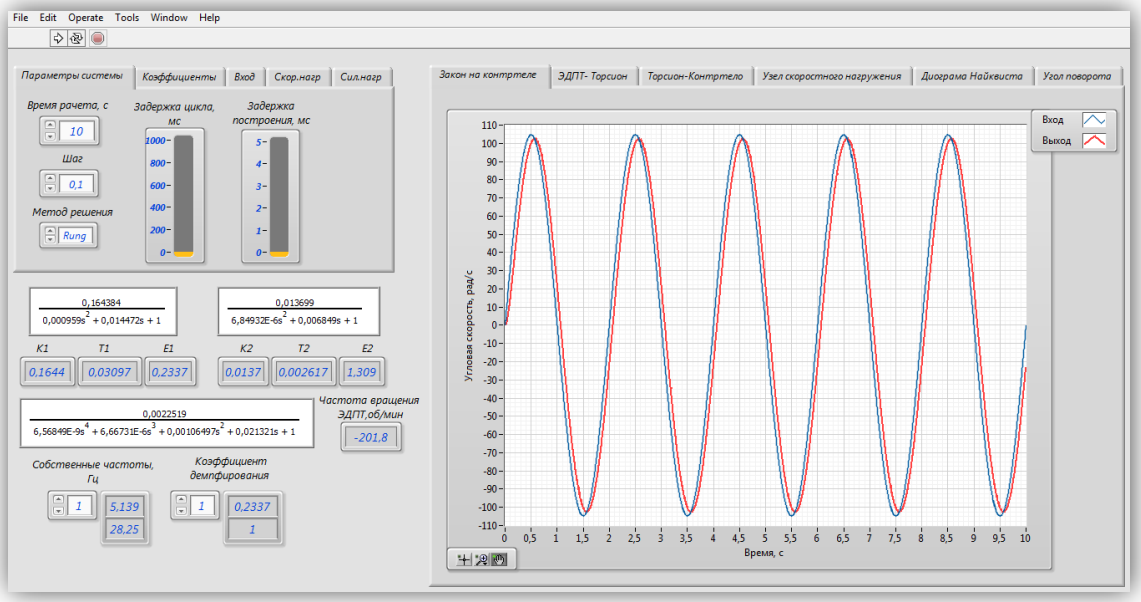


Рис. 4а. Интерфейс приложения.

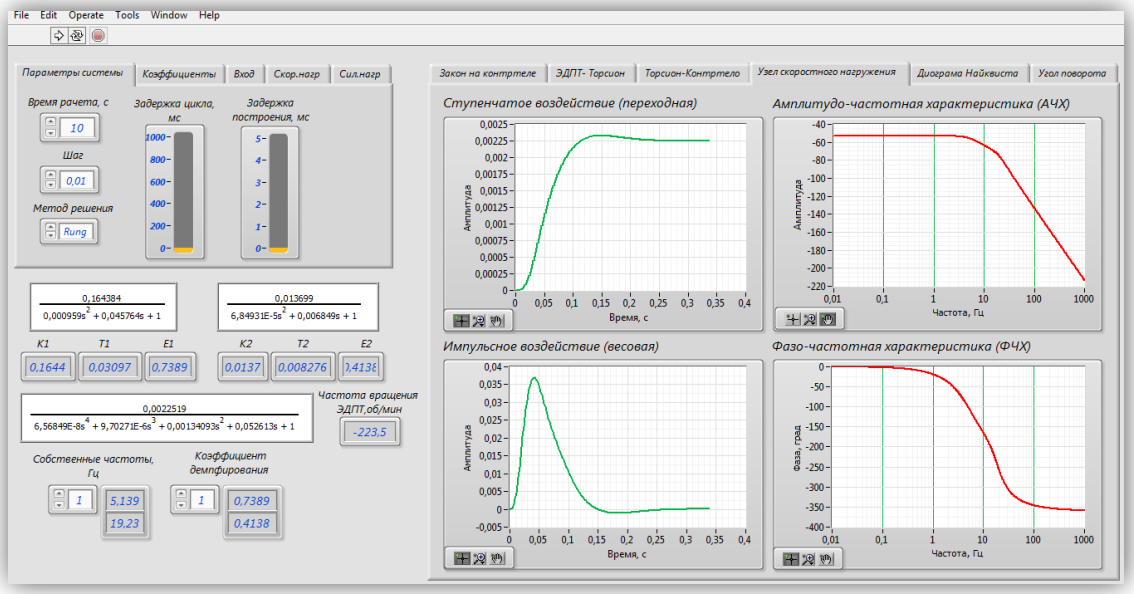


Рис. 4б. Интерфейс приложения.

В рамках разработанного приложения реализовано математическое моделирование узла динамического нагружения (рис.3). Приложение производит расчет и вывод на панель управления коэффициентов передаточной функции (рис. 4а), временные и частотные характеристики (рис. 4б).

На рисунке 5 приведен закон изменения угловой скорости входного сигнала и закон изменения угловой скорости на исполнительном органе.

Из графика видно, что изменение угловой скорости рабочего органа происходит с отклонением, наблюдается расхождение сигналов по фазе и амплитуде.

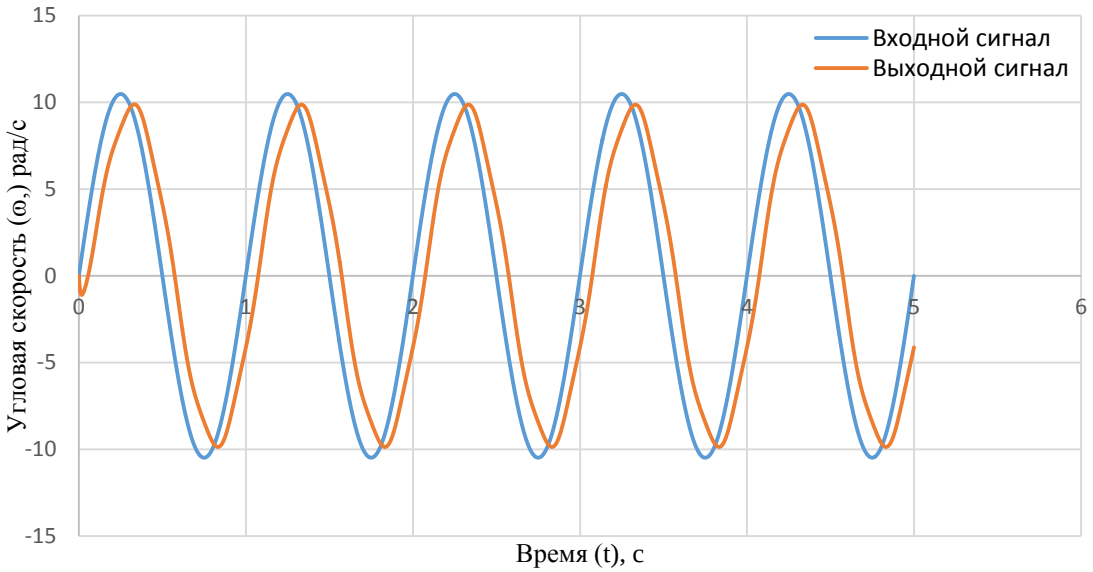


Рис. 5. Изменение угловой скорости рабочего органа во времени.

Для получения необходимого закона изменения угловой скорости рабочего органа во времени был определен закон поправки входного сигнала, позволяющий исключит все потери в приводе вращения исполнительного органа (рис.6).

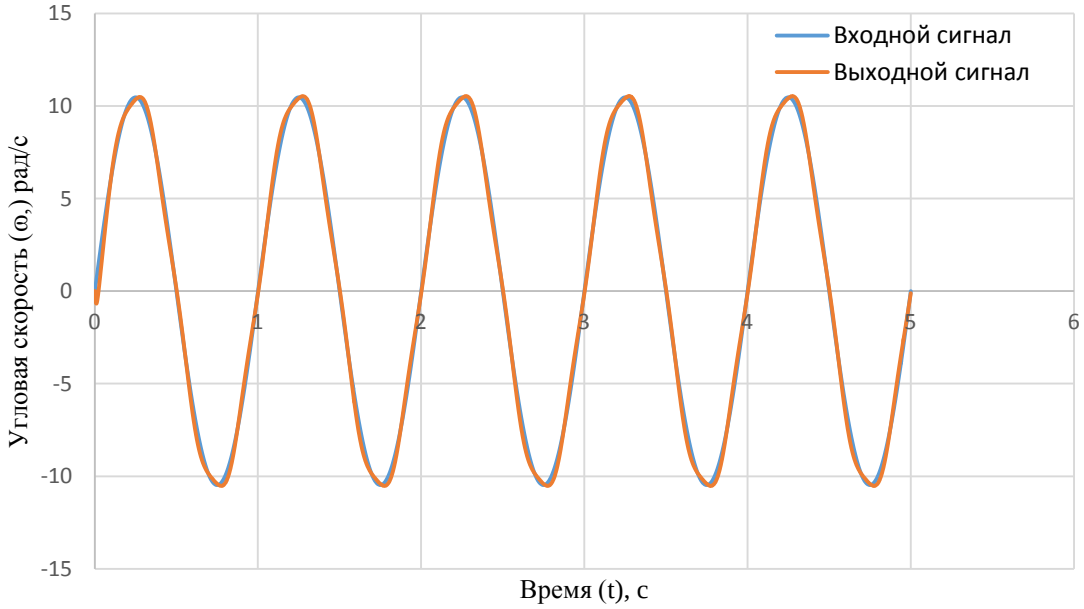


Рис. 6. Изменение угловой скорости рабочего органа во времени.

Исходный сигнал был сдвинут по фазе влево, с целью исключить запаздывание угловой скорости по фазе (рис.7).

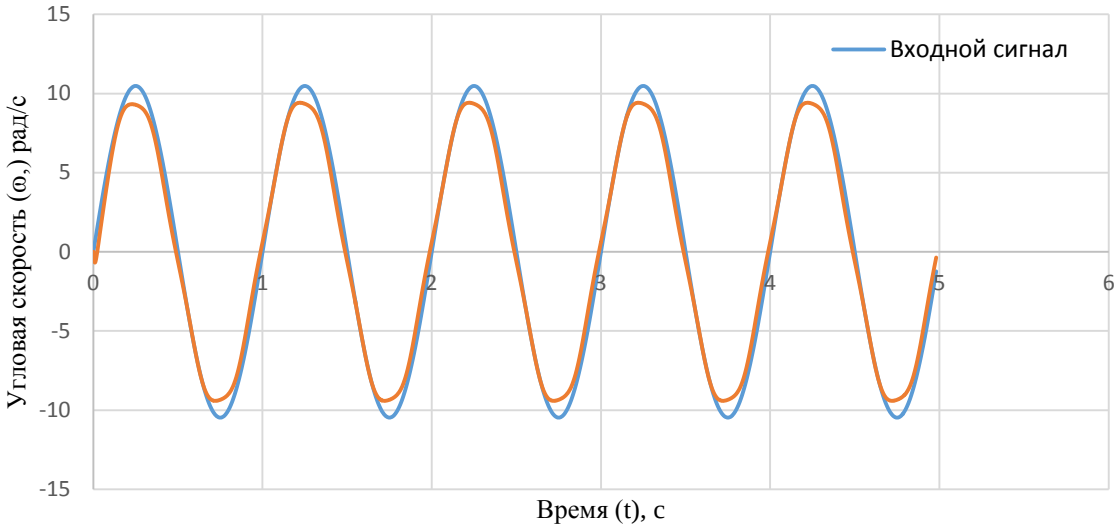


Рис. 7. Коррекция фазового сдвига.

Для выравнивания законов изменения угловой скорости по амплитуде коррекцию осуществили коэффициентом $k_{фуэ}$ – коэффициент обратной связи по углу закручивания упругого элемента (рис.8).

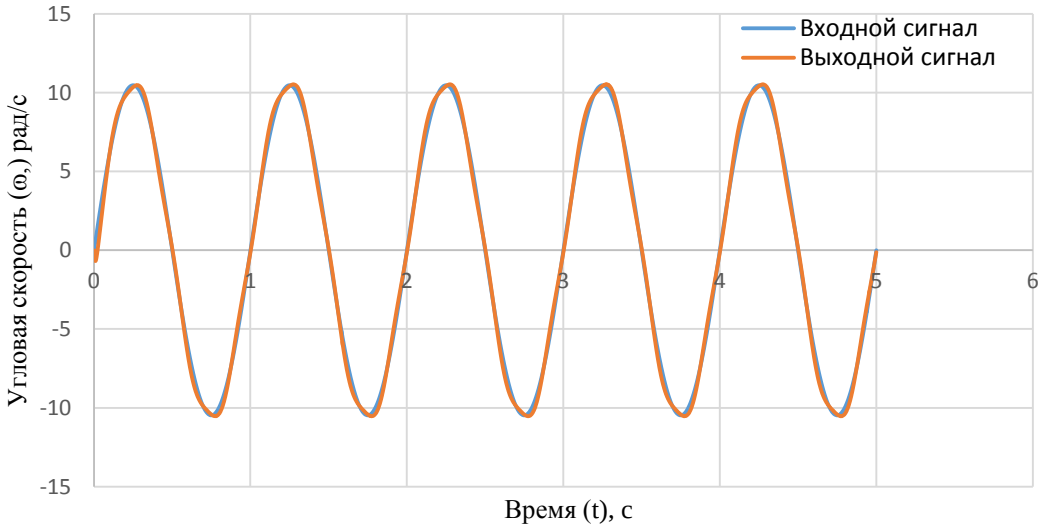


Рис. 8. Коррекция амплитуды коэффициентом $k_{фуэ}$.

Для торсионного узла динамического нагружения определена передаточная функция и составлена математическая модель, разработано специализированное приложение, позволяющее проводить математическое моделирование динамических режимов нагружения торсионных систем. Определены поправочные коэффициенты, позволяющие оптимизировать входной сигнал с учетом негативного влияния потерь в приводе вращения исполнительного органа.

Работа выполнялась в рамках проекта ТЕМПУС 4.1271.Т.2014 «Международная магистратура «Обеспечение эффективности технологических процессов жизненного цикла изделия»».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник/ Комбалов В.С.— М.: Машиностроение, 2007.— 384 с.
2. Буханченко С.Е. Автоматизированный комплекс для трибодиагностики пар трения вращательного и возвратно-вращательного действия в условиях, максимально приближенных к реальным. // Контроль. Диагностика. Научно-технический журнал российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике. – Москва: Изд-во Машиностроение, 2009, №7. С. 60-66.
3. Буханченко С.Е. Устройство регистрации крутящего момента при вращательном и возвратно-вращательном движениях исполнительного органа [Электронный ресурс]/ С. Е. Буханченко, К. Л. Пустозеров, А. В. Зуев // Контроль. Диагностика. — 2015. — № 6. — [С. 49-54].
4. Буханченко С.Е. Датчик крутящего момента / С. Е. Буханченко, А. Б. Пушкаренко, Н. В. Мартюшев //Современные техника и технологии: IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 апреля 2003 г.: труды: в 2 т. / Томский политехнический университет; отв. ред. А. С. Заворин. — 2003. —Т. 1. — С. 222-223.
5. Цейтлин Я. М. Упругие кинематические устройства. – Л.: Машиностроение, 1972. – 296 с., ил.
6. Арутюнян Н. Х., Абрамян Б. Л. Кручение упругих тел. – Л.: Лениздат, 1963. – 688 с., ил.
7. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н. А. ~ М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. ~ 544 с,: ил.
8. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Феедосова. – М.: ДМК Пресс. – 456 с.
9. Теория автоматического управления : учебное пособие: В 2-х частях / Под ред. А. А. Воронова. Ч. 2, Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. — Москва: Высшая школа, 1977. — 287 с.
10. Копылов, Игорь Петрович. Математическое моделирование электрических машин : учебное пособие / И. П. Копылов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Высшая школа, 1994. — 317 с

S.E. Bukhanchenko, V.V. Fedorov, A.P. Shcherbanskiy

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC MODES ROTATIONAL AND SWINGING LOADING OF THE TORSION SYSTEMS

all: Tomsk Polytechnic University, Russia

Abstract

On the basis of the developed mathematical model dynamic working hours of the torsion system realized on the basis of the servo-driver at the rotary and returnable and rotary movements of executive body are investigated. For providing the demanded law of rotation of executive body laws of the operating influence, considering influence of dynamic loading of the torsion system are defined.

Key words: automatic control, dynamic mode, the torsion system.

REFERENCES

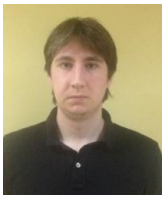
[1] Kombalov V.S. Methods and means of tests on friction and wear of structural and lubricants. Textbook. Moscow, Publishing House of the Engineering, 2007. 384 p. (rus.)
[2] Bukhanchenko S.E. Automated complex for tribodiagnostics friction pair rotary and swinging action in conditions as close to real. Control. Diagnostics. Scientific and technical journal Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics. - Moscow: Publishing House of Mechanical Engineering, 2009, №7. 60-66 p. (rus.)
[3] Bukhanchenko S.E. Torque registration device for rotational and reciprocating rotational motions. Bukhanchenko S.E., Pustozerov K.L., Zuev A.V. // Control. Diagnostics. - 2015. - № 6. 49-54 p. (rus.)
[4] Bukhanchenko, S.E.. Torque Sensor / Bukhanchenko S.E., Pushkarenko A.B., Martyushev N.V. // Modern equipment and technologies: IX International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists, Tomsk, 7-11 April 2003.: Works: in 2 parts / Tomsk Polytechnic University;. Ed Zavorin. A. S. - 2003 T. 1. 222-223 p. (rus.)
[5] Zeitlin Y.M. Resilient kinematic device. - L .: Engineering, 1972. - 296 p. (rus.)
[6] Harutyunyan N.H., Abramyan B.L. Torsion resilient bodies. - L .: Lenizdat, 1963. – 688 p. (rus.)
[7] J. Travis. LabVIEW for Everyone/ translation from English. Klushin N.A. -M .: DMK Press; PriborKomplekt, 2005. ~ 544 p. (rus.)
[8] Fedosov V.P., Nesterenko A.G. Digital Signal Processing in LabVIEW: tutorial / Ed. V.P. Feedosova. - M .: DMK Press. - 456 p. (rus.)
[9] Automatic Control Theory: Tutorial: In 2 parts / Ed. A.A. Voronov. Part 2, The theory of nonlinear and special automatic control systems. - Moscow: Higher School, 1977. – 287 p. (rus.)
[10] Kopylov I. P. Mathematical modeling of electric machines: a manual / I.P. Kopylov. - 2 edition. - Moscow: Higher School, 1994. – 317 p. (rus.)

УДК 621.791.14; DOI 10.1872/MMF-2016-115

Н.В. Винокуров[1], А.С.Боталов[2], Р.В. Кадулин[3], В.В. Карманов[4], М.Ю.Симонов[5]

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ ТОЛСТОСТЕННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ МАГНИЕВЫХСПЛАВОВ МЕТОДОМ ДВУСТОРОННЕЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

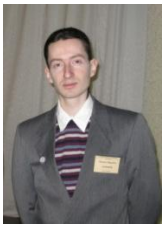
[1]Николай Владимирович Винокуров, младший научный сотрудник, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-193
E-mail: nikolay.vinokurov.pnrpu@gmail.com



[2]Александр Сергеевич Боталов, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: tka-11@mail.ru

[3]Родион Викторович Кадулин, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: tka-11@mail.ru

[4]Вадим Владимирович Карманов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь, Тел.: (342)2-198-249, E-mail: karmanovs@yandex.ru



[5]Михаил Юрьевич Симонов, младший научный сотрудник
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342) 2-198-021, E-mail: elferok@gmail.com

Аннотация

Исследована возможность применения технологии сварки трением с перемешиванием для толстостенных несущий конструкций летательных

аппаратов из магниевых сплавов. Разработана технология двусторонней СТП сплава МА2-1пч толщиной 80 мм. Проведены исследования микроструктуры и пористости сварного шва на электронном микроскопе и методом рентгеновской компьютерной томографии.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, магниевые сплавы, дефектоскопия, технология СТП, режимы сварки, несущие конструкции ЛА.

В современной промышленности все чаще находят применение магниевые сплавы. В недалеком будущем у сплавов на основе магния есть потенциал заменить алюминиевые сплавы и стали во многих отраслях машиностроения. В первую очередь это касается авиационной и ракетно-космической техники, где особенно важно снижение массы летательных аппаратов (ЛА). Деформируемые магниевые сплавы являются наиболее легкими из конструкционных материалов, при замене алюминиевых деталей уменьшение массы конструкции может составлять до 25% [1].

Помимо этого магниевые сплавы отличаются демпфирующими свойствами, что немаловажно для изделий авиа- и ракетостроения, испытывающих огромные вибрационные нагрузки. Примером использования магниевых сплавов является отечественные самолеты Ту-95МС и Ту-22 где их доля составляет 1550 и 820 кг соответственно [2], а также межконтинентальный стратегический бомбардировщик ВВС США Конвэр Б-36 - Миротворец с долей магниевых сплавов 10%, что составляет около 7,7 т [3,4]. Все космические программы: «Восток», «Восход», «Союз», «Луна», «Венера», выполнялись и выполняются с использованием деформируемых магниевых сплавов [1].

В настоящее время использование магниевых сплавов в промышленности ограничивается деталями двигателей и трансмиссий, корпусов электроприборов, обшивки самолетов, ходовой части автомобилей и др.

В данной статье рассматривается потенциальное применение магниевых сплавов для толстостенных несущих конструкций ЛА (лонжероны, шпангоуты), а также метод их соединения двусторонней сваркой трением с перемешиванием.

Для толстостенных несущих конструкций ЛА используются как разъемные (болтовые), так и неразъемные (сварные) методы соединения. И те и другие имеют свои недостатки, в первом случае это увеличение массы за счет дополнительных элементов, а во втором - большая трудоемкость и в некоторых случаях невозможность обеспечения достаточного качества сварных швов. Сварные соединения легких сплавов обладают рядом существенных недостатков. Алюминиевые и магниевые сплавы при сварке имеют склонность к горячему растрескиванию, появлению больших остаточных напряжения и газовых пор. Данные факторы существенно

снижают прочность соединений, сопротивление усталости и стойкость к вибрационным нагрузкам. В качестве решения проблемы, авторами статьи предлагается использование технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) для изготовления толстостенных несущих конструкций ЛА.

СТП является процессом соединения или сварки в твердом состоянии. В процессе сварки трением с перемешиванием вращающийся инструмент, содержащий пин (наконечник) и опорный бурт, внедряется или, вернее, погружается между двумя свариваемыми образцами, генерируя тепло за счет трения. После того как нагрев достигает требуемого уровня, инструмент перемещается вдоль места соединения [5]. Разогретый основной материал проходит вокруг инструмента, где под действием силы, приложенной опорным буртом инструмента происходит формирование шва (рис.1).

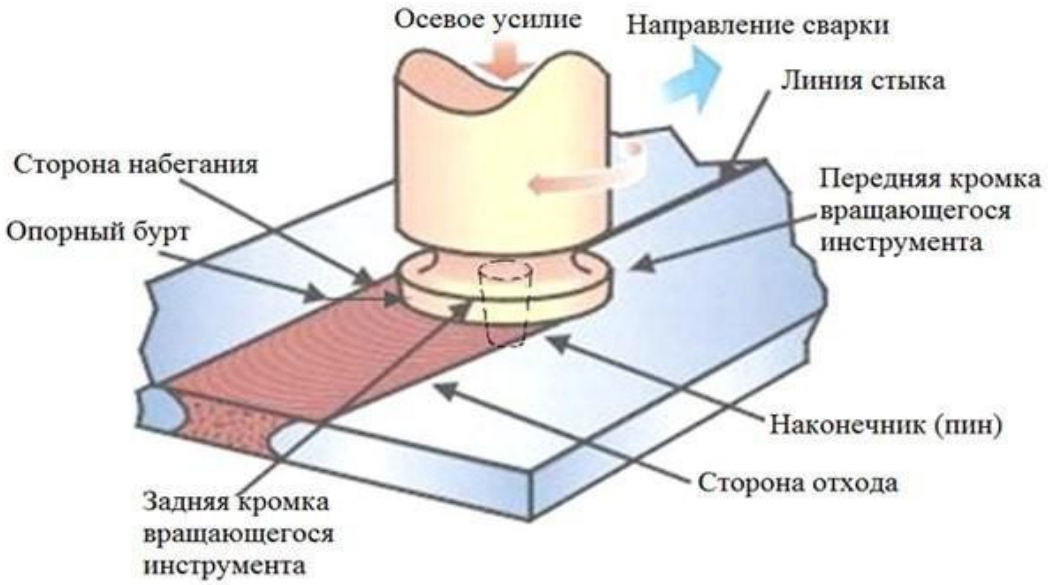


Рис.1. Принципиальная схема СТП

Макроструктура сварных соединений при сварке трением с перемешиванием характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным способами сварки плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра, которое содержит овальные концентричные кольца, различающиеся структурой [6]. Образование овальных колец связывается с особенностями перемешивания металла пином инструмента. В сварном соединении при СТП выделяют четыре зоны, которые схематически представлены на рис. 2. Непосредственно к зоне А (основной металл) примыкает зона В, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру

только под воздействием нагрева (зона термического влияния - ЗТВ). Зона С, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву - зона термомеханического влияния (ЗТМВ). Зона D – это ядро шва, где происходит динамическая рекристаллизация [6].

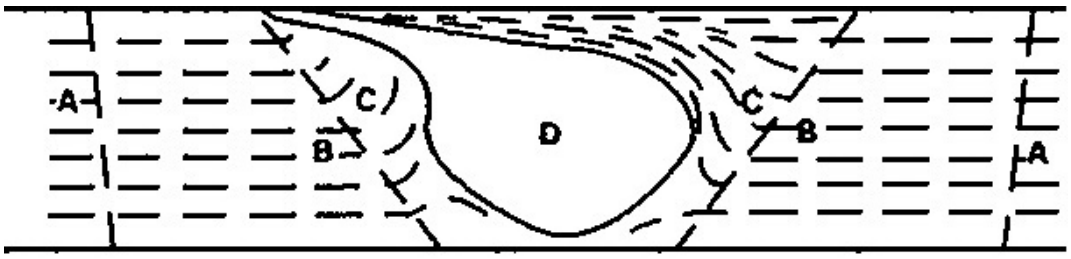


Рис. 2. Схема соединения, выполненного СТП: А – основной металл, В – зона термического влияния (ЗТВ), С – зона термомеханического влияния (ЗТМВ), D – ядро шва (сторона набегания слева)

Объектом проведенного исследования является деформируемый магниевый сплав МА2-1пч. На рис. 3 представлен химический состав сплава, определенный методом сканирующей электронной микроскопии (scanning electron microscopy, SEM).

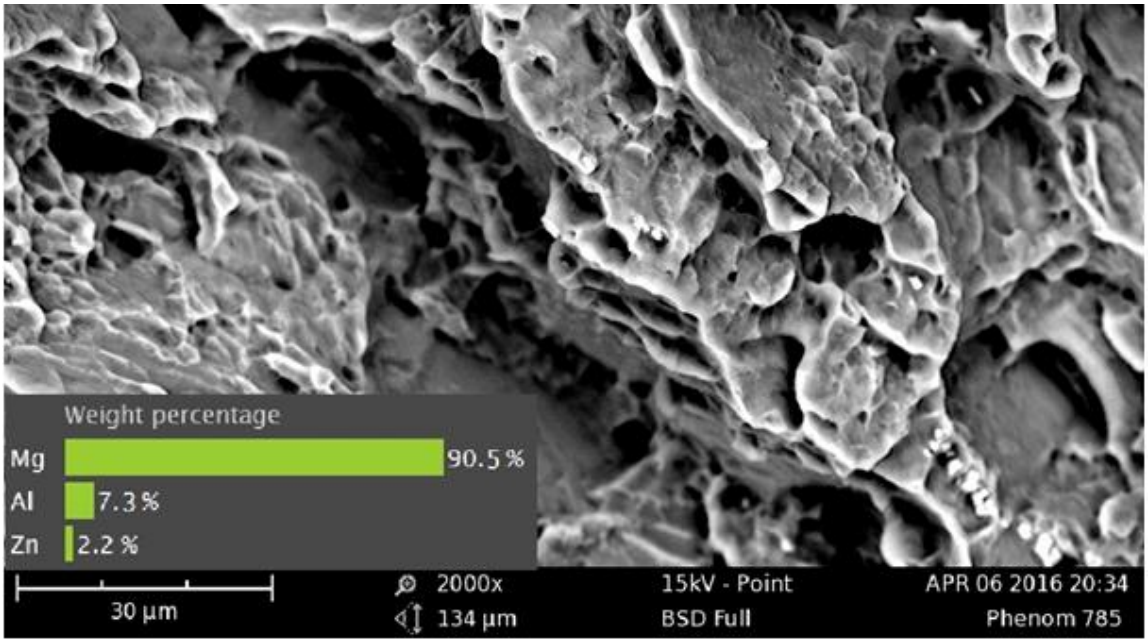


Рис. 3. SEM изображение поверхности разрушения сплава МА2-1пч и элементный состав сплава полученного с помощью EDS спектрометра

Наиболее близким зарубежным аналогом данного сплава по химическому составу и механическим характеристикам является сплав AZ61A (США), их сравнение представлено в таблице 1.

Обзор литературных источников показал, что исследовании в области СТП магниевых сплавов в России практически не велись, сообщается лишь о единственном исследовании СТП гранулированного сплава МА14 с различными схемами получения гранул и сравнение метода СТП с аргонодуговой сваркой [7]. В зарубежных источниках имеются данные по точечной сварке внахлест пластин из сплава AZ61A толщиной 2,2 мм [8]. В работе [9] говорится о сравнительном анализе СТП встык пластин толщиной 6 мм из сплава AZ61A с аргонодуговой сваркой. Существует ряд работ по исследованию сварных швов, выполненных СТП пластин толщиной 6 мм, на коррозионную стойкость в соляном тумане [10], а также на скорость разрушения под влиянием нескольких коррозионных факторов с различным уровнем воздействия [11]. Таким образом, литературный анализ выявил отсутствие исследований СТП толстостенных конструкций из магниевых сплавов.

Таблица 1. Сравнительная характеристика сплавов МА2-1пч и AZ61A.

Сплав	Химический состав					Механические характеристики			
	Mg	Al	Zn	Mn	др.	$\sigma_в$(МПа)	$\sigma_т$(МПа)	δ(%)	НВ
МА2-1пч	90,5	7,3	2,2	-	-	270-310	160-230	8-12	42
AZ61A	92,3	6,5	1,0	0,15	-	310	230	16	60

В данной работе была проведена двусторонняя сварка трением с перемешиванием полуфабрикатов из сплава МА2-1пч толщиной 80 мм (по 40 мм за один проход). Сварка была выполнена поперек линии стыка заготовок (рис.4), как имитация соединения несущих конструкций ЛА (лонжеронов, шпангоутов). Для входа и выхода инструмента были предусмотрены технологические прибыли. Разработка технологии проводилась на специализированной установке для СТП I-Stir PDS 5 (США), обладающей силовыми характеристиками, достаточными для сварки таких толщин (рис.5).

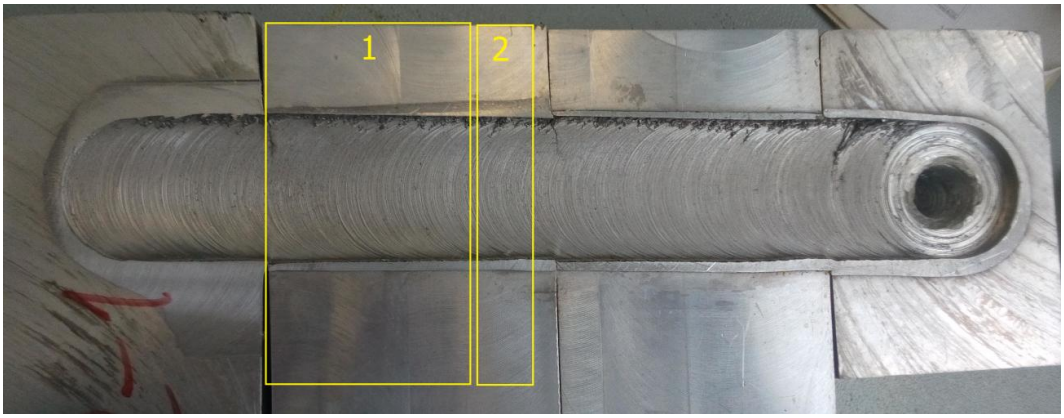


Рис.4. Внешний вид сварного шва. Схема вырезки образцов

Инструмент для СТП состоял из пина в форме усеченного конуса с тремя фасками и левосторонней резьбой и опорного бурта диаметром 41,3 мм с «левыми» спиральными канавками на торце. Данные конструктивные особенности необходимы, для перемещения пластифицированного металла в зоне контакта с опорным буртом к оси инструмента и вниз к корню шва, увеличения трения, лучшего перемешивания материала, уплотнения шва а также предотвращения появления излишнего облоя [12]. Материал инструмента: пин - хромо-никель-кобальтовый сплав MP159 (США), опорный бурт - высоколегированная инструментальная сталь H13(США).

Рис. 5. Установка для СТП I-Stir PDS 5 (США)

Разработка технологии велась в несколько этапов. На первом этапе отработки технологии сварка осуществлялась по компактному материалу с управлением по координате, т.е. по заданной глубине погружения инструмента. Это необходимо для определения диапазона осевого усилия, возникающего при сварке. После этого при помощи визуального осмотра определялся участок без видимых дефектов и с хорошим качеством поверхности, усилие на данном участке принималось за основу дальнейшей отработки режимов [12].

На втором этапе осуществлялась сварка с управлением по усилию. При таких условиях станок автоматически управляет заглублением инструмента при постоянном воздействии заданной, выбранной на первом этапе, осевой нагрузки. Во время второго этапа выбирается оптимальная скорость продольного перемещения инструмента и скорости его вращения.

В результате проведенных опытов, были установлены следующие ключевые технологические режимы сварки: осевое усилие F=30 кН, скорость вращения инструмента ω=330об/мин, скорость продольной подачи S=50 мм/мин, угол наклона инструмента относительно нормали составляет α=1,5° в противоположную от направления движения инструмента сторону.

На третьем этапе была произведена сварка на деталях-имитаторах элементов несущей конструкции ЛА, представляющих собой изготовленные на фрезерном станке полосы квадратного сечения со стороной 80 мм. Получившийся шов внешне был полностью бездефектным.

Для подтверждения отсутствия дефектов в материале шва из него были вырезаны два образца (рис.4, область 1 и область 2). На первом образце (рис.6) были проведены исследования для выявления внутренних дефектов методом рентгеновской дефектоскопии (рис. 8). Из второго образца был выполнен шлиф для изучения структуры на электронном микроскопе.

Компьютерная томография с разрешением 0,065 мм выявила наличие небольшого числа поверхностных (области 1 и 2 на рис.7) и внутренних пор размером 25...57 мкм в количестве 20 шт., цепочку пор длиной 4,8 мм (рис.7), а также единичное включение из более плотного материала размером 0,2 мм. Данные дефекты являются незначительными в масштабе сварного шва толщиной 80 мм.

На рис. 8 представлен шлиф образца выполненного методом двусторонней СТП. Для оценки пористости образца были сделаны более детальные снимки отмеченных областей (рис. 9): 1 - непосредственно под опорным буртом инструмента на расстоянии 5 мм от поверхности, 2 - ядро сварного шва на расстоянии 20 мм от поверхности, 3 - зона перекрытия двух проходов в корне шва, 4 - основной материал, 5 - сторона набегания. Площади областей 1,2,4,5 составляют 27,27 мм^2 каждая, площадь области 3 составляет 8,08 мм^2.

На рисунке 8 видно, что сварной шов в месте выреза образца не имеет дефектов в своей структуре, в материале шва полностью отсутствуют поры и другие включения. Все отмеченные зоны достаточно сильно схожи с основным материалом (рис.9), однако в них можно отметить некоторые особенности.

Отметим, что на рис.8 отчетливо видно светлую структуру с отсутствием пор в зоне 5, аналогичную картину можно увидеть на нижнем (втором) проходе. Данный эффект происходит в результате измельчения зерен материала и перемещению его к корню шва благодаря вращению и конструктивным особенностям инструмента. В данной области также наблюдается выстраивание частиц второй фазы в направлении вращения пина в соответствии с нанесенной на него резьбой, примечательно, что на стороне отхода эти частицы выстраиваются в обратном направлении благодаря наклону относительно нормали (рис. 10).

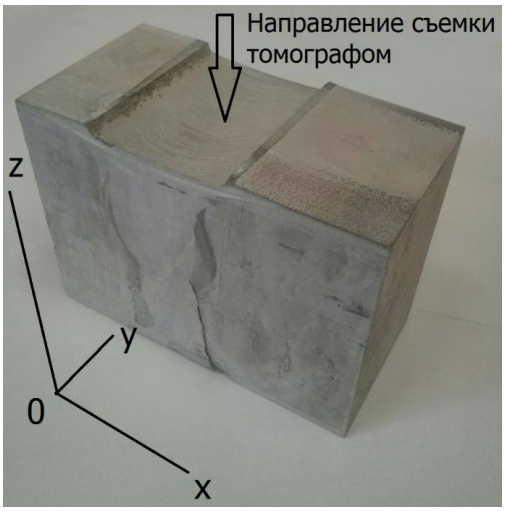


Рис. 6. Фото образца для исследования на компьютерном томографе

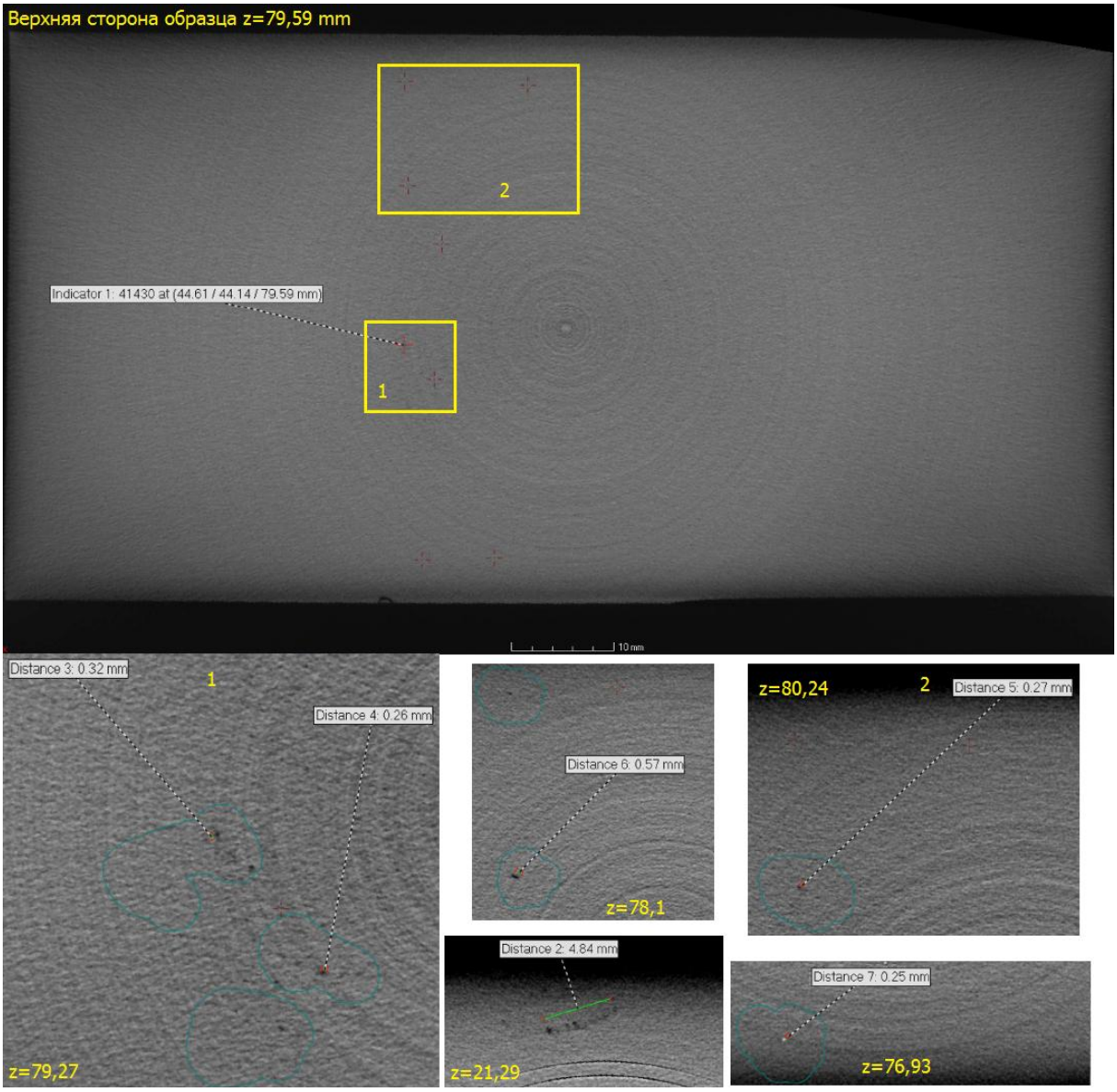


Рис. 7. Дефекты, выявленные на томографе

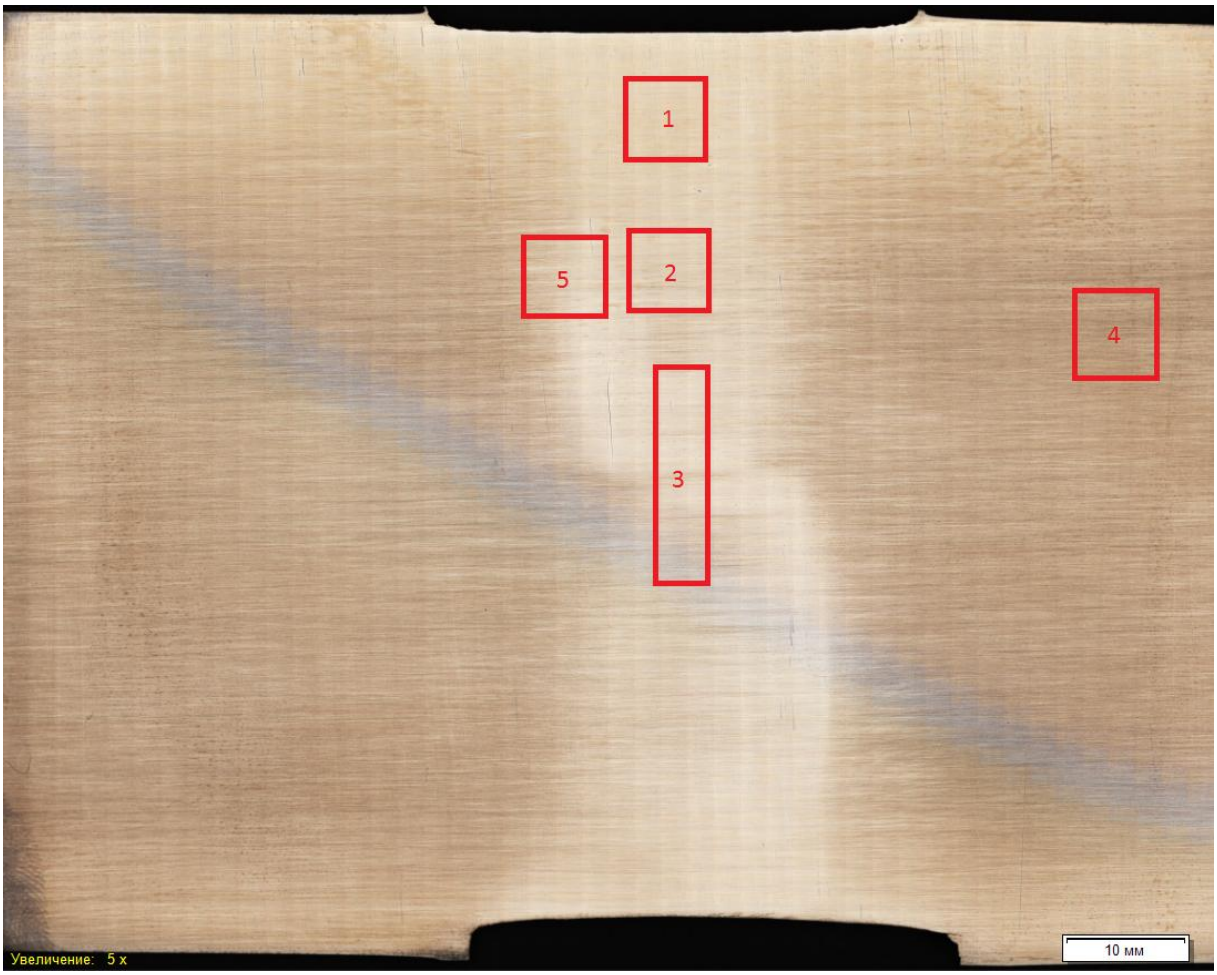


Рис. 8. Вид на шлиф образца с двусторонним сварным швом. Области детальных снимков отмечены условно и не в масштабе

В ядре шва близ зоны 2 было обнаружено растрескивание и выкрашивание материала частиц второй фазы с образованием достаточно больших каверн (рис.11).

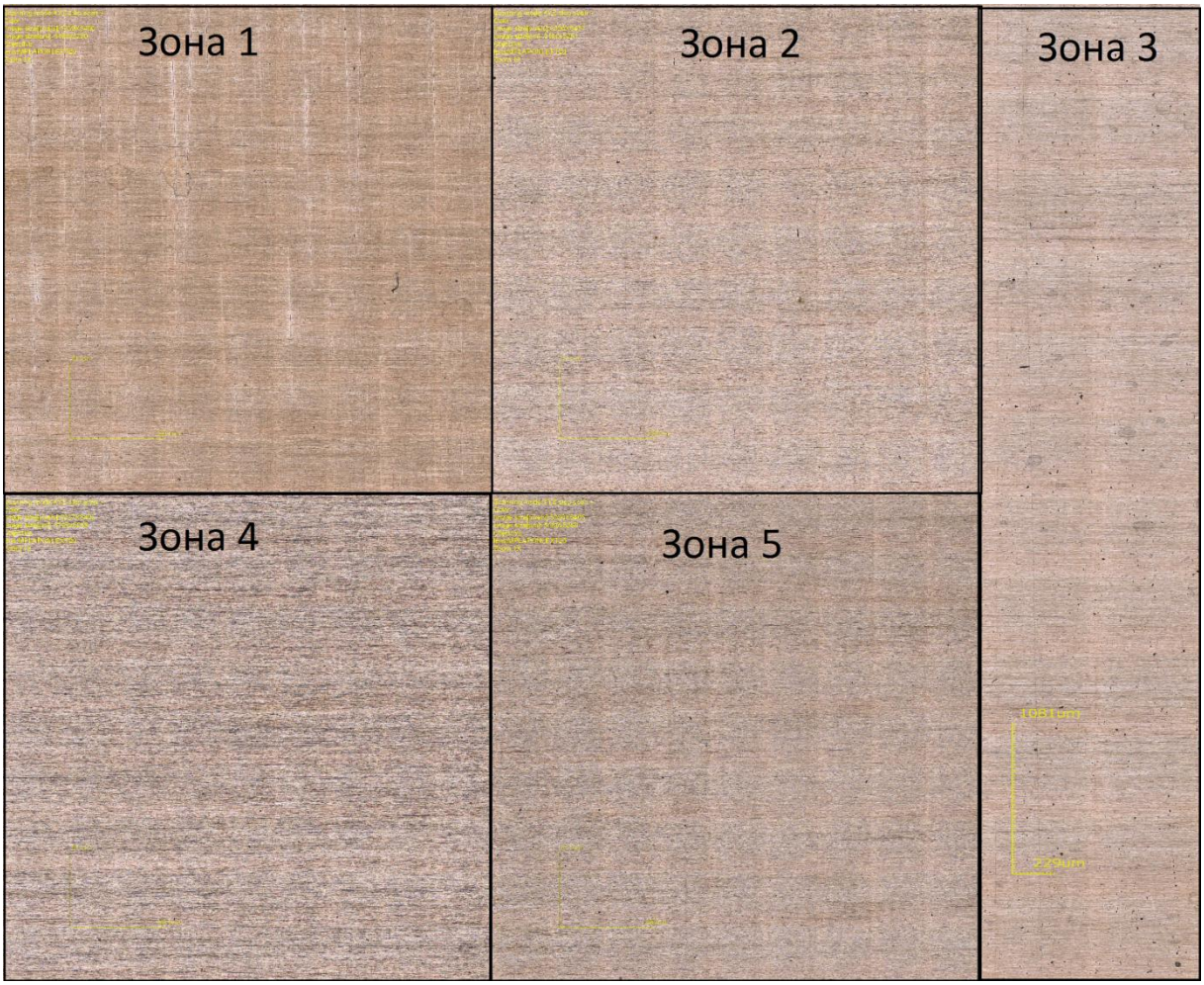


Рис. 9. Сшивки выделенных зон сварного шва

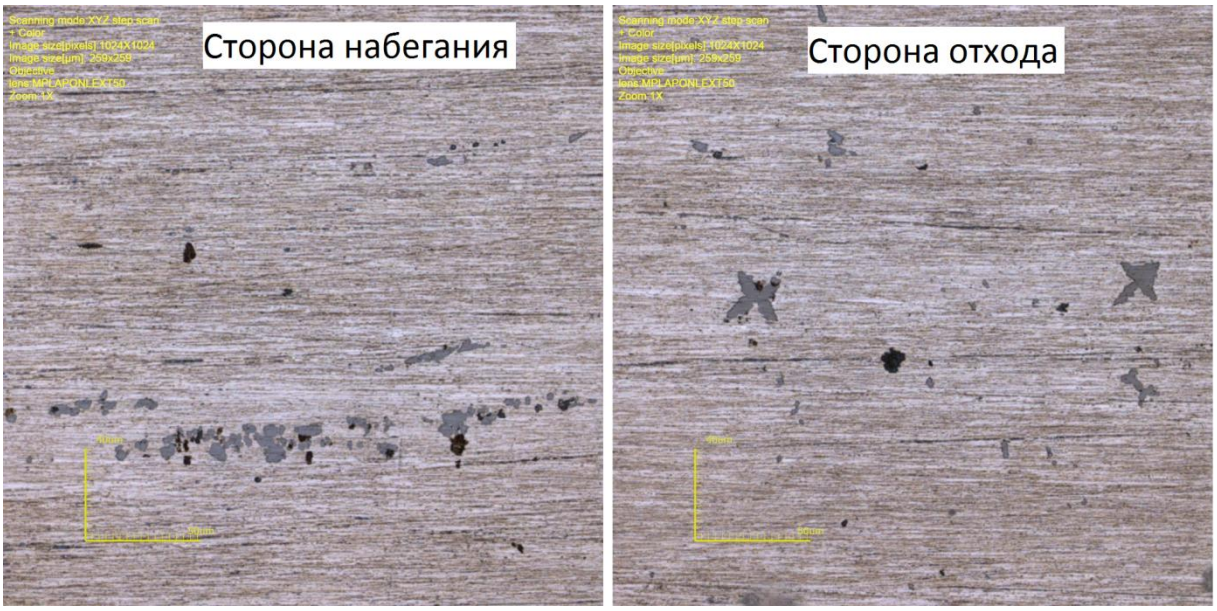


Рис. 10. Выстраивание в цепоку частиц второй фазы на стороне набегания и стороне отхода

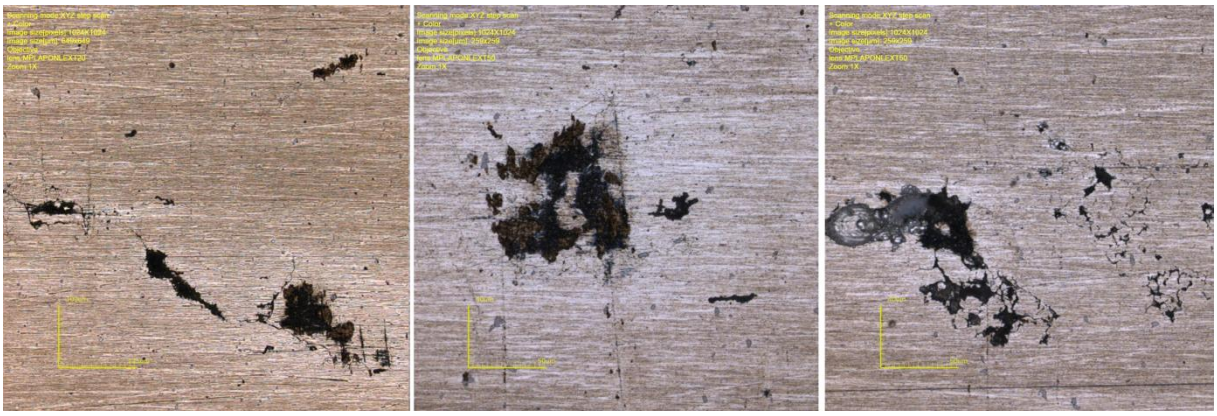


Рис. 11. Растрескивание и выкрашивание частиц второй фазы в ядре шва

В программном пакете для обработки изображений Siams700 была проведена количественная оценка частиц второй фазы для зон 2, 5 и 4. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Количественная оценка частиц второй фазы в сварном шве.

Зона	Черные частицы, абсолютная доля, %	Серые частицы, абсолютная доля, %
№2 Ядро шва	0,09	0,85
№5 Сторона набегания	0,12	0,55
№4 Основной материал	0,15	0,31

Авторами проведено исследование возможности применения сварки трением с перемешиванием для толстостенных несущих конструкций летательных аппаратов из магниевых сплавов. Данная возможность подтверждена, качество сварного шва доказано исследованиями с применением рентгеновской компьютерной томографии, и электронной микроскопии. Литературный обзор подтверждает новизну тематики и ее актуальность. Разработанная технология двусторонней СТП сплава МА2-1пч толщиной 80 мм имеет перспективу применения в авиа- и ракетостроении.

Дальнейшие работы предполагают более глубокое изучение микроструктуры сварного шва, определение размера зерен с применением травления, оптимизацию технологии и исследование влияния технологических режимов СТП на структуру и свойства шва, а также механические испытания

Авторы выражают благодарность аналитическому центру «Кристалл» и ОАО «Авиадвигатель» за помощь в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкова, Е.Ф. Магниевые деформируемые сплавы / Е.Ф. Волкова, В.В. Антипов // Все материалы. Энциклопедический справочник с Приложением «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». - 2012. - №5. - С. 20-27.
2. Перспективы и условия применения магниевых сплавов в самолетах ОАО «Туполев» / В.В. Садков [и др.] // Металлургия машиностроения. - 2007. - №4. С. 19-23.
3. Кузнецов К. B-36 — последний аргумент Америки / К. Кузнецов, Г. Дьяконов // «Авиация и время». - 2006. № 3. С. 4-20,37-40.
4. Don Pyeatt. Cold War Peacemaker. History of countdown and Convair B-36 / Don Pyeatt, Dennis R. Jenkins. - Specialty Press, North Branch, MN. 2010. 240 p.
5. Винокуров, Н.В. Разработка технологии сварки трением с перемешиванием пластин из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1 толщиной 3мм / Н.В. Винокуров, А.С. Нуртдинов, Вит.В. Карманов // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. междунар. науч.-практич. конф. /Юргинский технологический институт. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. - С.303-305.
6. Volpone M., Mueller S.M. Friction stir welding (FSW): le ragioni di un successo // Rivista Italiana della Saldatura. - 2005. - №1. - P. 23-30.
7. Апробирование сварки трением с перемешиванием магниевых сплавов / И.В. Мостяев [и др.] // Металлургия машиностроения. - 2012. - №2. С. 18-20.
8. Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds / Yuan-Ching Lin [etc] // Materials & Design. - Volume 35. - March 2012. - Pages 350–357.
9. Rajakumar S. Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study/ S. Rajakumar, V. Balasubramanian, A. Razalrose // Materials & Design. - Volume 49. - August 2013. - Pages 267–278.
10. Dhanapal A. Developing an empirical relationship to predict the corrosion rate of friction stir welded AZ61A magnesium alloy under salt fog environment/ A. Dhanapala, S. Rajendra Boopathyb, V. Balasubramanian // Materials & Design. - Volume 32, Issue 10. - December 2011. - Pages 5066–5072.
11. Dhanapal A. Influence of pH value, chloride ion concentration and immersion time on corrosion rate of friction stir welded AZ61A magnesium alloy weldments / A. Dhanapala, S. Rajendra Boopathyb, V. Balasubramanian // Journal of Alloys and Compounds. - Volume 523. - 15 May 2012. - Pages 49–60.
12. Винокуров, Н. В. Разработка технологии сварки трением с перемешиванием пластин из жаропрочного алюминиевого сплава 1151АТ толщиной 3 мм / Н.В. Винокуров, В.В. Карманов, А.Н. Волегов // Научно-технический вестник Поволжья. - 2013. - № 6. - С. 309-312.

N.V. Vinokurov, A.S.Botalov, R.V. Kadulin, V.V. Karmanov, M.Ju.Simonov

WELDABILITY ESTIMATION FOR THICK-WALLED AIRCRAFT SUPPORTING STRUCTURE OF MAGNESIUM-BASE ALLOY BY DOUBLE-SIDED FRICTION STIR WELDING

Abstract

Possibility of using friction stir welding technology for thick-walled aircraft supporting structure of magnesium-base alloy is researched. The double-sided FSW technology for 80 mm MA2-1pch alloy is developed. Research of weld joint microstructure and porosity is made by electron microscope and X-ray computer tomography method.

Key words: friction stir welding, magnesium-base alloy, defectoscopy, FSW technology, welding conditions, aircraft supporting structure.

REFERENCES

[1] Volkova, E.F. Magnesium deformable alloys / E.F. Volkova, V.V. Antipov // ALL THE MATERIALS. Encyclopedic handbook with monthly application "Comments to the standards, TC, certificates ». - 2012. - №5. - P. 20-27.

[2] The perspectives and conditions of magnesium alloys application in aircraft of JSC "Tupolev" / V. V. Sadkov [et al.] // Metallurgy of mechanical engineering. - 2007. - No. 4. P. 19-23.

[3] K. Kuznetsov. B-36 — the last argument of America / K. Kuznetsov, G. Dyakonov // «Aviation and time». - 2006. No. 3. p. 4-20, 37-40.

[4] Don Pyeatt. Cold War Peacemaker. History of countdown and Convair B-36 / Don Pyeatt, Dennis R. Jenkins. Specialty Press, North Branch, MN. 2010. 240 p.

[5] Vinokurov, N.V. Development of friction stir welding technology for plates of heat resistant aluminum alloy AK4-1 3mm thick / N.V. Vinokurov, A.S. Nurtdinov, Vit.V. Karmanov // Actual problems of modern mechanical engineering: papers collection of the International scientific-practical conference / Yurga Institute of technology. − Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2014. −P.303-305.

[6] Volpone M., Mueller S.M. Friction stir welding (FSW): le ragioni di un successo // Rivista Italiana della Saldatura. - 2005. - №1. - R. 23-30.

[7] Testing friction stir welding of magnesium alloys / I. V. Mustaev [et al.] // Metallurgy of mechanical engineering. - 2012. - №2. P. 18-20.

[8] Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds / Yuan-Ching Lin [etc] // Materials & Design. - Volume 35. - March 2012. - Pages 350–357.

[9] Rajakumar S. Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study/ S. Rajakumar, V. Balasubramanian, A. Razalrose // Materials & Design. - Volume 49. - August 2013. - Pages 267–278.
[10] Dhanapal A. Developing an empirical relationship to predict the corrosion rate of friction stir welded AZ61A magnesium alloy under salt fog environment/ A. Dhanapala, S. Rajendra Boopathyb, V. Balasubramanian // Materials & Design. - Volume 32, Issue 10. - December 2011. - Pages 5066–5072.
[11] Dhanapal A. Influence of pH value, chloride ion concentration and immersion time on corrosion rate of friction stir welded AZ61A magnesium alloy weldments / A. Dhanapala, S. Rajendra Boopathyb, V. Balasubramanian // Journal of Alloys and Compounds. - Volume 523. - 15 May 2012. - Pages 49–60.
[12] Vinokurov, N.V. Development of friction stir welding technology for plates of heat resistant aluminum alloy 1151AT 3mm thick/ N.V. Vinokurov, V.V. Karmanov, A.N. Volegov // Scientific and technological Volga region bulletin. - 2013. - № 6. - P. 309-312.

УДК 519. 876.5; DOI 10.1872/MMF-2016-116

Я.А. Катаев, Д.А. Глухов, В.Р. Туктамышев, С.А. Мельников, Н.А. Муханов

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАЗРАБОТКИ МОДУЛЕЙ ДАННЫХ ПРИ СОЗДАНИИ ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ В РАМКАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЯ

Яков Андреевич Катаев, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
E-mail: kataev.yakov@mail.ru.

Дмитрий Александрович Глухов, соискатель на степень кандидата наук
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
E-mail: gluhov_da@mz.perm.ru

Виталий Рафаилович Туктамышев, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-137, E-mail: tuktvr@gmail.com

Сергей Алексеевич Мельников, младший научный сотрудник, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-137, E-mail: sergey.melnikov.pnrpu@gmail.com

Николай Александрович Муханов, бакалавр, магистрант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
E-mail: muhanov-na@ya.ru

Аннотация

Сложность разработки, поддержки и восприятия эксплуатационной документации наукоемких изделий на бумажном носителе в современных условиях требует кардинального пересмотра технологии ее изготовления и хранения. Приведен опыт отечественных предприятий по разработке ин-

терактивных электронных технических руководств (ИЭТР). Предложен инструмент создания и управления ИЭТР, а также путь решения проблем, возникающих при создании и использовании интерактивных электронных документов.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, интерактивное электронное техническое руководство, ЖЦИ, ИЭТР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218)

Грамотная организация ведения инженерных данных является залогом эффективного управления номенклатурой и качеством выпускаемых изделий, как следствие эффективным средством повышения конкурентоспособности предприятия.

Для повышения эффективности процессов разработки, постановки на производство и производства продукции на любом наукоемком предприятии жизненно важной задачей является внедрение системы управления жизненным циклом изделия (ЖЦИ).

Одной из особенностей процесса эксплуатации сложных наукоемких изделий, является необходимость использования большого количества эксплуатационной документации (ЭД). Для упрощения работы с ЭД на некоторых предприятиях она разрабатывается в виде интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР). Также интерактивную документацию можно использовать в производстве изделий, при ремонте и модернизации, для обучения потребителей.

Создавать интерактивную электронную документацию можно с помощью различных инструментальных средств. Рассмотрим самые популярные отечественные программные продукты.

Отечественный программный комплекс Technical Guide Builder (TGBuilder) [1] компании «НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика» позволяет автоматизировать процессы создания, контроля, учета, выпуска и сопровождения различных видов электронной и бумажной технической документации на сложные изделия. Комплекс поддерживает стандарт S1000D. TGBuilder не требует от пользователя глубоких знаний языков SGML/XML. Позволяет использовать растровые и векторные изображения, аудио-, видео-контент, 3D-модели. Заявлена интеграция с PDM-системами. Используется в более чем 150 предприятиях, в том числе в ОАО «Туполев», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Мытищенский машиностроительный завод», ОАО «Автодизель».

Другой отечественный продукт Seamatica-ED [2] компании «Си Проект» предназначен для разработки и представления ЭД и ремонтной документации (РД) в интерактивном электронном виде. Система позволяет

создавать ИЭТР для последующего размещения на WEB-портале предприятия и/или распространения на электронных носителях. Seamatica-ED позволяет вести параллельную разработку ИЭТР различными подразделениями организации, в том числе и территориально разнесенными. Поддерживается стандарт S1000D. Позволяет использовать растровые и векторные изображения, аудио-, видео-контент, трехмерную анимацию (в формате VRML). Интеграция с PDM/PLM-системами не заявлена. Известно об использовании в судостроительной области – ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения», ОАО «ЦС «Звездочка».

Система разработки ИЭТР Vdocumentation [3] компании «Каталит» - это web-ориентированное программное обеспечение (ПО), предназначенное для разработки ЭД и РД в электронном виде. Система позволяет создавать ИЭТР для последующего размещения на WEB-портале предприятия и/или распространения на электронных носителях, а также создавать типографские макеты документов для последующей печати. Обеспечивает параллельную разработку ИЭТР, в том числе и между территориально разнесенными подразделениями. Система для своей работы использует только свободно распространяемое ПО с открытым исходным кодом, что позволяет самостоятельно вносить изменения. Vdocumentation позволяет использовать растровую графику, трехмерные модели, публикации (создаваемые в Cortona3D RapidAuthor). Интеграция с PDM/PLM-системами не заявлена. Известно об использовании на предприятиях отечественного ОПК, в частности ОАО «Арзамасский машиностроительный завод», ОАО «НПК «Уралвагонзавод».

Комплект программ НЕО ЭКСПЕРТ [4] фирмы «НЕОТЕК МАРИН» предназначен для создания систем информационного обеспечения интегрированной логистической поддержки сложных наукоемких изделий. В состав НЕО ЭКСПЕРТ входят продукты для информационной поддержки эксплуатации (например, ПО для просмотра ИЭТР), для создания информационных объектов (например, ПО для создания интерактивных 3D-моделей), для обучения и тренировки пользователей. Позволяет использовать растровые и векторные изображения, аудио-, видео-контент, 3D-модели. Система модульная и позволяет использовать сторонние продукты для создания контента. Интеграция с PDM/PLM-системами не заявлена. Заказчиками выступают предприятия судостроительной отрасли -ЦКБ МТ «Рубин», ОАО «Пролетарский завод» и др.

Компания «Cortona3D» предлагает эффективный инструментарий для разработки интерактивных 3D/2D-каталогов деталей, руководств по обслуживанию и ремонту, интерактивных технологических карт, инструкций по сборке оборудования и выполнению других сложных процедур, обучающих курсов – Cortona3D RapidAuthor [5]. RapidAuthor позволяет использовать уже существующие CAD-, PDM- и ERP-данные и создавать единую среду для подготовки 2D/3D-графики и текстовых описаний. По-

зволяет использовать растровые и векторные изображения, аудио-, видео-контент, 3D-модели. Поддерживает стандарты ATA, S1000D, DITA, ISO. Существует интеграция с PLM-системой Siemens Teamcenter. Используется многими отечественными компаниями, в том числе ОАО «Камаз», ООО «ККУ «Концерн «Тракторные заводы», ОАО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля».

Программные продукты Libroplanta [6] компании «Либропланта» предназначены для разработки, издания и сопровождения документации. Поддерживается только стандарт S1000D. Позволяют использовать растровые и векторные изображения, аудио-, видео-контент, анимацию. Интеграция с PDM/PLM-системами не заявлена. Об использовании неизвестно.

Однако наравне с многообразием программных продуктов для создания ИЭТР, существуют различные подходы к разработке ИЭТР. Рассмотрим опыт нескольких отечественных предприятий.

В ОАО «Адмиралтейские верфи» провели работы по замене традиционной бумажной ЭД на ИЭТР первого и второго типов, которое создается на основе ранее разработанной бумажной документации [7].

В ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения» ИЭТР дополняет комплект традиционной ЭД и ремонтной документации. ИЭТР создается на основе ранее разработанной традиционной эксплуатационной документации с использованием 3D-моделей, разработанных на основе бумажной конструкторской документации [8].

В ОАО «Невское проектно-конструкторское бюро» проанализировали опыт предприятий, выделили проблемы и разработали собственную концепцию разработки ЭД, которая подразумевает разработку ЭД сразу в виде ИЭТР [9].

ОАО «Автодизель» [10] и ОАО «Мытищенский машиностроительный завод» [11] поддерживают идею ОАО «Невское проектно-конструкторское бюро» – ЭД создается с использованием 3D-моделей сразу в виде ИЭТР.

Таким образом в последнее время предприятия начали активно использовать концепцию создания ЭД сразу в виде ИЭТР на основе 3D-моделей. При этом наблюдается снижение сложности создания ЭД с использованием ранее разработанных 3D-моделей и повышение эффективности эксплуатации изделий при использовании интерактивной ЭД. Однако у данного подхода существуют проблемы, связанные с трудоемкостью создания контента для ИЭТР и сложностью внесения изменений. А для предприятий оборонно-промышленного комплекса существуют ограничения, связанные с особенностями продукции.

В качестве решения проблем предлагается использование ассоциативности ИЭД с 3D-моделями, автоматизации создания мультимедийного контента, а также полный переход к разработке эксплуатационной документации сразу в электронном виде и получение информации для разра-

ботки непосредственно из электронной модели и электронной структуры, хранящихся в едином информационном пространстве предприятия.

Оригиналом и подлинником эксплуатационной документации при этом становится электронный документ. Подобный подход к созданию эксплуатационной документации требует разработки новых методик преподавания и изменения методов организации инженерной деятельности.

В настоящее время специалистами ЗАО «Специальное конструкторское бюро» ПАО «Мотовилихинские заводы» в кооперации со специалистами Пермского национального исследовательского политехнического университета разработаны техническое описание и инструкция по эксплуатации в виде иерархически-структурированных электронных документов [12], а также электронный каталог изделия [12]. Ведется работа по созданию комплекса технологий по проектированию, изготовлению, управлению производством и эксплуатации инновационных наукоемких изделий. Данный комплекс позволит разрабатывать эксплуатационную документацию сразу в виде интерактивного электронного руководства и позволит получать информацию для разработки непосредственно из единой информационной системы предприятия.

При разработке ИЭТР обостряется проблема поддержания ее актуальности в силу того, что разработка интерактивной документации сложнее, чем традиционной. Поэтому встает задача комплексной автоматизации создания мультимедийного контента и наполнения ИЭТР, а также полный переход к разработке ЭД сразу в виде ИЭТР и получение данных для разработки и поддержки непосредственно из информации и ассоциативной трёхмерной электронной модели, хранящихся в ЕИП предприятия.

В то же время необходимо определить область рационального применения технологии ИЭТР. Не всегда применение ИЭТР является обоснованным.

Для наиболее точного выявления области рационального применения разработанной технологии необходимо проанализировать основные составляющие затрат в процессе разработки и сопровождения эксплуатационной документации разных видов.

ЭД состоит из модулей данных. Модуль данных (МД) – совокупность взаимосвязанных технических сведений по эксплуатации изделия, относящихся к определенной тематике и не допускающих дальнейшего их дробления на составные части, которая содержит текст и мультимедийный контент [13].

Рассмотрим:

E_1 – затраты на разработку традиционной ЭД на бумажном носителе;

E_2 – затраты на разработку ИЭТР с использованием общей базы данных (БД);

E_1^{3D} – затраты на разработку традиционной ЭД с использованием трехмерных электронных моделей;

E_2^{3D} – затраты на разработку ИЭТР с использованием общей БД и трехмерных электронных моделей;

E_3 – затраты на разработку ИЭТР с использованием ЕИП и ассоциативных трехмерных электронных моделей.

Затраты на разработку ЭД традиционного вида для различных модификаций изделий, в пределах одного типа имеют вид [14 –15]:

$$E_1 = \overline{S_{МД}} \times \sum_{i=0}^{K} n_i \ ,$$

где $\overline{S_{МД}}$ – средние затраты на разработку одного модуля данных;

$n_i \in \mathbb{N}$ – общее количество МД в ЭД на изделие в i-ой модификации;

K – количество модификаций.

Затраты на аналогичную разработку интерактивной ИЭТР с использованием общей БД имеют вид [14 – 15]:

$$E_2 = \overline{S_{МД}} \times n_0 + \overline{S_{МД}} \times \sum_{i=1}^{K} n_i - \overline{S_{МД}} \times \sum_{i=1}^{K} (n_i \times L_i) \ ,$$

где n_0 – количество МД в базовой модификации изделия;

$L_i \in \mathbb{R}$ – доля МД для i-ой модификации, которые заимствуются из базовой (степень унификации):

$$L_i = \frac{m_i}{n_0} \ ,$$

где m_i – количество заимствованных МД из базовой конфигурации в i-ой модификации.

Допустим, что

1. Количество МД n в среднем не изменяется для всех модификаций.
2. Степень унификации L в среднем одинакова для всех модификаций.

Получим:

$$E_1 = \overline{S_{МД}} \times n \times (1 + K) \ ,$$
$$E_2 = \overline{S_{МД}} \times n + \overline{S_{МД}} \times n \times K - \overline{S_{МД}} \times n \times K \times L \ ,$$
$$E_2 = \overline{S_{МД}} \times n \times (1 + K - K \times L) \ ,$$

где $n \in \mathbb{N}$ – среднее количество МД в ЭД на изделие для всех модификаций в пределах одного типа изделий;

$L \in \mathbb{R}$ – средняя доля заимствований МД из ЭД на базовую модификацию.

Рассмотрим затраты на разработку ЭД с использованием трехмерных

электронных моделей.

Разложим средние затраты на разработку одного модуля данных на компоненты:

$$\overline{S_{\text{МД}}} = \overline{S_{\text{МД}}^{P}} + \overline{S_{\text{МД}}^{3D}} \ ,$$

где: $\overline{S_{\text{МД}}^{P}}$ – затраты на компонент модуля данных, содержащий текстовые и прочие данные, не связанные с трехмерными электронными моделями;

$\overline{S_{\text{МД}}^{3D}}$ – затраты на компонент модуля данных, содержащий мультимедийные и другие данные, связанные с трехмерными электронными моделями.

Получаем:

$$\text{Е}_1^{3D} = \left(\overline{S_{\text{МД}}^{P}} + \overline{S_{\text{МД}}^{3D}}\right) \times n \times (1 + K)$$
$$\text{Е}_2^{3D} = \left(\overline{S_{\text{МД}}^{P}} + \overline{S_{\text{МД}}^{3D}}\right) \times n \times (1 + K - K \times L)$$

Так как мультимедийный контент создается автоматизировано, затраты $\overline{S_{\text{МД}}^{3D}}$ не должна учитываться в стоимости разработки ЭД. Но пренебрегать ей нельзя, так она вносит ощутимый вклад.

$$\text{Е}_1^{3D} = (1 - \mu) \times \overline{S_{\text{МД}}} \times n \times (1 + K) \ ,$$
$$\text{Е}_2^{3D} = (1 - \mu) \times \overline{S_{\text{МД}}} \times n \times (1 + K - K \times L) \ ,$$

где $\mu \in \mathbb{R}$ – средняя доля затрат на мультимедийные данные, созданные на основе трехмерных моделей, в МД:

$$\mu = \frac{\overline{S_{\text{МД}}^{3D}}}{\overline{S_{\text{МД}}}}$$

Рассмотрим затраты на разработку ИЭТР с использованием ассоциативных трехмерных электронных моделей и ЕИП.

$$\text{Е}_3 = (1 - \mu) \times \overline{S_{\text{МД}}} \times n \times (1 + K - K \times L) = \text{Е}_2^{3D}$$

Таким образом затраты на разработку ИЭТР с использованием ЕИП и ассоциативных трехмерных моделей равны затратам на разработку ИЭТР с использованием общей БД и трехмерных электронных моделей.

Однако стоит отметить преимущества использования ассоциативных трёхмерных электронных моделей:

- упрощение создания мультимедийного контента для наполнения МД;
- повышение качества ЭД;
- автоматическое/автоматизированное обновление мультимедийных данных, созданных на основе ассоциативных трехмерных моделей.

Следовательно, одно из преимуществ использования ассоциативных

электронных моделей состоит в снижении затрат на изменение документации.

Таким образом, стоит острая задача по разработке научно обоснованной методологии определения оптимальных путей внедрения и развития систем управления ЖЦИ для уменьшения затрачиваемого на КТПП времени, уменьшения ошибок в работе и повышения качества выпускаемой продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт поддержки системы TG Builder [Электронный ресурс]. 1999-2013.
2. URL: http://tgb.cals.ru/ (дата обращения: 25.05.2015)
3. Редактор интерактивных электронных технических руководств Seamatica-ED. Программы линейки Seamatica - инновационные инструменты для разработки ИЭТР. Seamatica-ED, Seamatica-SE Desktop и Workgroup [Электронный ресурс]. URL: http://www.seamatica.ru/seamatica-ed.html (дата обращения: 25.05.2015)
4. Система разработки ИЭТР [Электронный ресурс]. 2002-2015. URL: http://www.katalit.ru/index.php/2011-06-27-10-43-55/2011-06-27-10-45-51/sistema-razrabotki-ietr (дата обращения: 25.05.2015)
5. НЕО ЭКСПЕРТ.ИЭТР | Инжиниринговая компания НЕОТЕК МАРИН [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://neotech-marine.ru/neo-expert-ietr (дата обращения: 25.05.2015)
6. Cortona3D RapidAuthor – иновационное решение для разработки эксплуатационной документации [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://www.cortona3d.com/ru/rapidauthor (дата обращения: 25.05.2015)
7. Libroplanta - Разработка, издание и сопровождение документации [Электронный ресурс]. 2015. URL: http://www.libroplanta.com/ (дата обращения: 25.05.2015)
8. Резник Б.Л., Ступенков С.В. «Опыт разработки «Программного комплекса интерактивной электронной эксплуатационной документации» для ПЛ «Санкт-Петербург» // Рациональное управление предприятием. – 2010 – № 3 – с. 18-19
9. Киюц А.В., Курапова Е.В. «Внедрение CALS-технологии на этапах разработки и выпуска интерактивного электронного технического руководства по универсальному комплекту средсв погрузки для НК пр.22350» // Старт в будущее: Научн.-технич. конф. Труды второй научн.-технич. конф. молодых специалистов / ОАО "КБСМ". - СПб., 2011г. – с. 209-213
10. Плоткин И.Э. Интерактивные электронные технические руководства. Опыт разработки // Рациональное управление предприятием. – 2011 – № 3 – с. 16-18
11. Комиссаров А.В. «Система разработки эксплуатационной, ремонтной и сервисной документации в ОАО «Автодизель» // CAD/CAM/CAE Observer. – 2012 – № 6 – с. 40-41
12. Фетисов И.Л., Снятков А.В. «Разработка электронной эксплуатационной до-

кументации на сложное изделие на примере изделий ОАО «ММЗ» // CAD/CAM/CAE Observer. – 2014 – № 4 – с. 63-67
13. Публичный отчет «Создание высокотехнологичного производства на основе современных методов проектирования изделий и гибких производственных процессов прецизионной обработки материалов». – Пермь: РЦИ ПНИПУ. – 2012. – 28 с.
14. ГОСТ 2.601-2013. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. – Введ. 01.06.2014. – М.: Стандартинформ, 2014.-32 с.
15. Галин И.Ю. Автоматизация создания интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР): автореф. дис. …канд. техн. наук: 05.13.06 / И.Ю. Галин; Нац. исслед. ядерн. ун-т. (НИЯУ) – М., 2011. – 17 с.
16. Веретехина С.В. Методика разработки интерактивной электронной эксплуатационной документации для наукоёмких изделий отрасли связи и информатизации: автореф. дис.

YA.A. Kataev, D.A. Gluhov, V.R. Tuktamyshev, N.A. Muhanov, S.A. Mel'nikov

INTENSIFICATION OF DATA MODULES DEVELOPMENT IN INTERACTIVE ELECTRONIC TECHNICAL MANUAL CREATING AS PART OF PRODUCT LIFE CYCLE MANAGEMENT

all: Perm National Research Polytechnic University, Russia.

Abstract

The complexity of the development, support and maintenance documentation perception of high-tech products on the paper in the current environment requires a radical revision of the technology of its manufacture and storage. The experience of domestic enterprises to develop interactive electronic technical manuals (IETM) is given. The tool for creating and managing IETM and the way of solving problems that arise in the creation and use of interactive electronic documents is proposed.

Key words: product life cycle, interactive electronic technical manuals, PLC, IETM.

REFERENCES

[1] Sajt podderzhki sistemy TG Builder [EHlektronnyj resurs]. 1999-2013. URL: http://tgb.cals.ru/ (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[2] Redaktor interaktivnyh ehlektronnyh tekhnicheskih rukovodstv Seamatica-ED. Programmy linejki Seamatica - innovacionnye instrumenty dlya razrabotki IEHTR. Seamatica-ED, Seamatica-SE Desktop i Workgroup [EHlektronnyj resurs]. URL: http://www.seamatica.ru/seamatica-ed.html (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[3] Sistema razrabotki IEHTR [EHlektronnyj resurs]. 2002-2015. URL:

http://www.katalit.ru/index.php/2011-06-27-10-43-55/2011-06-27-10-45-51/sistema-razrabotki-ietr (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[4] NEO EHKSPERT.IEHTR | Inzhiniringovaya kompaniya NEOTEK MARIN [EHlektronnyj resurs]. 2015. URL: http://neotech-marine.ru/neo-expert-ietr (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[5] Cortona3D RapidAuthor – inovacionnoe reshenie dlya razrabotki ehksplua-tacionnoj dokumentacii [EHlektronnyj resurs]. 2015. URL: http://www.cortona3d.com/ru/rapidauthor (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[6] Libroplanta - Razrabotka, izdanie i soprovozhdenie dokumentacii [EHlek-tronnyj resurs]. 2015. URL: http://www.libroplanta.com/ (data obrashcheniya: 25.05.2015)
[7] Reznik B.L., Stupenkov S.V. «Opyt razrabotki «Programmnogo kompleksa interaktivnoj ehlektronnoj ehkspluatacionnoj dokumentacii» dlya PL «Sankt-Peterburg» // Racional'noe upravlenie predpriyatiem. 2010. № 3 Pp. 18-19
[8] Kiyuc A.V., Kurapova E.V. «Vnedrenie CALS-tekhnologii na ehtapah razra-botki i vypuska interaktivnogo ehlektronnogo tekhnicheskogo rukovodstva po universal'nomu komplektu sredsv pogruzki dlya NK pr.22350» // Start v budushchee: Nauchn.-tekhnich. konf. Trudy vtoroj nauchn.-tekhnich. konf. molodyh specialistov / OAO "KBSM". SPb., 2011. Pp. 209-213
[9] Plotkin I.EH. Interaktivnye ehlektronnye tekhnicheskie rukovodstva. Opyt razrabotki // Racional'noe upravlenie predpriyatiem. 2011 № 3 Pp. 16-18.
[10] Komissarov A.V. «Sistema razrabotki ehkspluatacionnoj, remontnoj i servisnoj dokumentacii v OAO «Avtodizel'» // CAD/CAM/CAE Observer. 2012 № 6 Pp. 40-41
[11] Fetisov I.L., Snyatkov A.V. «Razrabotka ehlektronnoj ehkspluatacionnoj dokumentacii na slozhnoe izdelie na primere izdelij OAO «MMZ» // CAD/CAM/CAE Observer. 2014 № 4 Pp. 63-67
[12] Publichnyj otchet «Sozdanie vysokotekhnologichnogo proizvodstva na osnove sovremennyh metodov proektirovaniya izdelij i gibkih proizvodstvennyh processov precizionnoj obrabotki materialov». Perm': RCI PNIPU. 2012. 28 p.
[13] GOST 2.601-2013. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. EHks-pluatacionnye dokumenty. Vved. 01.06.2014. Moscow. Standartinform, 2014. 32 p.
[14] Galin I.YU. Avtomatizaciya sozdaniya interaktivnyh ehlektronnyh tekhni-cheskih rukovodstv (IEHTR): avtoref. dis. …kand. tekhn. nauk: 05.13.06 / I.YU. Galin; Nac. issled. yadern. un-t. (NIYAU). Moscow, 2011. 17 p.
[15] Veretekhina S.V. Metodika razrabotki interaktivnoj ehlektronnoj ehks-pluatacionnoj dokumentacii dlya naukoyomkih izdelij otrasli svyazi i informatizacii: avtoref. dis.

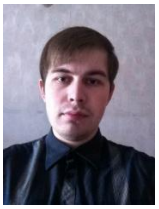
УДК 629.7.036.54-66; DOI 10.1872/MMF-2016-117

А.М. Никонова, Д.А. Осипович, А.Б. Макеев

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ УПРАВЛЯЮЩИМИ СОПЛАМИ

Анастасия Михайловна Никонова, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: NikonovaAM@yandex.ru

Дарья Андреевна Осипович, младший научный сотрудник
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: daria.osipovich.pnrpu@gmail.com



Алексей Борисович Макеев, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail:tka-11@mail.ru

Аннотация

В работе описан пример применения прогрессивных методов контроля для определения точностных параметров (ТП) ракетных двигателей (РД), характеризующих отклонение от номинального направления вектора тяги (ВТ) РД. Рассмотрены методы измерения, основанные на использовании универсальных инструментов, измерительной оснастки на координатно-расточных станках и координатно-измерительных машин (КИМ). Разработан алгоритм определения ТП корпуса РД на основе требований конструкторской документации.

Ключевые слова: отклонение расположения поверхности, точностные параметры ракетных двигателей, прогрессивные методы измерения.

В настоящее время одной из важных проблем является создание конкурентоспособной аэрокосмической техники. На решение данного вопроса государство выделяет немалые финансовые средства и задачей каждого предприятия-разработчика аэрокосмической техники является рациональная реализация денежных средств и повышение эффективности отработки изделия.

Таким образом, для создания более совершенных образцов аэрокосмической техники требуется постоянно совершенствовать не только методы производства материальной части, но и разрабатывать новые экспериментальные методы и средства испытаний образцов техники, основанные на современных информационных технологиях, обеспечивающих повышение точности и достоверности экспериментальной информации, а также расширение технических возможностей при их использовании.

В работе представлен метод определения ТП РД сложной конфигурации с четырьмя вращающимися управляющими соплами (ВУС), расположенными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, на котором впервые в НПО «Искра» отработан и внедрен инновационный метод контроля составляющих ТП деталей и сборочных единиц РД с помощью КИМ.

Точностные параметры – это параметры, характеризующие отклонение от номинального положения исполнительных поверхностей РД (стыковочных торцов и оси внутреннего профиля сопла).

РД состоит из камеры сгорания и выходного блока. Камера сгорания, в свою очередь, состоит из корпуса РД, выполненного в виде органопластикового «полукокона» с двумя вмотанными металлическими фланцами, и переднего дна, на котором находится узел стыка РД с последующей ступенью. Выходной блок, формирующий вектор тяги ВТ РД, состоит из крестовины с четырьмя установленными на ней ВУС.

Радиальное (смещение) и угловое (перекос) отклонения ВТ РД, обусловленные погрешностями изготовления и сборки деталей и сборочных единиц РД и действием внутреннего максимального давления при работе РД, от его номинального направления – перпендикуляра, восстановленного из центра стыковочного с последующей ступенью торца, приводят к возникновению боковых составляющих ВТ, компенсация которых путем разворота ВУС закладывается в программу управления полетом изделия [1], [2].

Следовательно, отработка ТП РД должна базироваться на экспериментальных данных, основанных на современных информационных технологиях [3].

Принятая на предприятии НПО «Искра» расчетно-экспериментальная методика определения перекоса и смещения ВТ РД с четырьмя ВУС включает поузловой метод контроля в цеховых условиях с помощью КИМ составляющих ТП РД – ТП деталей и сборочных единиц РД: корпуса, днища дна переднего, крестовины, корпусов сопла вращающегося, и определение ТП РД последовательным алгебраическим сложением этих составляющих в процессе комплектации и сборки РД:

- ТП каждого из четырех сопел вращающихся по результатам измерений отклонений пространственного расположения стыковочных элементов корпусов, входящих в их комплектацию;

- составляющих перекоса и смещения ВТ РД, обусловленных погрешностями изготовления и сборки комплекта четырех сопел вращающихся с привязкой их к сопловым фланцам крестовины;

- ТП выходного блока рассчитываемого в плоскостях расположения ВУС по результатам измерений отклонений от расположения стыковочных элементов сопловых фланцев крестовины относительно стыковочных элементов крестовины с корпусом РД и результатам расчета ТП комплекта четырех сопел вращающихся;

- перекоса и смещения ВТ РД в полярных координатах по результатам измерения в плоскостях расположения ВУС:

а) на днище относительно перпендикуляра, восстановленного из центра торца, стыковочного с последующей ступенью, отклонений от расположения элементов, стыковочных с корпусом РД;

б) на корпусе РД относительно перпендикуляра, восстановленного из центра переднего торца, стыковочного с передним дном, отклонений от расположения стыковочных поверхностей заднего фланца, стыковочного с выходным блоком, и результатам расчета ТП выходного блока.

При разработке методики определения ТП РД сложной конфигурации с четырьмя ВУС, расположенными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, было принято во внимание, что при отработке ТП РД измерения в трёхмерном пространстве составляющих ТП на деталях и сборочных единицах, входящих в комплектацию РД, потребует использования большого количества универсального оборудования и инструмента или изготовления специальных стендов, что повлечёт за собой соответствующие затраты.

Измерение универсальным способом является трудоёмким процессом и занимает длительное время. При измерении сложно расположенных геометрических поверхностей универсальным способом часто нарушается принцип единства баз – совмещение конструкторских и измерительных баз, что в свою очередь ведет к необходимости проведения дополнительных расчетов и увеличению трудоемкости [4]. Измерение ТП на высокоточных координатно-расточных станках так же не рационально, т.к. повлечет неэффективную загрузку дорогостоящего оборудования и потребует дополнительные затраты на измерительный инструмент и программное обеспечение. Влияние человеческого фактора при измерениях и расчетах в совокупности с погрешностями измерительного универсального или специального оборудования и инструмента снижают достоверность получаемых результатов [5].

Оптимальным на момент разработки методики определения ТП РД являлось внедрение КИМ для контроля в цеховых условиях ТП деталей и сборочных единиц РД [6].

Анализ современного состояния координатных измерений показал, что при большом разнообразии методик таких измерений, нет единых принципов, а так же общей методологии их разработки.

При разработке алгоритмов измерений ТП деталей и сборочных единицах представленного в работе РД за основу в первую очередь были приняты требования конструкторской документации, технические возможности КИМ и ее программного обеспечения.

Алгоритм измерения параметра представляет собой перечень последовательно выполняемых операций, связанных со сканированием в системе координат (СК) КИМ координат щупом, фиксируемым в точках базовых и контролируемых поверхностей объекта, и обработки полученной информации с помощью набора стандартных программ CAD системы, позволяющих определить положение базовых и контролируемых поверхностей в СК КИМ и их взаимное расположение [7], [8].

Рассмотрим пример создания алгоритма измерения ТП корпуса РД (рис. 1): перекоса оси, смещения центра и закрутки заднего фланца корпуса, обусловленных погрешностями его изготовления. Передний стыковочный торец является базовым и стыкуется с передним дном. Геометрия поверхностей переднего торца служит для построения базовых элементов, относительно которых определяются отклонения расположения поверхностей заднего фланца, стыковочных с выходным блоком РД. На переднем и заднем стыковочных торцах расположены соответственно базовое отверстие и паз.

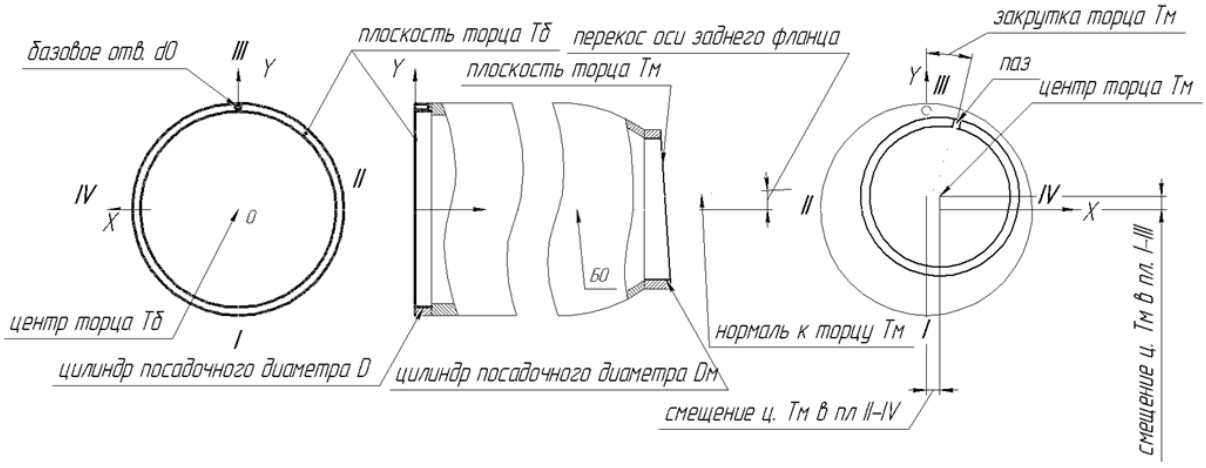


Рисунок 1. Схема формирования ТП корпуса РД

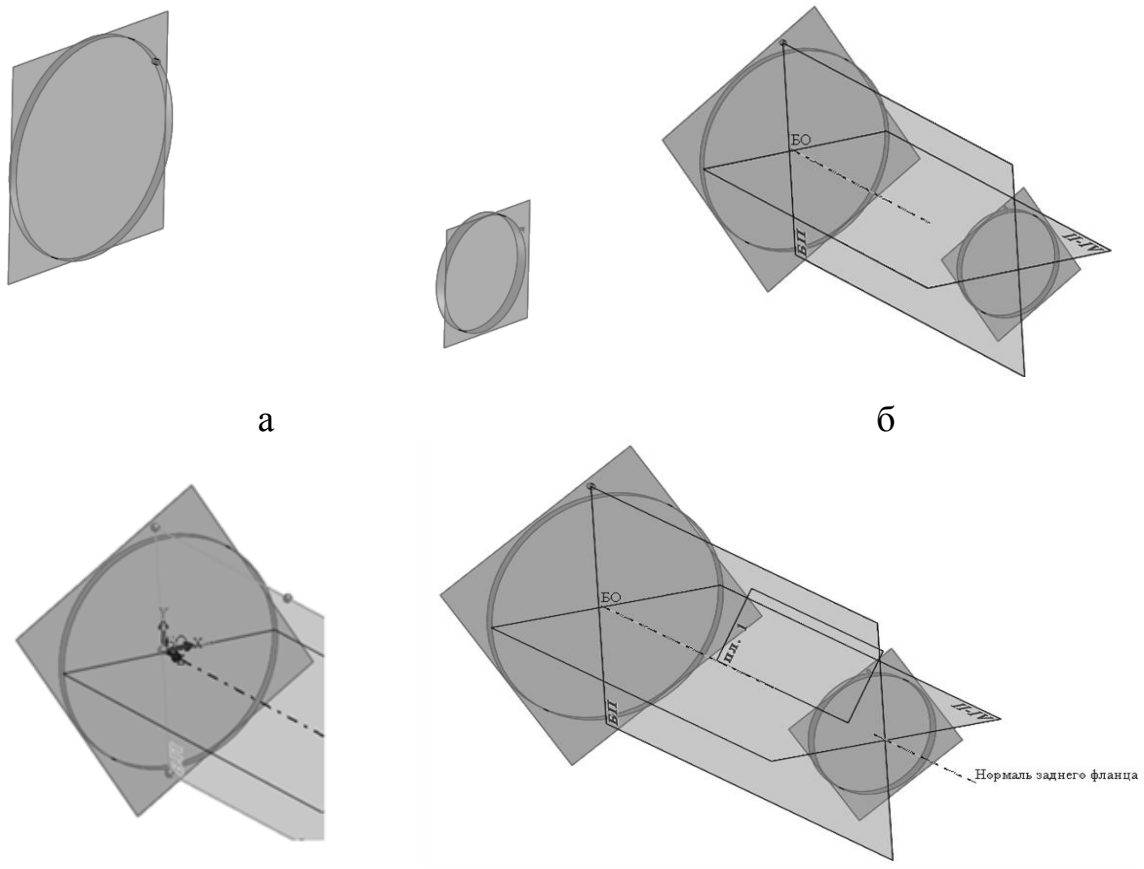
Формирование алгоритма определения ТП корпуса РД начинается с этапа сканирования реальных поверхностей – плоскостей стыковочных

торцов, поверхностей посадочных диаметров, базового отверстия и паза (рис. 2а) [9].

Далее выполняются операции построения геометрических элементов – центра переднего стыковочного торца, базового отверстия (БО), центра базового отверстия, оси симметрии паза и плоскостей стабилизации (рис. 2б).

В качестве СК корпуса используется СК, построенная на отсчётной поверхности переднего торца корпуса: ось OZ направляем по БО корпуса – перпендикуляру к торцу, ось OY располагаем в плоскости торца и направляем через центр базового отверстия, ось OX дополняет СК до прямоугольной, и связываем ее с СК КИМ через торец, его центр и центр базового отверстия, тем самым исключая неопределённости положения СК корпуса и необходимость выставки корпуса в нулевое положение (рис. 2в).

Следующий этап – построение поверхностей, расположение которых требуется определить – центр стыковочного торца и ось (нормаль торца) заднего фланца. Для определения закрутки строится дополнительная плоскость 1 (рис. 2г).



а б в г

Рисунок 2. Алгоритм построения и определения ТП корпуса РД

Завершающим этапом алгоритма является задание функции определения размеров. Оперируя, при определении параметра, требуемыми геометрическими элементами можно вычислить фактический размер.

Перекос заднего фланца определяется как угол между БО и нормалью торца заднего фланца, следовательно, при определении угла в плоскости стабилизации I-III определяется угол между плоскостью II-IV и прямой нормали торца заднего фланца. И, наоборот, при определении угла в плоскости стабилизации II-IV.

Смещение заднего фланца определяется как расстояние между центрами стыковочных торцов переднего и заднего фланца в плоскостях стабилизации. Схема определения смещения аналогична определению перекоса.

При определении закрутки необходимо построить дополнительную плоскость, проходящую через БО и точку пересечения оси симметрии паза на заднем фланце, и определить угол между плоскостью стабилизации I-III и дополнительной плоскостью.

Опыт, полученный при разработке и отработке представленной методики, подтвердил универсальность метода измерения ТП с помощью координатно-измерительной машин и позволил в настоящее время внедрить его при контроль ТП большинства видов сопел, корпусов, и других составляющих РД без использования дополнительного оснащения.

Использование представленного метода сокращает время проведения испытаний и расширяет возможности последующей обработки результатов измерения в CAD системах. Данные, полученные при измерении, дают возможность пространственного анализа геометрии изделия и возможность проведения компьютерной сборки с учетом смещения поверхностей [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский М.И., Петренко В.И., Зыков Г.А. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе — М.: Машиностроение, 2003. — 464 с.
2. Лавров Л.Н. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе М.: Машиностроение, 1993. – 215 с.
3. Волков В. Т., Ягодников Д. А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 296 с.
4. Дмитриев С.И., Ершова И.Г. Метрологическое обеспечение производства в машиностроении: Курс лекций – Псков: Издательство ППИ, 2010.– 184 с.
5. Кристоф Р., Нейманн Х. И. Технология мультисенсорных координатных измерений. Измерение форм, размеров и позиций на производстве и в

процессе контроля качества. [Электронный ресурс] //URL: http://www.uran-spb.ru/content/pdf_catalog/Book_Measurement.pdf (дата обращения 3.03.2016).
6. Зорин А.Н., Злотский М., Евченко К. Решения для комплексной модернизации КИМ от компаний DELCAM и RENISHAW [Электронный ресурс]// САПР и Графика. – 2012. - №8(190). – С. 68-72. URL: http://sapr.ru/article.aspx?id=23195 (дата обращения 3.03.2016).
7. Кашуба Л. А. Представление геометрии поверхностей изделий в машиностроении // электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании». - 2011. - №1. - С. 31-68.
8. Кашуба Л. А. Алгоритм обработки информации, полученной при измерении реальной геометрии деталей на координатно-измерительных машинах // электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании». - 2011. - №3. - С. 18-21.
9. Буланова Е.А Координатная измерительная машина с ЧПУ: Учебное пособие/ – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т имени академика С.П. Королева, 2008 - 54с.
10. Братухин А.Г. Координатно-измерительные машины и комплексы // Наука и технологии в промышленности. 2011. №3. С. 36 – 48.

A.M. Nikonova, D.A. Osipovich, A.B. Makeev

METHOD FOR PRECISION PARAMETERS DETERMINING OF THE ROCKET ENGINE WITH ROTATING CONTROL NOZZLES

all: Perm National Research Polytechnic University, Russia

Abstract

The article describes example of progressive measuring methods using for determination of rocket engine precision parameters characterizing rocket engine thrust vector deviation. Measuring methods based on using of universal tools, measuring equipment for coordinate boring machine and coordinate measuring machine are considered. Determination algorithm for rocket engine frame precision parameters based on design documents requirements is developed.

Key words: surface position deviation, rocket engine precision parameters, progressive measuring methods.

REFERENCES

[1] Sokolovskij M.I., Petrenko V.I., Zykov G.A. Controlled power generating system on solid rocket fuel — M.: Manufacturing industry, 2003. — 464 p. (rus.)
[2] Lavrov L.N. Constructions of the rocket solid propellant power plant M.: Manufacturing industry, 1993. – 215 p. (rus.)

[3] Volkov V. T., Jagodnikov D. A. Research and developmental testing of the rocket solid propellant power plant. — M.: MGTU im. N.Je. Baumana publisher, 2007. — 296 p. (rus.)
[4] Dmitriev S.I., Ershova I.G. Methrology support of the production in manufacturing industry: lecture course – Pskov: PPI publisher, 2010.– 184 p. (rus.)
[5] Kristof R., Nejmann H. I. Tecnology of multisensor koordinate measurement. Measurement of form, dimensions and posistions in manufacture and during quality control. [electronic resource] //URL: http://www.uran-spb.ru/content/pdf_catalog/Book_Measurement.pdf (accessed date 3.03.2016). (rus.)
[6] Zorin A.N., Zlotskij M., Evchenko K. CMM integrated modernization solutions by companies DELCAM and RENISHAW [electronic resource]// CAD and Graphics. – 2012. - N8(190). – pp. 68-72. URL: http://sapr.ru/article.aspx?id=23195 (accessed date 3.03.2016).
[7] Kashuba L. A. Representation of surface geometry in manufacturing industry // electronic journal System analysis in science and education. - 2011. - N1. - pp. 31-68. (rus.)
[8] Kashuba L. A. Information, received during real geometry measuring by CMM electronic journal System analysis in science and education.- 2011. - N3. - pp. 18-21. (rus.)
[9] Bulanova E.A CNC Coordinate measuring machine: Learning guide/ – Samara: S. P. Korolev Samara State National Aerospace University, 2008 – 54p. (rus.)
[10] Bratuhin A.G. Coordinate measuring machines and complexes // Science and technologies in manufacturing industry. 2011. N3. pp 36 – 48. (rus.)

УДК 621.9.011: 621.9.019; DOI 10.1872/MMF-2016-118

В.Н. Трофимов, А.С. Нуртдинов, А.А. Ширяев

СПОСОБ КАЛИБРОВКИ ПРИБОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Антон Сергеевич Нуртдинов, зав. лабораторией, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: 8 (342) 2-198-137, E-mail: anton.nurtdinov@gmail.com

Виктор Николаевич Трофимов, д.т.н., профессор
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: 8 (342) 239-13-40, E-mail: tvn_perm@mail.ru

Алексей Александрович Ширяев, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: 8 (342) 2-198-137, E-mail: alex_sh_23-1@mail.ru

Аннотация

При проектировании и изготовлении изделий ответственного назначения одним из регламентируемых параметров является уровень остаточных макронапряжений. Для контроля уровня RS_1 актуально использование методов неразрушающего контроля, например, метода рентгеновской дифрактометрии и метода шумов Баркгаузена. При использовании указанных способов важной операцией является калибровка оборудования - настройка на нулевой уровень остаточных макронапряжений с применением эталонных образцов. Рассмотрены недостатки существующих эталонных образцов. Предложен способ калибровки с использованием плоских образцов, деформируемых по схеме изгиба.

Ключевые слова: остаточные макронапряжения, неразрушающий контроль, эталонные образцы, калибровка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218)

Введение

В связи с появлением новых материалов и технологий их обработки в различных отраслях машиностроения, в частности, аэрокосмической техники, атомного машиностроения, горнодобывающей промышленности, транспортных газо- и нефтепроводов, увеличивается количество критериев, по которым оценивается прочность и надежность производимой продукции, что также способствует повышению её конкурентоспособности.

В последние годы при проектировании и изготовлении изделий ответственного назначения одним из регламентируемых параметров, которые указываются в конструкторско-технологической документации, является уровень остаточных напряжений 1 рода (по классификации Н.Н. Давиденкова, далее – RS_1) [1,2]. Считается, что сжимающие остаточные напряжения играют положительную роль, так как снижают уровень растягивающих напряжений и препятствуют образованию трещин, а растягивающие – отрицательную.

Актуальность проблемы

Для контроля уровня RS_1 актуально использование методов неразрушающего контроля (НК), например метода рентгеновской дифрактометрии (РД) [3-5] и метода шумов Баркгаузена (ШБ) [6-8].

Метод РД является универсальным и может использоваться для определения уровня RS_1 в поверхностных слоях изделий из любых поликристаллических металлов и сплавов. Определение RS_1 данным методом требует больших временных затрат и целесообразно при выборочном контроле деталей или проведении исследовательских работ, например, влияния технологии изготовления деталей на формирование уровня и знака RS_1.

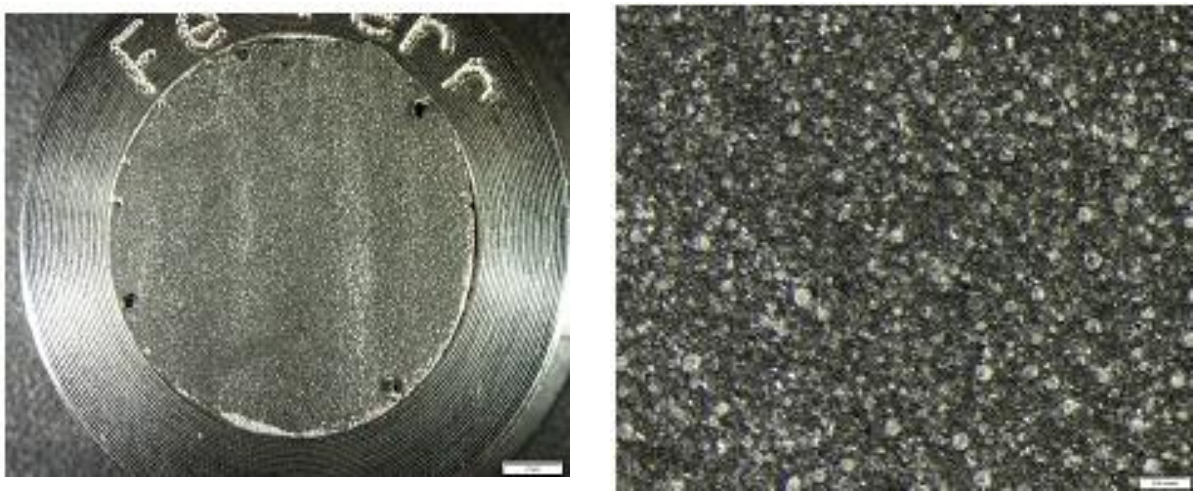
Достоинством метода ШБ является возможность проведения оперативного контроля качества поверхностных слоев деталей из магнитных материалов в условиях серийного и массового производства, так как время измерения составляет доли секунды. Однако метод ШБ имеет существенный недостаток: он определяет некоторую величину магнитошумового параметра (МП), который представляет комплексную характеристику структурно-энергетического состояния поверхностного слоя изделия и учитывает, в частности, остаточные напряжения 1 рода, но этим методом сложно определить знак RS_1.

В лаборатории НК Пермского национального исследовательского политехнического университета методы НК реализуются с использованием комплекса Xstress Robot - роботизированной системы с

рентгеновским дифрактометром Xstress 3000 [9] и цифровым анализатором ШБ Rollscan 350.

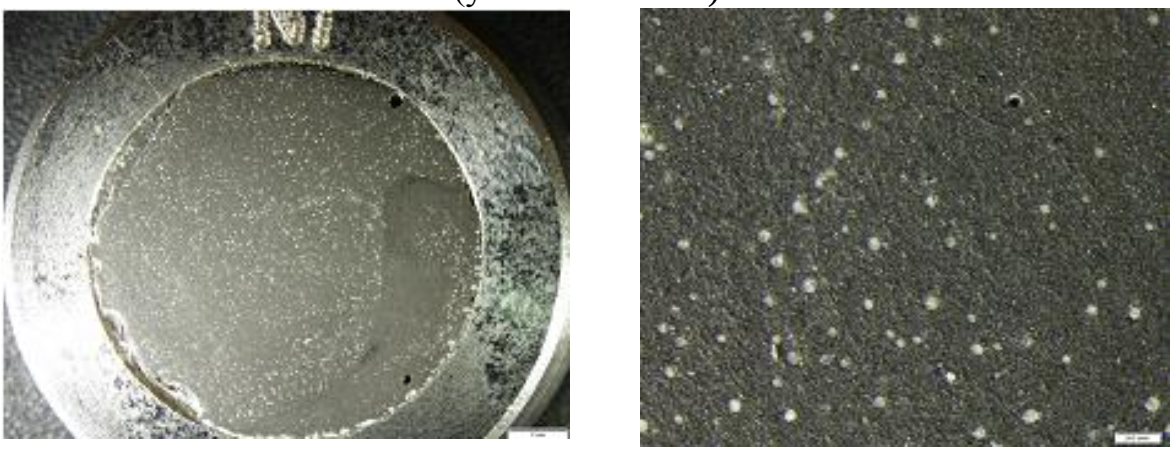
При использовании любого из указанных методов важнейшей операцией является операция калибровки используемого оборудования, в частности, настройка рентгеновского дифрактометра на нулевой уровень RS_1 и определение МП, соответствующего этому уровню.

Для этой цели в состав анализатора остаточных напряжений XSTRESS 3000 входят эталонные образцы (далее – нуль-эталоны), которые представляют из себя таблетку из отожженных порошков железа, никеля, титана или других металлов, частицы которых связаны полимером (рис.1). Технология изготовления нуль-эталона такова, что, по уверению разработчиков, в его объеме и на поверхности величина RS_1 равна нулю. При этом в процессе калибровки расчёт RS_1 ведётся с использованием модуля Юнга для чистых металлов.



а б

Рис.1. Общий вид (а) и структура (б) поверхности нуль-эталона железа (увеличение 50^x).



а б

Рис.2. Общий вид (а) и структура (б) поверхности нуль-эталона никеля (увеличение 50^x)

Несмотря на то, что нуль-эталоны аттестованы и запатентованы изготовителем, возникают вопросы по обоснованности их применения:

1. На рисунках 1 и 2 показана структура поверхностного слоя нуль-эталонов для железа и никеля при увеличении 50^x. Видно, что структура поверхностного слоя нуль-эталонов существенно отличается от структуры компактного материала, вследствие наличия разделяющих слоев полимера.

2. Крупность фракций, использованных при изготовлении нуль-эталонов, заметно различается.

3. На рисунке 2 видно, что на поверхности нуль-эталона имеются включения (светлые пятна), вероятно, пузырьки воздуха, образующиеся при полимеризации.

4. Температурные условия хранения подобных нуль-эталонов и наличие рентгеновского излучения ведут со временем к деградации свойств полимерного связующего. Насколько велико это влияние?

Неизвестно, как указанные факторы влияют на уровень RS_1 на поверхности нуль-эталонов, учитывая, что глубина проникновения рентгеновских лучей не превышает 4-11 мкм.

Кроме того, возникает еще один важный вопрос: насколько обосновано использование модуля Юнга для чистых металлов при определении RS_1, если известно, что легирование, химико-термическая и механическая обработка влияют на его величину. Например, для циркониевых сплавов модуль Юнга может изменяться в пределах 10% [10].

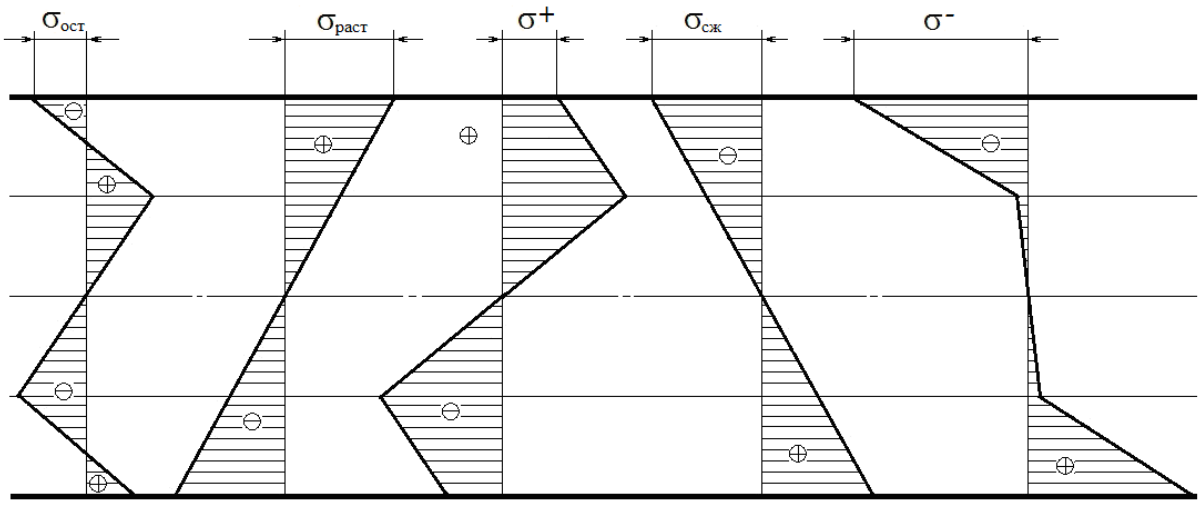
Возможно ли использование указанных нуль-эталонов из порошков чистых металлов в случае измерения RS_1 в деталях, изготовленных из сплавов с высоким содержанием легирующих элементов, например, жаропрочных и жаростойких сплавов? Опыт авторов показывает, что в этом случае диапазон отклонения значений RS_1 от их среднего значения может быть сопоставим с самим средним значением.

Также отметим, что данные нуль-эталоны не позволяют калибровать датчики при измерении RS_1 методом ШБ, так как наличие полимерной связки препятствует прохождению магнитного поля от излучателя к приемнику.

В связи с вышеуказанным актуальной является задача разработки нуль-эталонов и/или методик, позволяющих калибровать измерительные приборы при определении RS_1 в деталях из любых металлов и сплавов.

Теоретические положения

Рассмотрим изгиб пластины прямоугольного сечения шириной b и толщиной h из исследуемого материала, в которой существуют продольные остаточные напряжения.



а б в г д

Рис.3. Эпюры напряжений при нагружении пластины с остаточными напряжениями

Пусть остаточные напряжения распределены равномерно по ширине сечения. В ненагруженном состоянии эпюра распределения RS_1 может иметь вид, приведенный на рисунке 3а. На поверхности пластины имеются остаточные напряжения равные $\sigma_{ост}$. Подобная эпюра получается при изгибе балки из идеального упруго-пластического материала [11].

Приложим к пластине изгибающий момент $M_{раст}$. Упругие растягивающие напряжения на поверхности пластины определяются по известной формуле [11] – $\sigma_{раст}=M_{раст}/W$, где $W=bh^2/6$ – момент сопротивления сечения пластины. Эпюра распределения напряжений по сечению пластины приведена на рисунке 3б.

Напряжения в сечении нагруженной детали или конструкции определяются в соответствии с принципом суперпозиции как сумма напряжений, возникающих от действия внешних сил и остаточных напряжений. Складывая эпюры, приведенные на рисунках 3а и 3б, получим суммарную эпюру (рис.3в). Напряжения на поверхности пластины равны

$$\sigma^+ = \sigma_{ост} + \sigma_{раст} \qquad (1)$$

Приложим к пластине изгибающий момент $M_{сж}$, создающий на поверхности упругие сжимающие напряжения (рис.3г) – $\sigma_{сж}=M_{сж}/W$.

Эпюра распределения напряжений имеет вид, показанный на рисунке 3д. Напряжения на поверхности пластины равны

$$\sigma^- = \sigma_{ост} - \sigma_{сж} \qquad (2)$$

Из уравнений (1) и (2), с учётом выражений для $\sigma_{раст}$ и $\sigma_{сж}$, получим

$$\sigma_{ост} = [(\sigma^+ + \sigma^-) - (M_{раст} - M_{сж})/W\,]/2 \qquad (3)$$

Приложим к пластине изгибающий момент M, такой, чтобы выполнялось условие

$$\sigma - \sigma_{ост} = M/W - \sigma_{ост} = 0 \qquad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получим

$$M = \sigma_{ост}\, W = [(\sigma^{+} + \sigma^{-})\, W - (M_{раст} - M_{сж})]/2 \qquad (5)$$

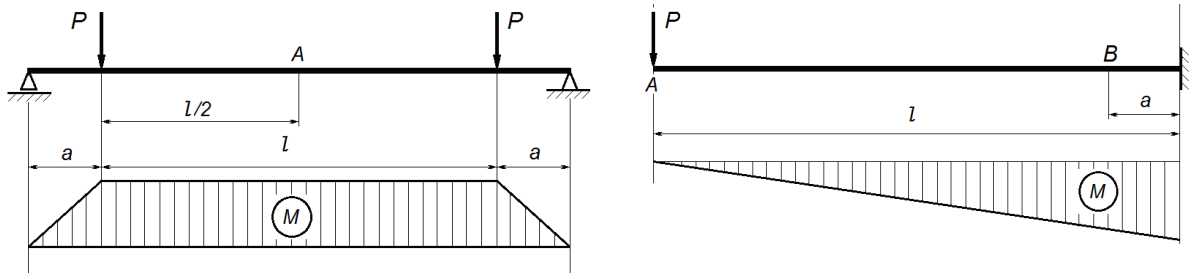
Для определения величины изгибающего момента М необходимо:

- знать величины σ^{+} и σ^{-} (определяются в результате измерений методом РД);
- знать величины изгибающих моментов $M_{раст}$ и $M_{сж}$ (рассчитываются так, чтобы исключить появление в образце пластических деформаций, и задаются нагружающим устройством).

Таким образом, если к пластине приложить изгибающий момент равный *M*, то напряжения на поверхности пластины будут равны нулю, а балку, нагруженную таким изгибающим моментом, можно использовать в качестве нуль-эталона.

Возможные варианты нагружения пластины приведены на рисунке. Измерения проводятся в точках *A* (схема чистого изгиба) или *B* (схема консольной балки) (рис.4).

При проведении измерений пластина нагружается и разгружается ступенчато. Нагрузки предварительно рассчитываются. На каждой ступени нагружения фиксируются прогиб пластины (определяется с помощью цифрового или стрелочного индикатора). Строится график нагружения и разгрузки. Это позволяет оценить величину петли гистерезиса.



$$M_{\max} = P\,a;\quad y_A = \frac{Pa}{24EJ}\left(3l^2 - 4a^2\right)$$

$$M_{\max} = P\,l;\ M_B = P\,(l-a);\quad y_A = \frac{Pl^3}{3EJ}$$

а б

Рис.4. Варианты нагружения пластины

Предложенная выше процедура калибровки может быть использована и при использовании метода ШБ, однако лучше проводить калибровку параллельно с методом РД, для того, чтобы выявить корреляцию величины магнитошумового параметра с численным значением RS_1 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. –1945. – № 6. – С. 583.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963.- 230 с.
3. Финк К., Рорбах Х. Измерение напряжений и деформаций. М.: Машгиз, 1961. - 535с.
4. Васильев Д. М. Дифракционные методы исследования. М.: Металлургия, 1977. - 248 с.
5. Вишняков Я.Д, Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
6. H. Barkhausen, “Zwei mit Hilfe der neun Verstärker entdeckte Erscheinungen,” Phys. Zs., 20, 1919, p.p. 401–403.
7. Металловедение и термическая обработка стали. Справ. изд.— 3-е перераб. и доп. В 3-х т. Т.1. Методы испытаний и исследования / под ред. Бернштейна М.Л., Рахштадта А.Г., М.: Металлургия, 1983. 352 с.
8. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. /В.В. Клюев [и др.]. Кн. 2: Оптический контроль. / В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Кн. 3: Радиоволновой контроль. /В.И. Матвеев – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.: ил.
9. Xstress/BN Robot System Operating instructions, V.1.0. Stresstech Oy , Tikkutehtaantie 1 , FIN-40800 VAAJAKOSKI , Finland, 2013.
10. Ривкин Е.Ю., Родченков Б.С., Филатов В.М. Прочность сплавов циркония. - М.: Атомиздат, 1974. - 168 с.
11. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970. - 544 с.

V.N. Trofimov, A.S. Nurtdinov, A.A. Shiryaev

A METHOD OF CALIBRATING INSTRUMENTS FOR THE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES

all: State National Research Politechnical University of Perm, Russia

Abstract

Level of residual macrostresses is one of the regulated parameters in the design and manufacture of products for heavy duty. Use of nondestructive testing methods, such as X-ray diffraction method and the method of the Barkhausen noise, is actual to control the level of residual macrostresses. When using these methods, an important step is the equipment calibration as setting the zero level RS1 by using reference samples. In the article the limitations of the existing reference samples are considered. The calibration method based on using of flat specimens deformed by bending is suggested.

Key words: residual macrostresses, nondestructive testing, reference samples, calibration.

REFERENCES

[1] Davidenkov N. N., Spiridonova N. I. *Analiz napryazhennogo sostoyaniya v zheyke pastyanytogo obraztsa* [Analysis of the stress state in the neck of stretched samples]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1945, No. 6, p. 583.
[2] Birger I. A. *Ostatochnye napryazheniya*. [Residual stresses]. Moskow: Mashinostroenie, 1963, 230 p.
[3] Fink K., Rohrbach J. Izmerenie napryazheniy i deformatsiy [*Measurement of stress and deformations*], Moskow: Mashgiz, 1961, 535 p.
[4] Vasiliev D. M. *Difraktsionnie metody* [The Diffraction methods], Moskow: Metallurgy, 1977, 248 p.
[5] Vishnyakov Y.D, Piskarev V.D. Managing residual stresses in metals and alloys. M.: Metallurgy, 1989. – 254 c.
[6] H. Barkhausen, "Zwei neun mit Hilfe der Verstärker entdeckte Erscheinungen," Phys. Zs., 20, 1919, p.p.401-403.
[7] The metallography and heat treatment of steel. Ref. ed.— 3rd Rev. and add In 3 T. T. 1. Test methods and studies, ed. by M. L. Bernshtein, A. G. Rakhshtadt, Moscow.: Metallurgy, 1983, 352 p.
[8] Non destructive control: Directory: В 7 т. Edited by V.V. Klyeva. T.6: In 3 books. Book 1: Magnetic control methods. /V.V. Klyev [and other]. Book 2: Optical control. / V.N. Filinov, A.A. Ketkovich, M.V. Filinov. Book 3: Radio wave control. /V.I. Matveev – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 832 c.: ил
[9] Xstress/BN Robot System Operating instructions, V. 1.0. Stresstech Oy , Tikkutehtaantie 1 , FIN-40800 VAAJAKOSKI , Finland, 2013.
[10] Rivkin E. Yu., Rodchenkov B. S., Filatov V. M. Prochnoct splavov tsirkoniya [The strength of the zirconium alloys], Moskow: Atomizdat, 1974, 168 p.
[11] Feodosiev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials], Moskow: Nauka, 1970, 544 p.

УДК 621.9; DOI 10.1872/MMF-2016-119

П. В. Шаламов[1], Р.М.Валеева[2]

ТЕРМИЧЕСКОЕ СВЕРЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

[1]Павел Викторович Шаламов, к.т.н., доцент
Южно-Уральский государственный университет
Россия, Челябинск
Тел.: (351)905-4941, E-mail: traktor1977@mail.ru

[2]Розалина Маратовна Валеева, студентка
Механико - технологического факультета
Южно-Уральский государственный университет
Россия, Челябинск
E-mail: rozalina130594@mail.ru

Аннотация

Рассмотрено формообразование отверстий под резьбу комбинированным инструментом. Выявлена оптимальная подача для данного процесса при заданных параметрах, осуществлен замер геометрических параметров отбортовки, определена зависимость микротвердости от расстояния от края отверстия.

Ключевые слова: термическое сверление, отверстия с отбортовками, комбинированный инструмент, осевая сила, резьбовое соединение.

В машиностроении широко применяются изделия из тонколистовых заготовок, предусматривающие резьбовое крепление к ним различных комплектующих изделий [1]. Работоспособность резьбового соединения обеспечивается длиной свинчивания, т.е. за счёт размещения необходимого количества витков резьбы по длине отверстия. Для тонкостенных заготовок это проблематично. Существующие способы увеличения длины свинчивания (гибка листов, приварка втулок, пробивка отверстий в закрытых штампах и др.) не обладают достаточной технологичностью и требуют дополнительных расходных материалов и оборудования [2, 3]. В связи с этим наиболее рациональным способом получения отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках является метод пластического сверления (рис. 1), позволяющий получить достаточную длину свинчивания за счёт образования отбортовок отверстия в виде вытянутого участка [4]. При этом получаемые отверстия имеют более высокую точность и меньшую шероховатость по сравнению с традиционными способами. Вместе с этим данный вид формообразования

отверстий под резьбу эффективен не для всех технологических режимов обработки, в некоторых случаях наблюдается деформация заготовки или поломка инструмента [5].

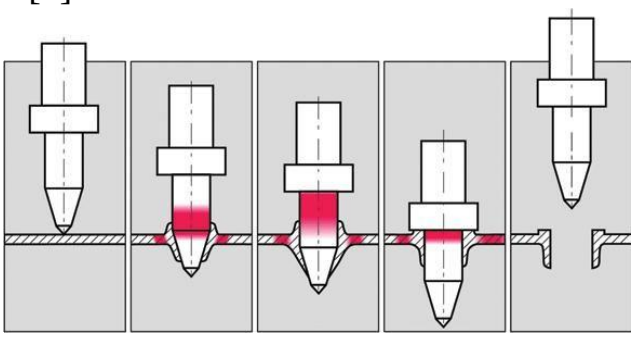


Рисунок 1 – Стадии процесса формообразования отверстия пластическим сверлением

Опубликованные исследования не указывают эффективные режимы обработки отверстий в тонколистовых заготовках под метрическую резьбу диаметром 7 миллиметров и выше, отсутствуют данные по геометрии получаемого отверстия. В связи с этим был проведен ряд экспериментов с листовой заготовкой толщиной 2 миллиметра. В качестве инструмента был выбран пуансон диаметром 7 миллиметров (для получения резьбы М8х1), изготовленный из стали ВК6 (рис. 2). Для предотвращения скалывания на конце инструмента изготавливался предохранительный конус с углом 80 градусов. Рабочий конус составлял 60 градусов. Заточка проводилась на универсальном заточном станке 3Е642Е.

Рисунок 2 – Пуансон

Эксперименты показали, что принудительная подача вызывает деформацию заготовки, поэтому применение инструмента диаметром больше 7 миллиметров для данного вида обработки нецелесообразно (рис. 3). Исключение составил режим обработки при подаче инструмента 0,1 мм/об и частоте вращения шпинделя 2000 об/мин. Однако применение подачи 0,1 мм/об повышает основное время на обработку, что нетехнологично в условиях серийного производства.

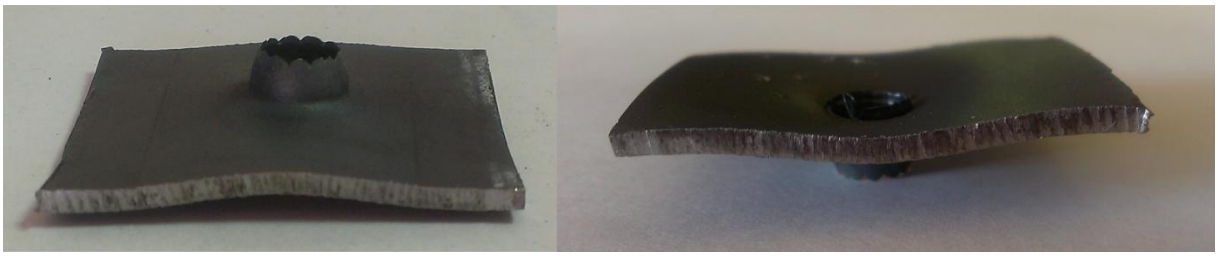


Рисунок 3 – Деформированная заготовка

Во избежание деформаций при получении отверстий был изготовлен комбинированный инструмент с двумя рабочими частями (рис. 4).

Рисунок 4 - Комбинированный инструмент

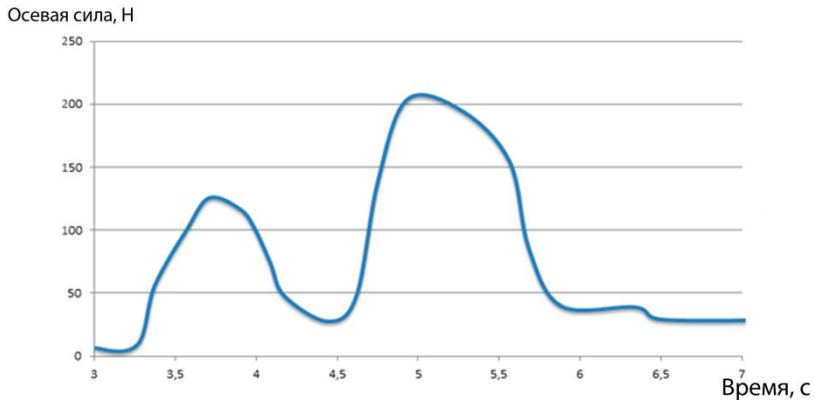
Первая рабочая часть данного инструмента имеет диаметр 4 миллиметра, а вторая – 7,2 миллиметров. Оба рабочих конуса составляют 60 градусов.

В заготовках толщиной 2 миллиметра на различных режимах обработки проводилось формообразование отверстий. Во время обработки фиксировалась действующая на заготовку осевая сила с помощью трехкомпонентного динамометра фирмы Kistler (Швейцария), модель 9257B, внешний вид которого представлен на рис. 5.

Рисунок 5 - Внешний вид динамометра модели 9257B

Результаты данных исследований приведены в табл. 1. Изменение осевой силы для некоторых режимов резания представлено на графиках (рис. 6). На рис. 7 представлен внешний вид отверстия с отбортовками, изготовленного комбинированным инструментом.

а)



б)

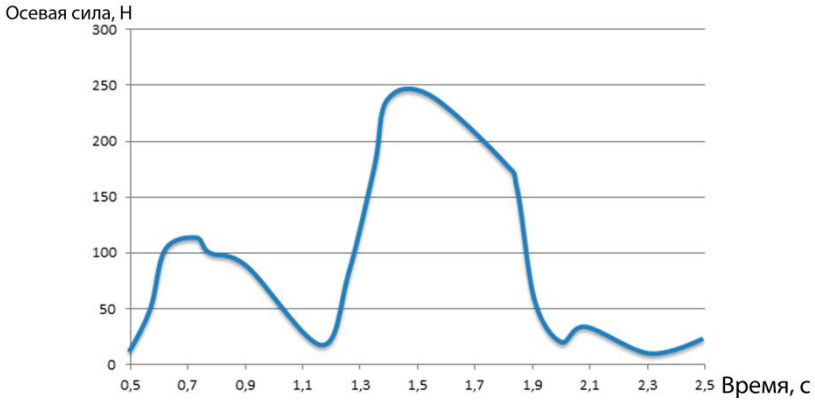


Рисунок 6 - Графики изменения осевой силы при режимах обработки: а) s=0,2 мм/об, n=2000 об/мин; б) s=0,4 мм/об, n=2000 об/мин

Таблица 1 – Результаты исследования

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	F_z, Н	t, сек
2000	0,1	165	7
	0,14	240	4
	0,2	200	3
	0,4	300	1,5
1400	0,1	240	9
	0,14	250	7
	0,2	260	5
	0,4	220	1,5
1000	0,1	240	11
	0,14	260	7
	0,2	270	6
	0,4	180	3
710	0,1	240	12
	0,14	250	12
	0,2	260	9
	0,4	-	-

При подаче инструмента 0,4 мм/об и частоте вращения шпинделя 710 об/мин формообразование отверстий невозможно, так как инструмент продавливает отверстие в заготовке, а не образует его благодаря процессу течения металла. Нарезать резьбу в таких отверстиях не получится.

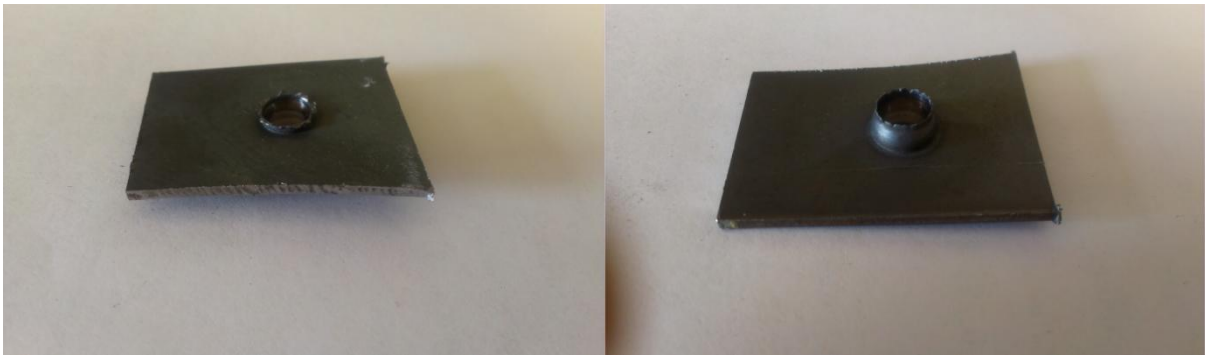


Рисунок 7 – Внешний вид отверстия образованного комбинированным инструментом.

Таким образом, отверстия диаметром более 7 мм наиболее целесообразно изготавливать комбинированным инструментом (рис. 4). Принимая во внимание то, что сокращение основного времени приводит к увеличению производительности, наиболее оптимальными режимами обработки являются: частота вращения шпинделя - 2000 об/мин, подача инструмента - 0,4 мм/об.

Посредством малого инструментального микроскопа производился замер геометрических параметров (рисунок 8) [6,7]. Проанализировав таблицу средних значений показателей (таблица 2), не было выявлено зависимости изменения геометрии отбортовок от подачи и частоты вращения инструмента.

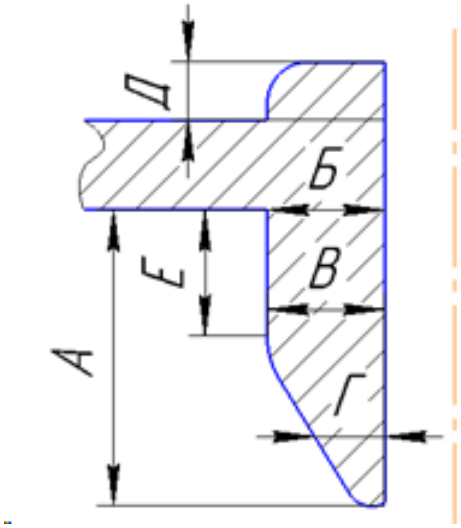


Рисунок 8 – Геометрические параметры отверстия с отбортовками

Таблица 2 – Средние значения геометрических параметров

n, мин$^{-1}$	S, мм/об	А, мм	Б, мм	В, мм	Г, мм	Д, мм	Е, мм
2000	0,1	3,853	1,628	1,845	0,861	1,105	1,735
	0,14	4,688	1,52	1,5	0,82	0,452	1,97
	0,2	4,9	1,155	0,9	0,4	1,5	-
	0,4	4,315	0,975	0,8175	0,445	1,837	-
1400	0,1	4,518	1,34	0,995	0,556	-	-
	0,14	4,122	1,83	1,42	0,892	1,56	-
	0,2	4,822	1,146	0,886	0,39	-	-
	0,4	4,74	1,11	1,29	0,7	1,97	-
1000	0,1	4,622	1,245	0,922	0,457	1,305	-
	0,14	4,38	1,14	0,883	0,536	1,31	-
	0,2	4,385	2,125	0,86	0,4	1,33	-
	0,4	4,68	1,216	1,176	0,45	1,09	-
710	0,1	4,297	1,62	1,337	0,92	0,49	-
	0,14	4,395	1,117	0,892	0,48	1,28	-
	0,2	4,305	1,187	0,792	0,39	0,96	1,68
	0,4	4,66	1,513	1,045	0,776	-	2,52

Также проводилось измерение твердости в зоне отбортовки. Образцы разрезались на две части и устанавливались в специальную форму, где заливались эпоксидной смолой (рисунок 9). Замеряемая поверхность шлифовалась плоскошлифовальном станке 3Г71М и полировалась на модульной шлифовально-полировальной системе [8].

С помощью микротвердомера ПМТ-3 была измерена твердость в нескольких точках образца в зоне образования отбортовки. Графики зависимости микротвердости от расстояния от края отверстия полученных при разных режимах обработки представлены на рисунках 10-12.

Рисунок 9 – Фото заготовок, залитых эпоксидной смолой

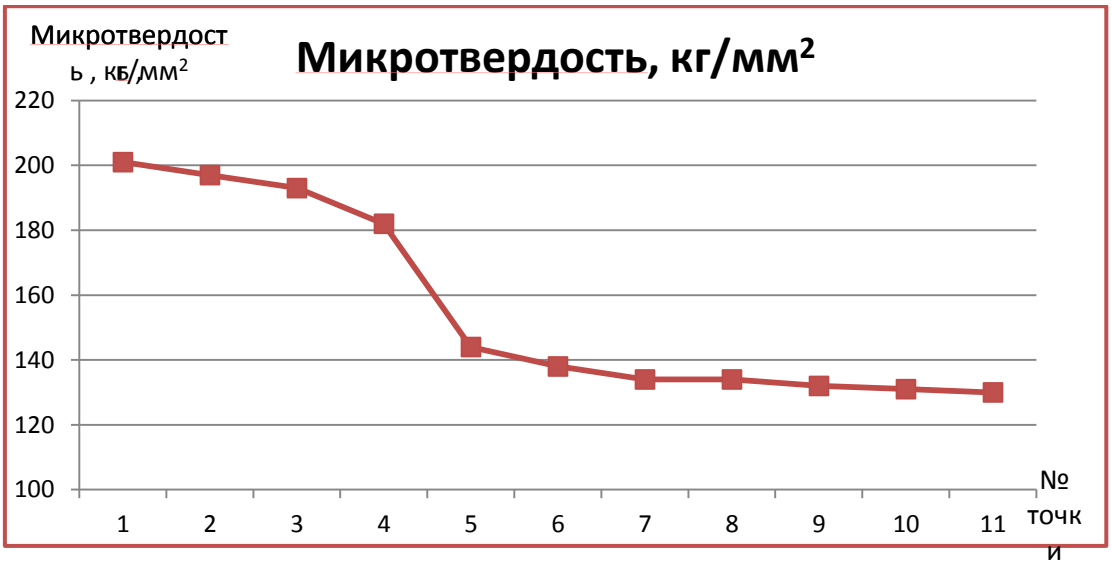


Рисунок 10 - График зависимости микротвердости от расстояния от края отверстия, полученного при режиме n=2000 об/мин, S=0,4 мм/об

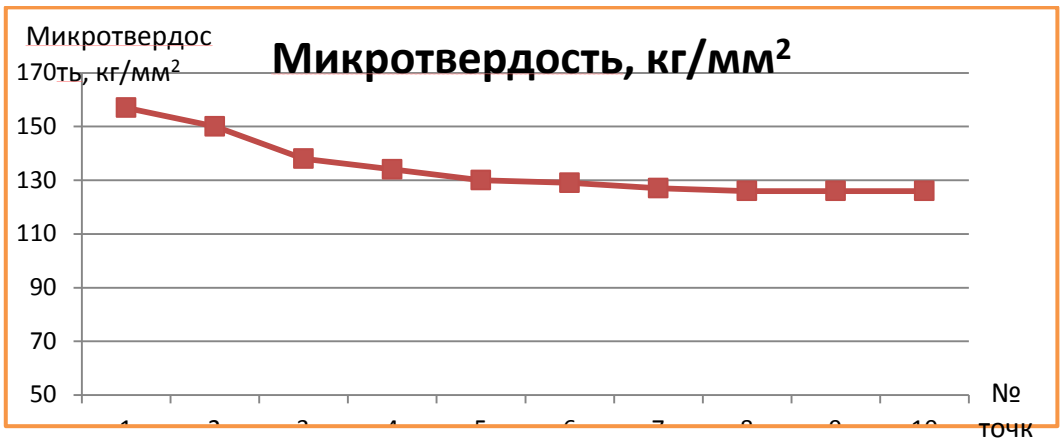


Рисунок 11 - График зависимости микротвердости от расстояния от края отверстия, полученного при режиме n=710 об/мин, S=0,1 мм/об

Рисунок 12 - График зависимости микротвердости от расстояния от края отверстия, полученного при режиме n=1000 об/мин, S=0,2 мм/об

Судя по графикам, в зоне образования отверстия твердость материала действительно повышается за счет явления наклепа.

Чтобы оценить возможность применения на практике данного метода, была определена точность получаемых размеров. Предварительно в трубной заготовке толщиной 1,5 мм были образованы 11 отверстий комбинированным инструментом (рисунок 13).

Рисунок 13 – Фото заготовки с отверстиями

Диаметр отверстий измерялся с помощью нутромера. Результаты представлены в таблице 3. По формуле $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}$ среднеквадратическое отклонение диаметров отверстий составило 8,13 мм. По формуле $\Delta = t_\lambda \sigma$ доверительный интервал разброса размеров с 95% вероятности составил 0,05 мм [9]. Таким образом, диаметр отверстия обработанного на станке составляет 8,13±0,05 мм, что соответствует допуску внутреннего диаметра внутренней резьбы 6 степени точности [10].

Таблица 3 – Результаты измерений диаметров отверстий

№ отверстия	Диаметр отверстия, мм
1	8,15
2	8,12
3	8,08
4	8,14
5	8,14
6	8,13
7	8,15
8	8,1
9	8,14
10	8,15
11	8,12
Среднее значение	8,129

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоменко В.В. Формообразование узлов крепления в тонкостенных деталях методом пластического сверления [Электронный ресурс] // В.В. Хоменко дис. канд. техн. наук. 2005. URL: http://tekhnosfera.com/view/110953/d#?page=1 (дата обращения 05.03.01).
2. Шаламов П.В. Формообразование отверстий под резьбу вращающимся пуансоном в тонколистовых заготовках. – дис. – Челябинск.: Изд-во Южно-Уральского государственного университета, 2012. – 153 с.
3. Шаламов П. В. Формирование отверстий вращающимся пуансоном в листовой заготовке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – Вып. 18. – № 31 (248). – С. 81-84.
4. Золотов, О.В. Совершенствование технологии обработки тонкостенных деталей методом пластического сверления [Электронный ресурс] // О.В. Золотов дис. канд. техн. наук. 2007. URL: http://tekhnosfera.com/view/204333/d#?page=1 (дата обращения 05.02.08).
5. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1979. – 213 с.
6. Валиев С.А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
7. Прагер А.И. Получение отбортованных отверстий в листовых деталях // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 11. – С. 28-30.
8. Бахвалов Н.С., Корнев А.А., Чижонков Е.В. Численные методы. Решение задач и упражнения.– М.: Дрофа, 2009. – 400 с.
9. Шахов Ю.Н., Е.И. Деза Численные методы.– М.: Либроком, 2010. – 248 с.
10. Общетехнический справочник / под ред. Е.А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1982. – 416 с.

P.V.Shalamov, R.M.Valeeva

THERMICAL DRILLING BY THE COMBINED TOOL

all: South Ural State University, Russian Federation

Abstract

Considered forming holes for threads a combined tool. The optimum flow for a given process with given parameters, carried out the measurement of geometrical parameters of flanging, the dependence of the microhardness on the distance from the edge of the hole.

Key words: thermical drilling, flanged holes, combined tool, axial force, threaded connection.

REFERENCES

[1] Khomenko V.V. Forming of Attachment Lugs in Light-Gage Parts by the Plastic Drilling Method [Electronic resource] // V.V. Khomenko Thesis of the candidate of engineering sciences. 2005. URL: http://tekhnosfera.com/view/110953/d#?page=1 (date of access 05.03.01).

[2] Shalamov P.V. Forming of Tap Holes by the Rotating Punch in Light-Gage Metal Blocks: thesis of the Candidate of Technical Sciences / P.V. Shalamov. – Ch., 2012. P. 153.

[3] Shalamov P.V. Forming of Tap Holes by the Rotating Punch in Light-Gage Metal Blocks / P.V. Shalamov //Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii (High Technologies in Mechanical Engineering). 2013. N 12(30). P.29-34.

[4] Zolotov O.V. Advancement of the Technology of Light-Gage Part Treatment by the Plastic Drilling Method [Electronic resource] // O.V. Zolotov Thesis of the candidate of engineering sciences. 2007. (date of access 05.02.08).

[5] Stepanski L.G. Calculations of Pressure Metal Treatment Processes. Moscow. Mechanical Engineering, 1979. 213 p.

[6] Valiev S.A. Combined Deep Drawing of Sheet Materials / S.A. Valiev. Moscow. Mechanical Engineering, 1974. 136 p.

[7] Prager A.I. Obtaining of Flanged Holes in Sheet Articles / A.I. Prager // Forging and stamping production (Press Forging), 1989. N 11. Pp. 28-30.

[8] Bakhvalov N.S., Kornev A.A., Chizhonkov A.V. Digital Methods. Solution of Problems and Exercises. Moscow. Drofa, 2009 400 p.

[9] Shakhov Ju., Deza E.I . Numerical Methods. Moscow. Librocom, 2010. 248 p.

[10] Basic Technical Handbook / edited by E.A. Skorokhodov. Moscow. Mechanical Engineering, 1982. 416 p.

УДК 539.42; DOI 10.1872/MMF-2016-120

К.Р. Шарипова, Р.Р. Нургалин, В.Р.Туктамышев, А.Ю. Крюков

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ CAE-СИСТЕМЫ ADVANTEDGE И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Кристина Рустамовна Шарипова, студент магистратуры
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: sharipowa.kristina2014@yandex.ru

Руслан Римович Нургалин, ведущий инженер, аспирант
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-137, E-mail: nurgalin.ruslan@gmail.com

Виталий Рафаилович Туктамышев, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-137, E-mail: tuktvr@gmail.com

Алексей Юрьевич Крюков, к.т.н., доцент
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, Пермь
Тел.: (342)2-198-249, E-mail: alexkryukov@list.ru

Аннотация

В статье рассматривается математический анализ расчетных параметров и эксплуатационных данных, процесса фрезерования, с помощью CAE-системы Advantedge. Так же проводится анализ соответствия с данными существующего эксперимента.

Ключевые слова: Advantedge, процесс фрезерования, CAE-системы, математический анализ, эксперимент, эксплуатационные данные.

В условиях современной конкуренции в области машиностроения, крайне важно обеспечить максимальный эффект от использования изделия. Но в то же время все известные конструкции в значительной степени оптимизированы и дают максимальный эффект на данном уровне

развития науки и техники. Дальнейшее повышение характеристик изделий лежит в области интеграции двух этапов жизненного цикла изделия – конструирование и изготовление.

Не секрет, что долговечность машиностроительной продукции, в первую очередь обусловлена развитием усталостных эффектов, таких как трещинообразование. В свою очередь развитие трещин, зависит от состояния поверхностного слоя, полученного в процессе обработки. Качество поверхностного слоя, в первом приближении можно оценивать по двум показателям: чистота и остаточные напряжения. Существует большой арсенал технологических методов, позволяющих обеспечить требуемые характеристики поверхностного слоя. Но в большинстве своем эти методы нацелены на получение, только одной составляющей «качества поверхностного слоя» - чистоты. Методы обеспечивающие остаточные напряжения поверхностного слоя на заданном уровне, носят деформирующий или термический характер. Поэтому их применение ограничено. На финишных операциях особо ответственных деталей, термическая, либо ударное воздействие, в большинстве случаев не допустимо.

Наиболее распространенными методами чистовой обработки деталей, являются механические операции лезвийной обработки. Данный тип операций не дает возможности получать предсказуемые уровень остаточных напряжений в поверхностном слое. Это связанно с тем, что формирование остаточных напряжений, при данном типе обработки, зависит от сочетания нескольких факторов связанных с режимами обработки, геометрией режущего инструмента и свойствами обрабатываемого материала[1].

С целью получения зависимостей, описывающих изменения остаточных напряжений при фрезеровании, проводился ряд работ [3].Разработка математической модели, описанная в данной статье, проводилась на конкретном инструменте, режиме обработки и материале. При изменении хотя бы одного из элементов, модель, теряет адекватность и ее применение становится не возможным. Для получения новой модели требуется проведение новых экспериментов и статистическая обработка полученных результатов. Такой подход вызывает ряд проблем, главная из них, это выведение из серийного производства дорогостоящего оборудования. С целью снижения затрат станко-часов, для проведения необходимых экспериментальных работ, был предложено проводить первичные исследования не на реальном оборудовании, а с применением методов конечно элементного моделирования процессов резания. И только после определения оптимальных режимов обработки для конкретной пары инструмент-деталь, возможно проводить проверку адекватности полученных результатов на реальном оборудовании.

Для проверки данной методики оценки влияния режимов фрезерования на величину остаточного напряжения (далее ОН), на поверхности предварительно отожженного образца из стали 09Г2С торцевым фрезерованием наносились канавки (рис. 1).

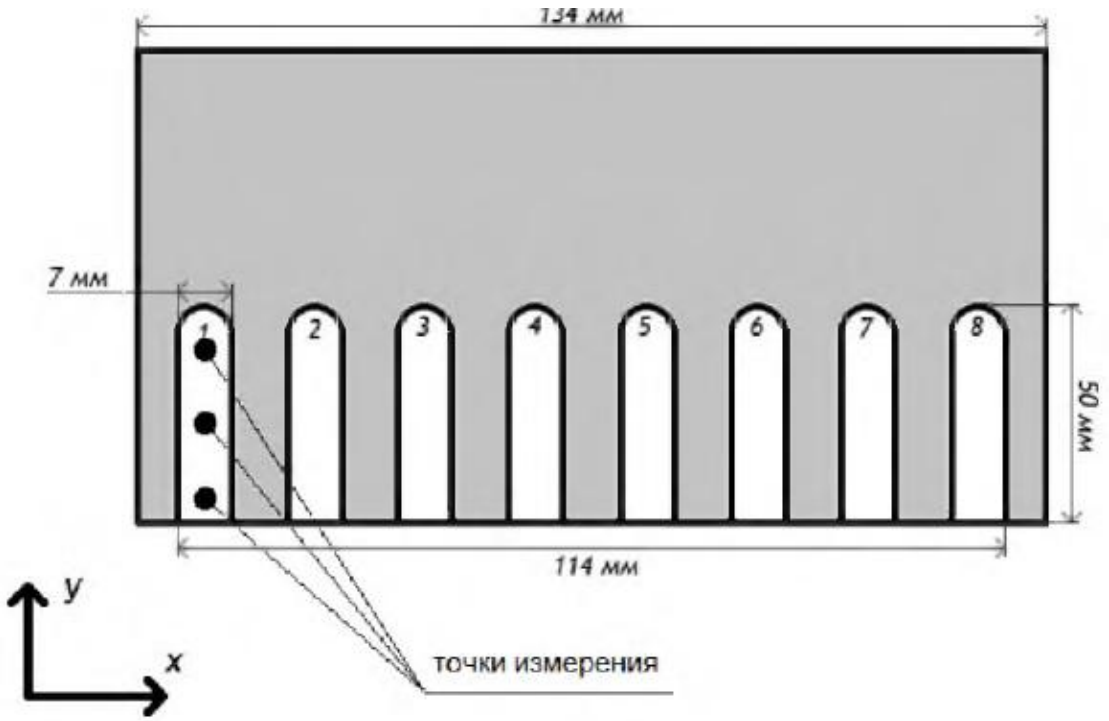


Рис. 1. Общий вид образца

Нанесение канавок проводилось на обрабатывающем центре Matec 40HV с использованием фрезы диаметром 4 мм SEE04Z4L50S AH725. Определение остаточных технологических напряжений проводилось методом рентгеновской дифрактометрии с использованием роботизированного комплекса Xstress 3000 G3 (STRESSTECH, Финляндия) и коллиматором, обеспечивающем диаметр области измерения 3 мм (рис. 2, 3).

Метод рентгеновской дифрактометрии основан на измерении параметра кристаллической решетки d при дифракции рентгеновских лучей. Величина напряжений в этом случае определяется при сравнении измеренной величины со значением параметра решетки в недеформированном состоянии d_0.

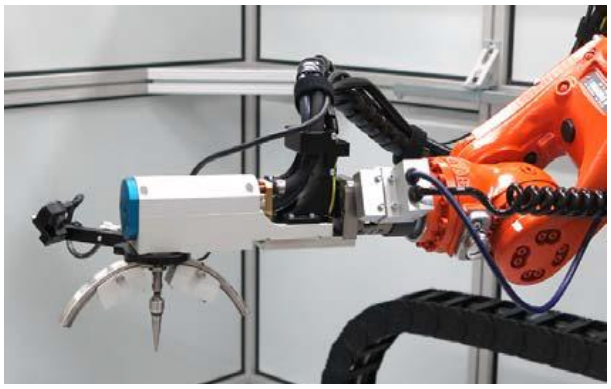


Рис. 2. χ-модифицированный гониометр рентгеновского анализатора напряжений Xsress3000, установленный на роботе

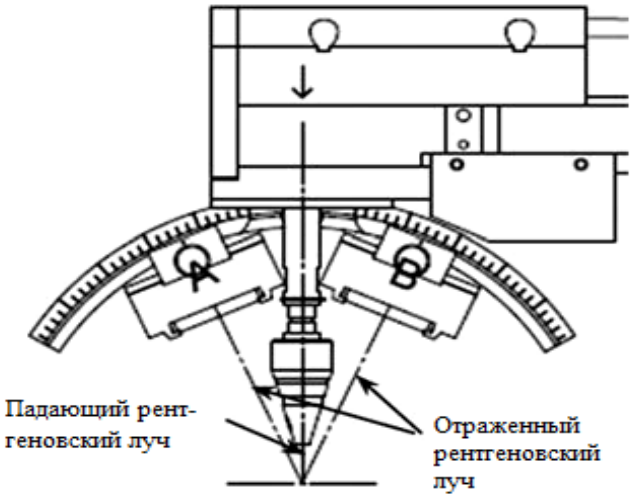


Рис. 3. Измерение напряжений с помощью дифрактометра Xsress 3000 с модифицированным гониометром

При использовании этой схемы измерения межплоскостные расстояния кристаллической решетки dχ+ и dχ- при углах φ и χ определяются одновременно на двух линейных позиционночувствительных детекторах A и B, расположенных симметрично на правой и левой сторонах дуги гониометра (рис. 4) [6].

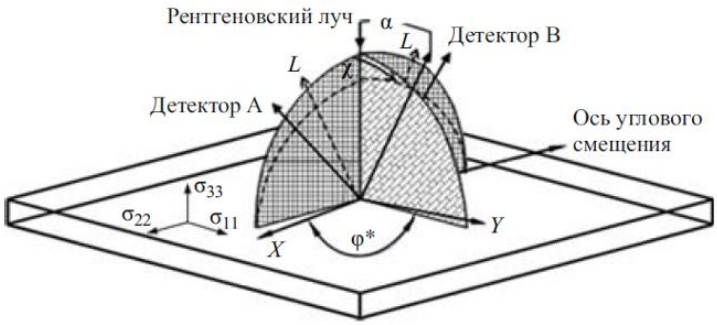


Рис. 4. Модифицированный χ-гониометр [6] L – вектор дифракции, биссектриса угла между падающим и отраженным рентгеновским лучом в плоскости дифракции

Измерение остаточных напряжений проводилось в трёх точках каждой канавки - в середине и на краях канавки (рис. 1). В результате измерений определялись компоненты тензора напряжений для плоского напряженного состояния: σ_x и σ_y - нормальные компоненты вдоль и поперек оси канавки; τ_{xy} - касательные напряжения. В табл. 1 представлены параметры рентгеновского излучения, применяемого для определения остаточных напряжений.

Таблица 1

Параметры рентгеновского излучения

Тип рентгеновской трубки	Cr K-a
Длина волны, A^0	2,2897
Угол 2θ, град	134-138

В качестве основных технологических параметров, были выбраны:

1. Линейная скорость V на внешнем диаметре режущего инструмента, м/с.
2. Подача инструмента на один зуб S_Z, мм/зуб.
3. Глубина резания - a_Z, мм.

Для получения функциональной зависимости остаточных напряжений от режимов фрезерования использована математическая модель трехфакторного эксперимента *(1)*

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{3} a_i x_i + \sum_{i<J} a_{ij} x_i x_j + a_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

На основании полученных результатов эксперимента были рассчитаны коэффициенты a_0, a_{ij}, a_{123} и получено уравнение регрессии в виде *(2)*

$$\sigma_{OH} = -360{,}075 + 81{,}625x_1 + 133{,}55x_2 + 44{,}175x_3 - \cdots$$
$$\cdots - 77{,}95x_1x_2 - 35{,}08x_1x_3 - 59{,}70x_2x_3 + 58{,}45x_1x_2x_3 \quad (2)$$

Математический анализ на соответствие расчетных параметров производилось с помощью программы AdvantEdge.

Это программное обеспечение, использующее метод конечных элементов, которое позволяет прогнозировать поведение инструмента и обрабатываемой детали, путем создания виртуальной среды тестирования для оценки конструкции инструмента в 2D и 3D постановке.[2]

AdvantEdge может быть полезен при проектировании инструментов для фрезерования, обработки канавок, распиливания, протягивания, сверления и нарезания резьбы. [2]

Так же пользователи AdvantEdge имеют возможность анализировать температуру и напряжение для возможного предсказания поведения износа инструмента и производительности. При сравнении поведения инструмента и материала заготовки легко подбираются оптимальные параметры. [2]

С помощью AdvantEdge можно:

- Сравнить результаты моделирования для оптимизации режимов резания или геометрии инструмента;
- Проводить анализ температуры и остаточного напряжения профилей для снижения износа инструмента;
- Использовать модели стружкообразования для прогнозирования улучшенного удаления стружки;
- Оценивать поведения участков при обработке, для снижения сил резания и потребляемой мощности.[2]

В качестве исходных данных для анализа в систему были AdvantEdge введены свойства обрабатываемого материала и 3д модель используемой фрезы (рис 5, 6).

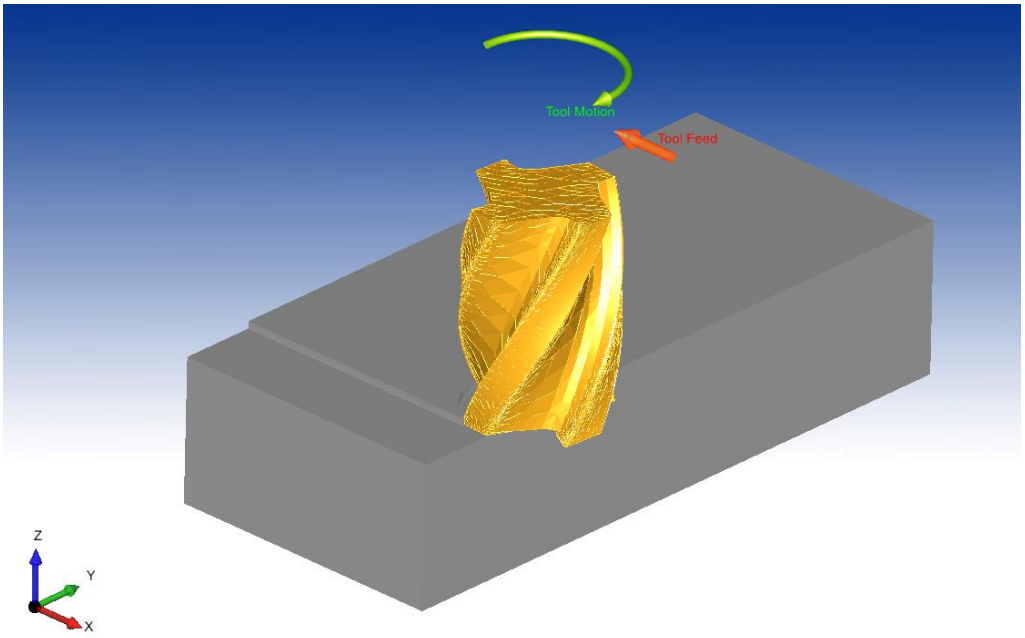


Рис. 5. 3D модели используемой фрезы и заготовки с заданными параметрами в рабочей среде AdvantEdge

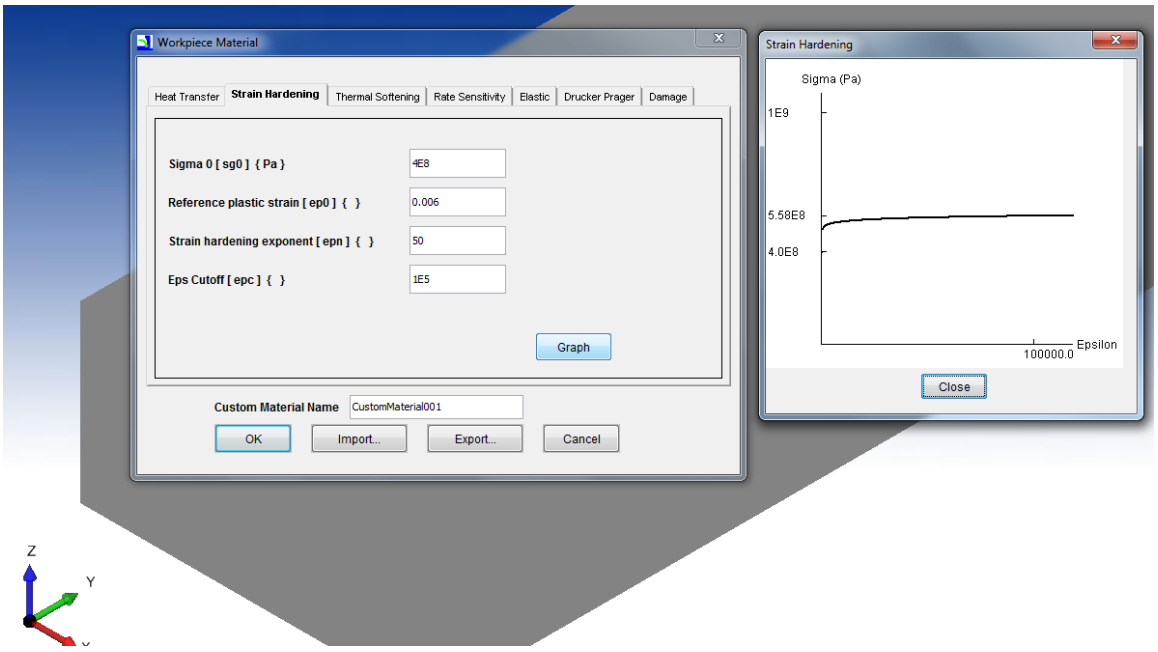


Рис. 6. Исходные данные и свойства обрабатываемого материала в системе Advantedge

В результате моделирования были получены поля распределения остаточных напряжений и температур в процессе резания (рис 7, 8).

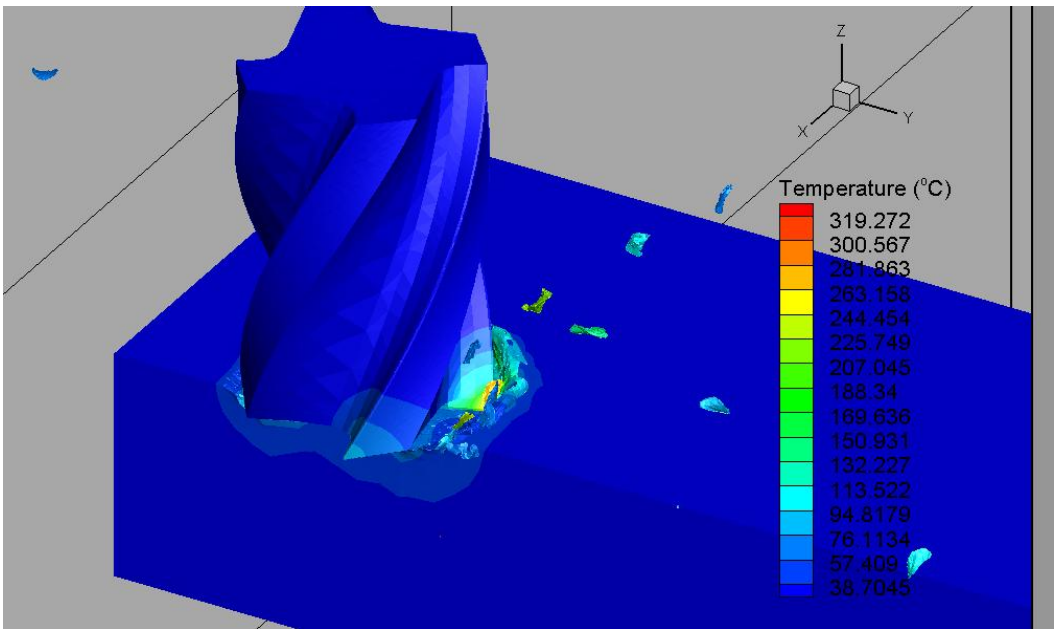


Рис. 7. Распределение температур в процессе резания

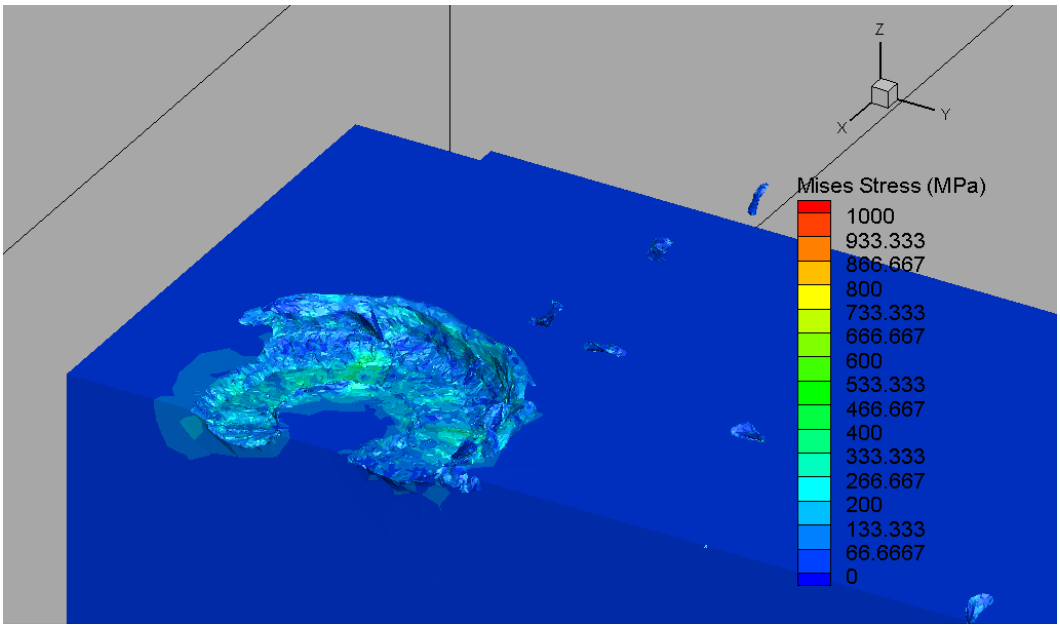


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений в процессе резания

Анализ методики проведения эксперимента и результатов эксперимента позволяют сделать следующие выводы

Сравнение результатов, полученных при математическом моделировании методом планирования эксперимента и моделировании конечно-элементным методом показало, что эти методы являются сравнимыми, а предложенная методика применимой. В то же время надо отметить, что сравнение проводилось, всего для одного сочетания материала и инструмента. Для точной оценки необходимо провести более широкий анализ соответствия различных пар инструмента и материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние режимов механической обработки стали 09г2с на формирование остаточных напряжений / Трофимов В.Н и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015.- №2. – с. 48-53
2. Advantedge оф. сайт компании производителя программного обеспечения [Электронный ресурс] URL: http://www.thirdwavesys.com/advantedge/ (дата обращения 14.03.2016)
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин. М.: Высшая школа, 1988. 238 с.
4. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М.; Л.: Машгиз, 1956. 239 с.
5. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
6. Яблокова Н.А., Трофимов В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния лопаток компрессора методами

рентгеноструктурного анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013 - №1. – 36-44 с.
7. K. Hartmann, E. Lezki, W. Schafer. StatistisheVersuchsplanung und -auswertung inStoffwirtschaft. VEB DeutscherVerlagfurGrundstoffindustrie. Leipzig. 1974.
8. Трофимов В.Н. Модель накопления поврежденности при пластической деформации// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.2007. № 1 (17). С. 47-50.
9. Трофимов В.Н., Карманов В.В., Панин Ю.В., Корионов М.А. Определение остаточных напряжений при одноосной пластической деформации цилиндрического стержня //Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.2015. № 2 (50). С. 48-53.
10. Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Чернова Т.В. Условия улучшенного (смешанного)режима трения при волочении // Вестник Магнитогорского государственного техническогоуниверситета им. Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 31-33.
11. Гитман М.Б., Пустовойт К.С., Столбов В.Ю., Федосеев С.А., Гун Г.С. Концептуальнаямодель ситуационного центра промышленного предприятия // Вестник Магнитогорскогогосударственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 102-106.
12. Трофимов В.Н., Кузнецова Т.В., Панин Ю.В., Шадрин А.А. Напряжение волочениясплошных профилей прямоугольного сечения // Вестник Магнитогорского государственноготехнического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 2 (46). С. 40-44.

K.R. Sharipova, R.R. Nurgalin, V.R.Tuktamyshev, A.Ju. Krjukov

MATHEMATICAL ANALYSIS OF RELEVANCE BETWEEN CAE-SYSTEM ADVANTEDGE CALCULATION PARAMETERS AND MILLING PROCESSES PERFORMANCE DATA

Abstract

The article deals with the mathematical analysis of the design parameters and performance data of the milling process using CAE-systems Advantedge. The relevance analysis to existing experiment data is also performed.

Key words: AdvantEdge, milling process, the CAE-systems, mathematical analysis, experiment, performance data.

REFERENCES

[1] The machining conditions influence to residual stress formation in steel 09g2s / Trofimov V.N and others // The treatment of solid and multilayer material. – 2015.- N2. Pp. 48-53
[2] Advantedge official site of software company [Electronic resource] URL: http://www.thirdwavesys.com/advantedge/ (accessed date 14.03.2016)

[3] Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. Machines reliability. M.: High school, 1988. 238 p.
[4] Matalin A.A. Surface quality and service characteristics of the machine parts. M.; L.: Manufacturing engineering, 1956. 239 p.
[5] Suslov A.G. The quality of the machine parts facial layer. M.: Manufacturing engineering, 2000. 320 p.
[6] Jablokova N.A., Trofimov V.V. Ɪnvestigation of the compressor blades stress-strain state by X-ray diffraction method // Industrial laboratory. Materials diagnostic. – 2013 - N1. Pp. 36-44.
[7] K. Hartmann, E. Lezki, W. Schafer. StatistisheVersuchsplanung und -auswertung inStoffwirtschaft. VEB DeutscherVerlagfurGrundstoffindustrie. Leipzig. 1974.
[8] Trofimov V.N. Damage accumulation model for plastic deformation// Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosova reporter .2007. N 1 (17). Pp. 47-50.
[9] Trofimov V.N., Karmanov V.V., Panin Ju.V., Korionov M.A. Residual stresses determination for single axis plastic deformation of cilindric rod // Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosova reporter. 2015. N2(50). Pp.48-53.
[10] Kolmogorov G.L., Trofimov V.N., Chernova T.V. Conditions of the improved (mixed) drawing friction regime // Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosova reporter. 2013. N1 (41). Pp. 31-33.
[11] Gitman M., Pustovojt K., Stolbov V., Fedoseev S., Gun G. Conceptual model of industrial enterprise situation centre // Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosova reporter. 2014. N1 (45). Pp. 102-106.
[12] Trofimov V.N., Kuznecova T.V., Panin Ju.V., Shadrin A.A. The rectangular solid section drawing stress // Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosova reporter. 2014. N 2 (46). Pp. 40-44.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 658.62.018.4; DOI 10.1872/MMF-2016-121

А.Е. Алтапова[1], М.И.Седлер[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯМИ И КОММУНИКАЦИИ С ПОСТАВЩИКАМИ

[1]Алена Евгеньевна Алтапова, студент бакалавр
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-0764, E-mail: altapova_a@bk.ru

[2]Мария Ильинична Седлер, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru

Аннотация

Данная работа посвящена вопросам управления качеством поставок материалов и комплектующих на предприятие ООО «БСХ Бытовые приборы». Для этого был произведен анализ существующей системы управления рекламациями, создана база данных для регистрации рекламаций, их анализа и автоматизации процесса управления несоответствиями и коммуникации с поставщиками. Внедрение предложенных решений повысило быстродействие и эффективность процесса работы с поставщиками по вопросам некачественной продукции.

Ключевые слова: предприятие, несоответствие качества продукции, коммуникация с поставщиками.

Введение

Цель работы – повышение качества процесса управления несоответствиями и коммуникации с поставщиками с помощью создания автоматизированного приложения. Для решения поставленной проблемы создано многопользовательское автоматизированное приложение для регистрации рекламаций, их анализа и автоматизации процесса управления несоответствиями и коммуникации с поставщиками.

Работа выполнена для предприятия ООО «БСХ Бытовые приборы», на котором существует система регистрации дефектной продукции в SAP-системе, используемой всеми 42 предприятиями мирового концерна «BSH Hausgerate Bosch», в число которых входит ООО «БСХ Бытовые приборы».

ООО «БСХ Бытовые приборы» состоит из двух заводов: завода холодильников и завода стиральных машин. Продукция выпускается под марками Bosch и Siemens. Предприятие было основано в 2005 году. На данный момент на нем работают около 1000 сотрудников. ООО «БСХ Бытовые приборы» ежегодно выпускает 400 тыс. холодильников и 300 тыс. стиральных машин. Оба завода осуществляют сборку продукции из деталей собственного производства и поставляемых компонентов [1]. Для производства продукции осуществляется закупка материалов и компонентов (в дальнейшем материалы).

Процесс управления несоответствиями до внедрения системы

Процесс управления несоответствиями на заводе холодильников заключается в следующем: при обнаружении продукции несоответствующего качества инспектор входного контроля в SAP-системе создает запись с уникальным номером, который содержит дату обнаружения, номер материала, номер поставщика, наименование дефекта. Если дефект является массовым (более 10% материалов из поставки имеют данный дефект), поставка блокируется и поставщику отправляется претензия - файл с расширением .pdf. Претензия создается специалистом по качеству в системе SAP и имеет уникальный номер [3].

К сожалению, SAP-система является сложной и неудобной для большинства работников ООО «БСХ Бытовые приборы»: интерфейс выполнен на английском языке и время реагирования на запросы пользователя зачастую превышает десятки минут. Поэтому для хранения данных по рекламациям предприятие использует таблицу MS Excel – General Table (рисунок 1), с которой работают 12 пользователей. Такая организация работы является неудобной.

При существующей системе виды дефектов не систематизированы, что делает невозможным процесс анализа, так как один и тот же дефект может иметь произвольные формулировки.

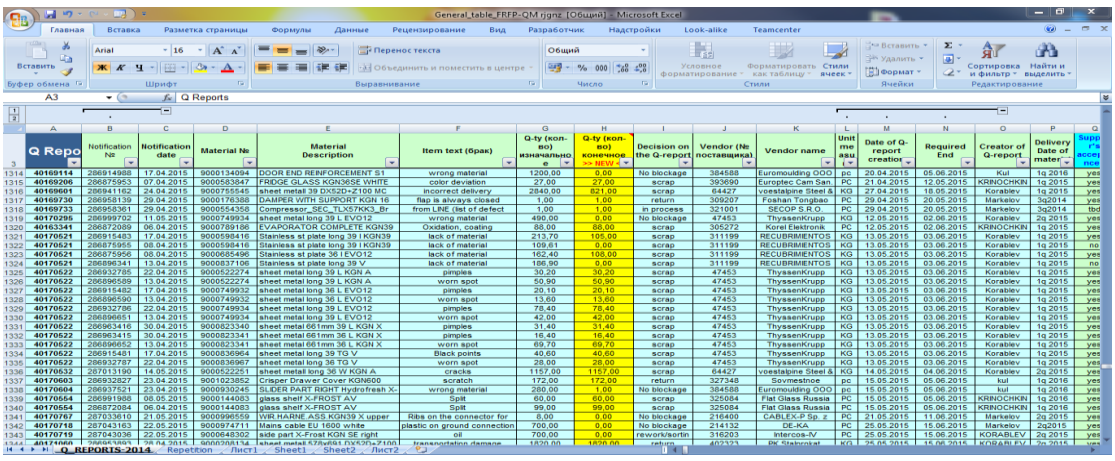


Рисунок 1 – Таблица Excel для отслеживания статуса рекламаций

Для устранения выявленной проблемы было принято решение воспользоваться опытом иностранных заводов, которые используют классификацию дефектов, имеющуюся в SAP-системе. Так как SAP-система имеет интерфейс на английском языке, а типы и подтипы дефектов в ней имеют несколько размытые названия, была создана презентация для ознакомления работников с изменением процесса заполнения таблицы. После внедрения данного изменения стало возможным собирать статистику по повторяющимся дефектам за определенный период времени (рисунок 2), что значительно упростило и облегчило процесс управления качеством поставок.

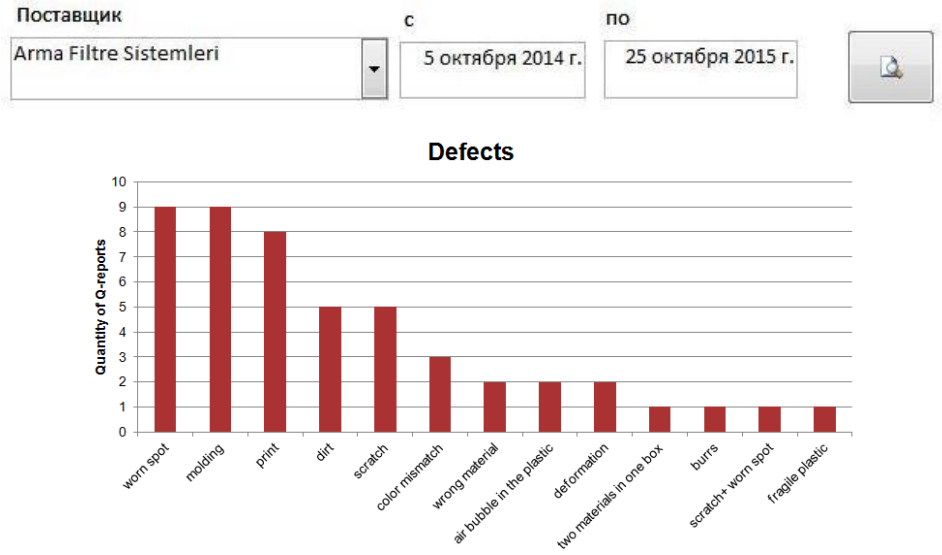


Рисунок 2 – Количество зафиксированных несоответствий по типу дефекта

После получения претензии поставщик обязан предоставить решение по заблокированной поставке в течение 5 дней [4]. Решение может быть следующим: возврат, утилизация или сортировка/доработка с последующим использованием либо всего заблокированного материала, либо его части.

Так как в течение недели достаточно большое количество материала подвергается блокировке, а склад имеет ограниченную емкость, специалист по качеству должен постоянно отслеживать даты предоставления решения по материалу, что отнимает много времени ввиду большого количества рекламаций. Задача специалиста по качеству усложняется тем, что по каждой рекламации контролируются два срока: срок предоставления решения по материалу и срок предоставления 8D-отчета от поставщика (отчета с указанием причины дефекта и внедренных действий по предотвращению его появления в дальнейшем). При любом нарушении сроков предприятие несет существенные потери, а специалист по качеству зачастую совершает ошибки.

После получения решения по материалу специалист входного контроля либо утилизирует его, либо готовит к возврату, либо связывается с аутсорсинговой организацией. После этого специалист отдела финансового контроля рассчитывает дополнительные издержки, специалист отдела закупок выставляет финансовую претензию, специалист отдела финансов отслеживает получение документа о признании дебиторской задолженности поставщика.

Блок-схема процесса управления несоответствиями представлена на рисунке 3.

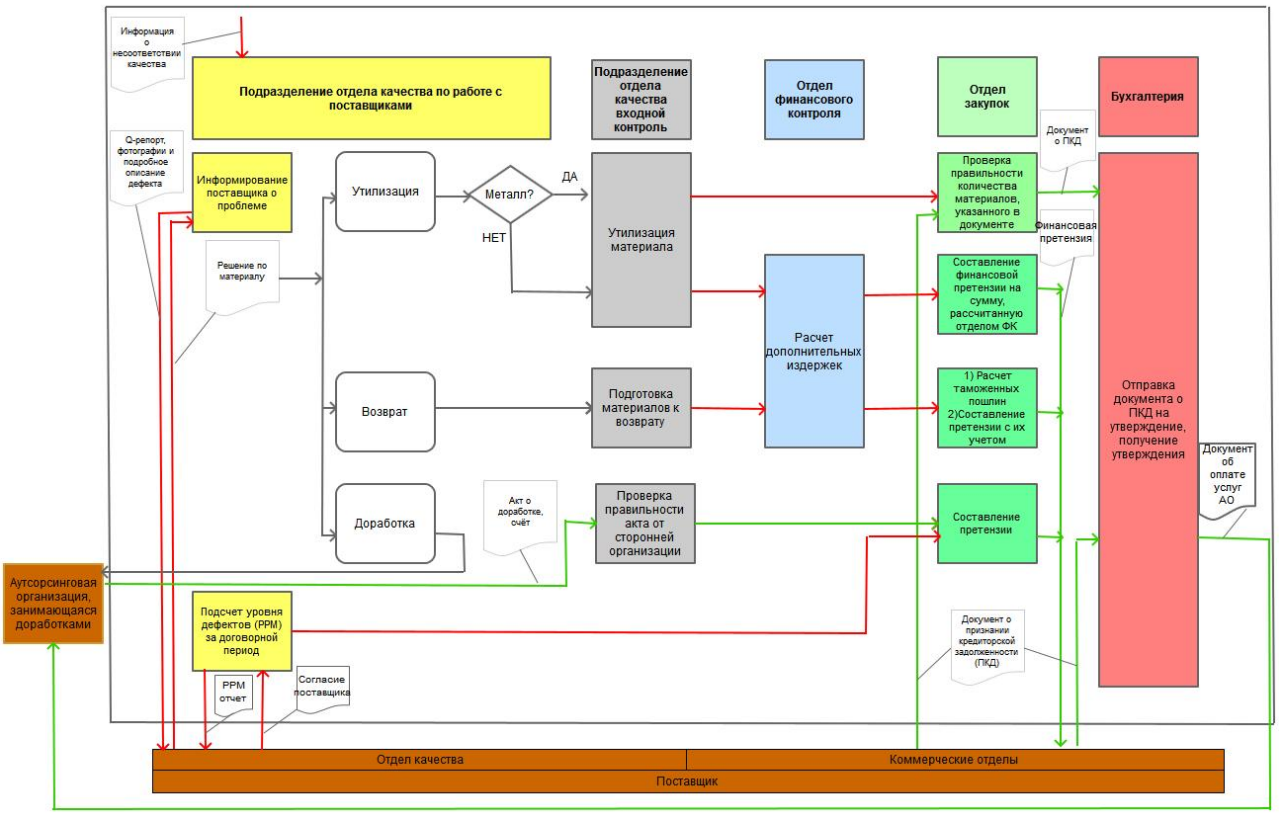


Рисунок 3 - Блок-схема процесса управления несоответствиями

Реализация каждого решения предполагает формирование документов и учет произведенных затрат. Учет затрат на доработку, утилизацию и возврат является чрезвычайно важным, так как от этого напрямую зависит получение прибыли предприятием. По данным за 2015 год долг поставщиков ООО «БСХ Бытовые приборы» составляет 1 млн. рублей.

Автоматизация процесса

В результате выполнения данной работы для решения поставленных проблем на сервере предприятия была создана база данных MS Access GenTa, к таблицам которой подключены пользовательские модули - базы данных MS Access. В состав пользовательских модулей входят формы, отчеты, запросы к таблицам базы данных GenTa. Таким образом, при

запуске пользовательских модулей загружается не весь объем данных, а требуемый диапазон, что существенно повышает быстродействие работы [3].

Для отслеживания процесса управления несоответствиями были разработаны формы для всех подразделений в виде “To-do” листа. Таким образом, при открытии специалистом нужной формы на экране появляются только те задачи, которые требуют немедленного решения. Это значительно упростило работу.

В процессе управления несоответствиями и коммуникации с поставщиками принимают участие 5 подразделений предприятия: подразделение отдела качества по работе с поставщиками (6 пользователей), подразделение отдела качества входного контроля (2 пользователя), отдел финансового контроля (1 пользователь), отдел закупок (2 пользователя), отдел финансов (1 пользователь). Для каждого подразделения создан свой модуль. При этом каждому пользователю модуля подразделения доступна только его информация.

Подразделение по работе с поставщиками отдела качества отвечает за информирование поставщика о выявленном несоответствии, получение от него решения по материалу и 8D-отчета. Для обеспечения отслеживания сроков предоставления решения по материалу и 8D-отчета на первом этапе было внедрено условное форматирование записей таблиц GenTa (рисунок 4).

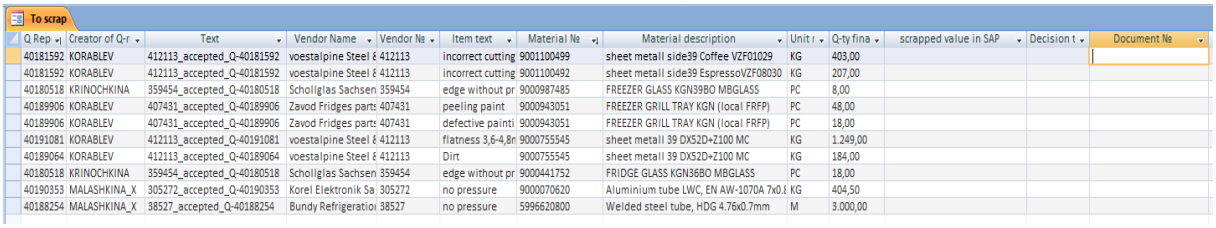
frmQMS-S_A

Q Report	Material №	Material description	Def_Type Sp	Item text	Q-ty ini	I	Decision on	Q-ty final	Vendor Nan	Creator of C	Decision
40177424	9001039105	MAF Top Plastic EVO15 BO Printed	cumulative	surface defect	2,00	PC	return	2,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	
40177425	9000143957	strip with fixation f glass shelf AV	cumulative	defect of molc	150,00	PC	return	150,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	
40177426	9000442005	UPPER DOOR-END GLASS DOOR 60	dimensional fa	bad flatness; fi	2.958,00	PC	No blockage	0,00	INYECCIONES I	ALTAPOVA_X	usage
40177485	9000986250	Crisper drawer Cover KGN600 SE n	printing	print	360,00	PC	return	360,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	
40177622	9000152124	Water drain inside	molding	burr	126,00	PC	return	126,00	Aileron polifo	ALTAPOVA_X	return
40177623	9001031786	Chiller EVO15 BO Value+ printed	printing	no print	32,00	PC	return	32,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40177624	9001112504	VEGETABLE BOX VZF OEM	printing	no print	55,00	PC	return	55,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40177625	9000171626	PLINTH ASSEMBLY 600mm X-Cool	assembling	part incorrectl	345,00	PC	return	345,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40177627	9000790666	Upper Doorend EVO12 WHITE w/o	molding	dark stains	29,00	PC	return	29,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40177704	9000589996	SE DAIRY COMPAR.VZF05040 w.adl	abrasion track	worn spot	960,00	PC	in process	562,00	BRENTA P.C.M	ALTAPOVA_X	
40177713	9000930245	SLIDER PART RIGHT Hydrofresh X-F	confusion of m	two materials	140,00	PC	in process	140,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40177824	9000119035	DRAWER BODY X-COOL KGV Norm	inclusion/bubl	dirt	542,00	PC	rework/sortin	248,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	return
40177978	9000753669	BO Diarycomp. asm. print A+,silve	Part/feature m	Part/feature m	10,00	PC	return	10,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40177979	9000337113	Tray cover 11,5x435,6 SE VZF39100	confusion of m	wrong materia	800,00	PC	in process	800,00	APU Schonber	ALTAPOVA_X	
40178102	9000944400	COMP.COVER HINGE RIGHT BO/SE	confusion of m	two materials	360,00	PC	rework/sortin	360,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40179511	9001039105	MAF Top Plastic EVO15 BO Printed	Deformation	deformation	340,00	PC	in process	340,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40179705	9001100834	Condenser extruded profile 1195	Dimensional /	Dimensional fa	1.500,00	PC	in process	1.500,00	OOO Primo	ALTAPOVA_X	
40179707	9000119035	DRAWER BODY X-COOL KGV Norm	Deformation	deformation	60,00	PC	return	60,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40179657	9000944387	COMPL.COVER HINGE LEFT BO/SE /	Deformation	deformation	675,00	PC	in process	675,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40180083	9000930245	SLIDER PART RIGHT Hydrofresh X-F	Part/feature ir	two materials	140,00	PC	in process	140,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40180083	9000930245	SLIDER PART RIGHT Hydrofresh X-F	Part/feature ir	wrong materia	140,00	PC	in process	140,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40180083	9000930246	SLIDER PART LEFT Hydrofresh X-Fr	Part/feature ir	wrong materia	140,00	PC	in process	140,00	Euromoulding	ALTAPOVA_X	
40178212	9000124861	FRONT FREZ.DRAWER 225 X_FROS	inclusion/bubl	Black points	200,00	PC	return	200,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178593	9000752088	SE DAIRY COMP.VZF35016 with pri	abrasion track	worn spot	340,00	PC	in process	340,00	BRENTA P.C.M	ALTAPOVA_X	in process
40178595	9000668578	Control panel KGN MechD EA200 v	printing	bad print	300,00	PC	return	300,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000119032	DRAWER SCREEN X-COOL KGV Nor	Dull marks, bri	surface defect	24,00	PC	return	24,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000124863	FRONT FREZ.DRAWER BIG-BOX X_F	Dull marks, bri	surface defect	2,00	PC	return	2,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000140789	FREEZER FLAP X-COOL KGV	Dull marks, bri	surface defect	4,00	PC	return	4,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000171626	PLINTH ASSEMBLY 600mm X-Cool	Dull marks, bri	surface defect	18,00	PC	return	18,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000208017	PRINTED DOORTRAY H=100 VZF050	Dull marks, bri	surface defect	1,00	PC	return	1,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return
40178941	9000223517	DRAWER SCREEN BOTTOM PRINTE	Dull marks, bri	surface defect	4,00	PC	return	4,00	Sovmestnoe p	ALTAPOVA_X	return

Рисунок 4 - Условное форматирование записей для отслеживания сроков

Подразделение входного контроля отдела качества отвечает за утилизацию материала, подготовку материала к отправке, коммуникацию с аутсорсинговой организацией по вопросам доработок. Пользовательский

модуль данного подразделения состоит из трех табличных форм в виде листа “To-do”: для утилизации, возврата и просмотра всех рекламаций и ввода данных о доработках. Пример формы утилизации представлен на рисунке 5.



Q Rep	Creator of Q-r	Text	Vendor Name	Vendor №	Item text	Material №	Material description	Unit r	Q-ty fina	scrapped value in SAP	Decision t	Document №
40181592	KORABLEV	412113_accepted_Q-40181592	voestalpine Steel &	412113	incorrect cutting	9001100499	sheet metall side39 Coffee VZF01029	KG	403,00			
40181592	KORABLEV	412113_accepted_Q-40181592	voestalpine Steel &	412113	incorrect cutting	9001100492	sheet metall side39 EspressoVZF08030	KG	207,00			
40180518	KRINOCHKINA	359454_accepted_Q-40180518	Schollglas Sachsen	359454	edge without pr	9000987485	FREEZER GLASS KGN39BO MBGLASS	PC	8,00			
40189906	KORABLEV	407431_accepted_Q-40189906	Zavod Fridges parts	407431	peeling paint	9000943051	FREEZER GRILL TRAY KGN (local FRFP)	PC	48,00			
40189906	KORABLEV	407431_accepted_Q-40189906	Zavod Fridges parts	407431	defective painti	9000943051	FREEZER GRILL TRAY KGN (local FRFP)	PC	18,00			
40191081	KORABLEV	412113_accepted_Q-40191081	voestalpine Steel &	412113	flatness 3,6-4,8r	9000755545	sheet metall 39 DX52D+Z100 MC	KG	1.249,00			
40189064	KORABLEV	412113_accepted_Q-40189064	voestalpine Steel &	412113	Dirt	9000755545	sheet metall 39 DX52D+Z100 MC	KG	184,00			
40180518	KRINOCHKINA	359454_accepted_Q-40180518	Schollglas Sachsen	359454	edge without pr	9000441752	FRIDGE GLASS KGN36BO MBGLASS	PC	18,00			
40190353	MALASHKINA_X	305272_accepted_Q-40190353	Korel Elektronik Sa	305272	no pressure	9000070620	Aluminium tube LWC, EN AW-1070A 7x0.8	KG	404,50			
40188254	MALASHKINA_X	38527_accepted_Q-40188254	Bundy Refrigeratio	38527	no pressure	5996620800	Welded steel tube, HDG 4.76x0.7mm	M	3.000,00			

Рисунок 5 – Табличная форма со списком материалов, подлежащих утилизации

Отдел финансового контроля отвечает за расчет дополнительных издержек на хранение и доставку материала. Форма сотрудника отдела финансового контроля представлена на рисунке 6.

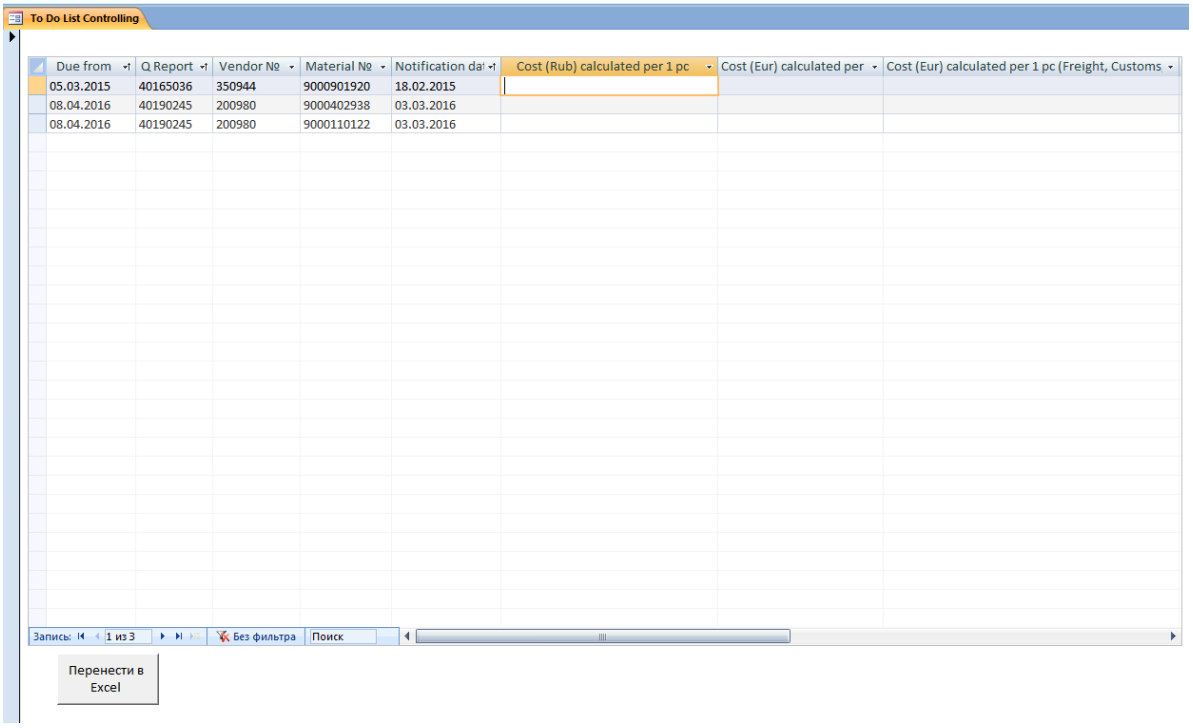


Рисунок 6 – Форма отдела финансового контроля

Отдел закупок отвечает за создание и отправку финансовых претензий поставщику. Форма отдела закупок (рисунок 7) разбита на 5 вкладок – утилизация, возврат, доработка, взыскание штрафных санкций за превышение уровня дефектов, отслеживание претензий.

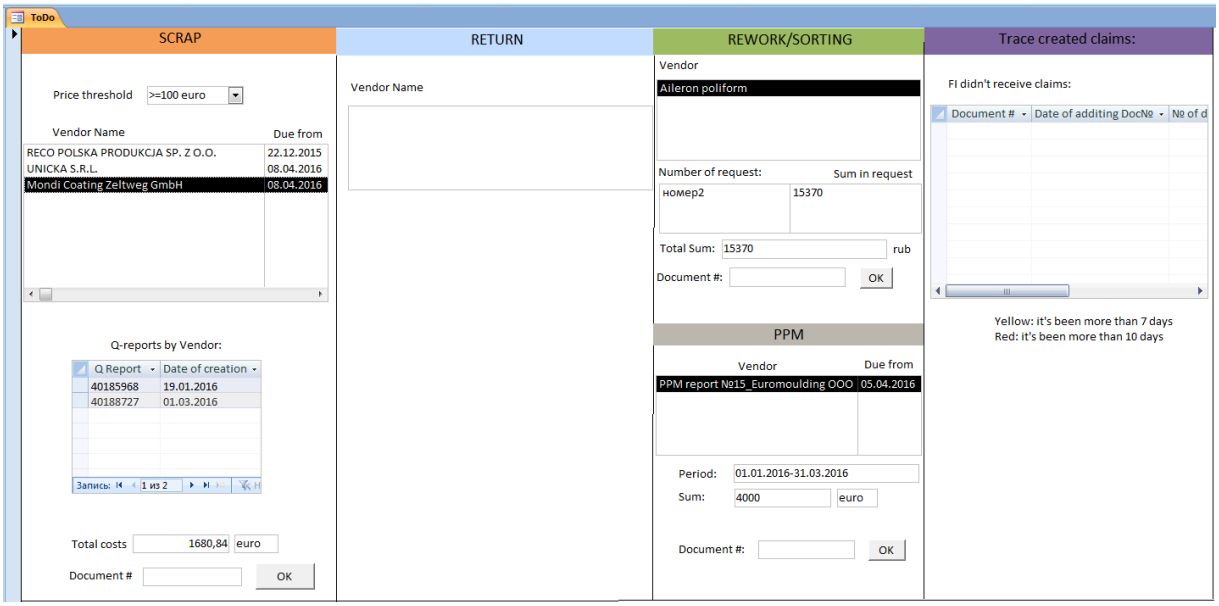


Рисунок 7 – Форма отдела закупок

Отдел финансов отвечает за получение документов о признании дебиторской задолженности поставщика и списание данной суммы со следующего заказа. Форма отдела финансов представлена на рисунке 8.

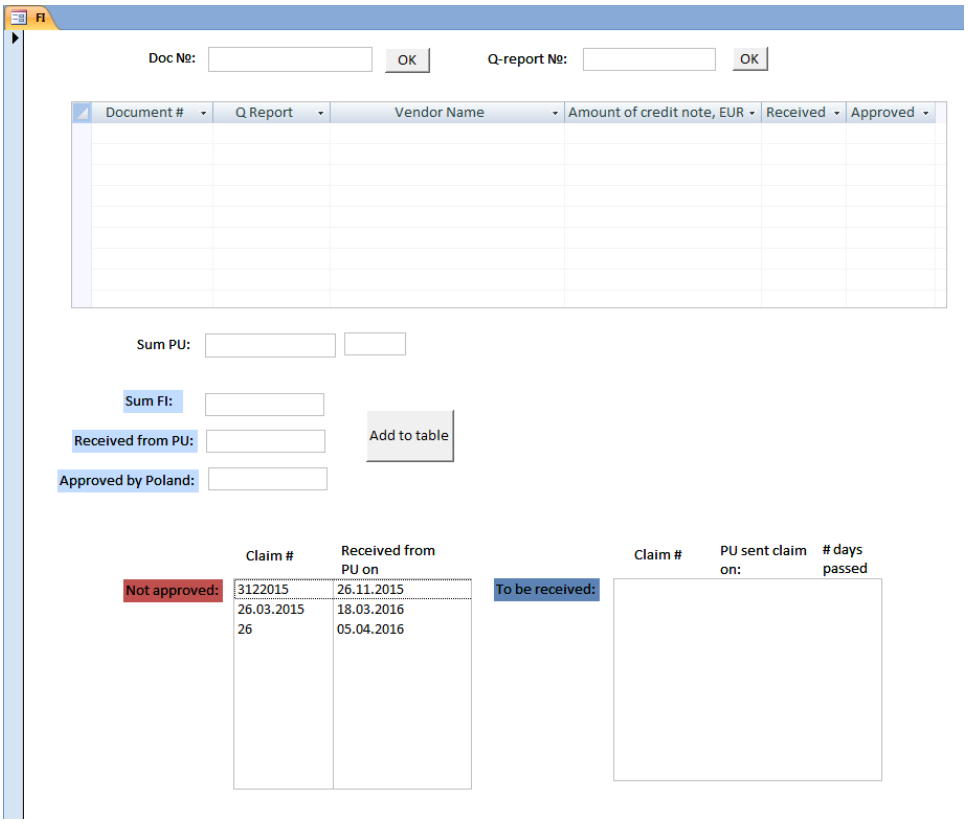


Рисунок 8 – Форма отдела финансов

Для отслеживания процесса управления несоответствиями создан модуль руководителя подразделения отдела качества по работе с

поставщиками [2], включающий формы, запросы и отчеты всех подразделений.

Таким образом, в результате проделанной работы был создан программный продукт, не требующий установки дополнительного программного обеспечения.

Внедрение разработки на предприятии ООО «БСХ Бытовые приборы» обеспечило возможность легко и в доступном виде получать статистику по всем дефектам, материалам, поставщикам в виде сводных диаграмм и таблиц, ускорило и упростило процессы работы с рекламациями и учета затрат. В результате создания многопользовательского приложения появилась возможность отслеживать задержки на каждой стадии процесса с помощью форм - “to-do” листов.

При незначительной доработке программный продукт может быть внедрен на любом предприятии, работающем с поставщиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16317-87 . «Приборы холодильные электрические бытовые. Общие технические условия»
2. ГОСТ ИСО 9001-2011. «Системы менеджмента качества».
3. Документированная процедура концерна «BSH Hausgerate Bosch» «QMS-07-11: Handling of non-conformities»
4. Документированная процедура концерна «BSH Hausgerate Bosch» «QMS-07-15: Q-report process».
5. Басаков, Михаил Иванович. Документы и документооборот коммерческой организации : практическое пособие / М.И. Басаков .— Ростов-на-Дону : Феникс, 2009 .— 415 с.: ил., табл. ; 21 см .— (Закон и общество) .— Библиогр.: с. 409-410. — ISBN 9785222146408.
6. Андреева, В. И. Делопроизводство: требования к документообороту фирмы (на основе ГОСТов РФ) : настольная книга для: секретарей, бухгалтеров, юристов, руководителей / В. И. Андреева.— Изд. 3-е, перераб. и доп. — Москва : [Бизнес-школа : Интел-Синтез], 1996 .— 222 с. ; 20 см .— (Библиотека журнала "Управление персоналом") .— Библиогр.: с. 219-222.
7. Microsoft Access 2007: разработка приложений на реальном примере/ Г.А.Гурвиц. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007
8. А.А. Дрожанова, М.И. Седлер. Повышение качества процесса работы с рекламациями на машиностроительном предприятии. Неделя науки СПбГПУ: научного форума с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Часть 1.-СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015.-с. 43-46.
9. А.Ю. Смук, М.И. Седлер. Повышение качества процесса управления претензиями на машиностроительном предприятии. Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть2.-Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та,2015.-с. 353-357.

10. П.А. Черных, М.И. Седлер. Решение проблемы учета рекламаций и оптимизации процесса управления рекламациями путем создания автоматизированного приложения. Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Часть 1.-СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014.-с. 297-299.
11. М.И.Седлер, Е.И. Поплевина.Улучшение процесса управления внешней нормативной документацией корпорации «Тира». Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции./ под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – с.1003-1011.

A.E.Altapova, M.I.Sedler

AUTOMATION OF THE PROCESS OFTHE QUALITY IMPROVEMENT OF NON-CONFORMENCE MANAGEMENT AND COMMUNATION WITH SUPPLIERS

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to quality management of deliveries to “BSH Bytowie pribory”. Having analyzed the current system of handling non-conformities, author created the database for registration and analysis of claims, automation of processes of handling non-conformities and communication with suppliers. Suggested changes will increase operating speed and effectiveness of the process.

Key words: factory, non-conformance management, communication with suppliers.

REFERENCES

[1] GOST 16317-87 . Pribory holodil'nye jelektricheskie bytovye. Obshhie tehnicheskie uslovija (.rus)
[2] GOST ISO 9001-2011. Sistemy menedzhmenta kachestva (.rus)
[3] Dokumentirovannaja procedura Concern «BSH Hausgerate Bosch» «QMS-07-11: Handling of non-conformities» (.rus)
[4] Dokumentirovannaja procedura Concern «BSH Hausgerate Bosch» «QMS-07-15: Q-report process» (.rus)
[5] Basakov, Mikhail Ivanovich. Documents and document the commercial organization: a practical guide/ MI Basakov .- Rostov-on-Don: Phoenix, 2009 .- 415 p .: silt Table.. ; 21 cm .- (Law and Society) .- Bibliogr .: p. 409-410. - ISBN 9785222146408. (.rus)

[6] Andreeva, V.I. Clerical work: requirements for the company's document management (based on the Russian GOST standards): a reference book for: secretaries, accountants, lawyers, managers' / VI Andreev .- Ed. 3rd, Revised. and ext. - Moscow: [Business School: Intel-Synthesis], 1996 .- 222 with. ; 20 cm .- (Library Journal "Personnel Management") .- Bibliogr .: p. 219-222. (.rus)
[7] Microsoft Access 2007: The development of applications on a real example / G.A.Gurvits. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. (.rus)
[8] A.A. Drozhanova, M.I. Sedler. Improving the quality of the process with reclamations on the manufacture of machinery. Science Week STU: scientific forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. Part 1 SPb .: Publishing house of the Polytechnic. Univ 2015.-s. 43-46. (.rus)
[9] A.Y. Cmyk, M.I. Sedler. Improving the quality of claims management process at an engineering company. Science Week STU: materials of scientific-practical conference. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. Chast2.-SPb .: Publishing house of the Polytechnic. University, 2015, p. 353-357. (.rus)
[10] P.A. Chernyh, M.I. Sedler. «Solving the problem of accounting complaints and optimization reclamations management process by creating automated application». Science Week STU: materials of scientific-practical conference with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. Part 1 SPb .: Publishing house of the Polytechnic. Univ 2014.-s. 297-299. (.rus)
[11] M.I. Sedler, E.I. Poplevina. Uluchshenie processa upravlenija vneshnej normativnoj dokumentacii korporacii «Tira». Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 4-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii./ pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. Un-ta, 2014. – 1003-1011 s. (.rus)

УДК 629.039.58; DOI 10.1872/MMF-2016-122

А. Ю. Артёмова

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ ДОНБАССА

Анастасия Юрьевна Артёмова, к.э.н.
Институт гражданской защиты Донбасса
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: bgdicz_artyomova@mail.ru

Аннотация

В статье оценено состояние одной из ведущих отраслей промышленности Донбасса – машиностроения – на современном этапе. Обозначены основные факторы обеспечения безопасности промышленного комплекса. На основе проведенного анализа проблем безопасности современного машиностроения Донбасса сформулированы основные задачи по обеспечению безопасности и разработаны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: уровень безопасности, проблемы безопасности, чрезвычайные ситуации, машиностроение, способы защиты, защита населения и территорий.

Уровень безопасности техносферы зависит от целого комплекса факторов – состояния экономики, финансовых средств, выделяемых на ее обеспечение, научных исследований в области безопасности, наличия соответствующей законодательной и нормативно-правовой базы, уровня контроля и надзора за ее соблюдением, внимания общества к вопросам безопасности, кадрового обеспечения и др. Последние десятилетия развития человеческой цивилизации характеризуется стремительным подъемом в области науки и техники и одновременно – усилением техногенного воздействия на все компоненты окружающей среды, в том числе на само человеческое сообщество. Кроме того, не следует игнорировать факторы наличия реальной опасности возникновения чрезвычайных ситуаций социально-политического и военного характера, а также их возможные последствия. Основную роль в предупреждении возникновения чрезвычайных ситуаций, защиты жизни людей, материальных ресурсов играет система гражданской защиты любого государства, которая обладает более чем 70-ти летним опытом действий в условиях мирного и военного времени.

Целью данной статьи является раскрытие проблем обеспечения безопасности машиностроения конкретного региона через осмысление объединения как собственно нормативно-теоретических понятий безопасности и машиностроения, так и применения в реальной экономико-территориальной плоскости. Машиностроение занимает одно из ведущих мест в системе экономики Донбасса, немногим уступая угольной и горнодобывающей промышленности. Естественно, что обеспечение безопасности именно машиностроения всегда будет являться одной из основных тем научно-практических разработок данного региона.

Практически во всех странах, начиная с XVII-XVIII вв. утверждается точка зрения о том, что государство имеет своей главной целью обеспечение общего благосостояния и безопасности.[8] В современных толковых словарях безопасность трактуется как отсутствие опасности, точнее «состояние, при котором не угрожает опасность кому-либо или чему-либо». Поскольку полное отсутствие угроз невозможно, целесообразно обозначить безопасность как такой уровень опасности, который общество признает приемлемым в данный период своего научного и социально-экономического развития. Такое определение подчеркивает приемлемость (и неизбежность) опасностей и угроз определенного уровня, при этом как бы сама собой подразумевается необходимость защиты объектов, однако в условиях приемлемости уже исходных опасностей защита может и не потребоваться. Поэтому наиболее адекватной выглядит следующая формулировка: безопасность – это состояние отсутствия различного рода опасностей и угроз, способных нанести неприемлемый вред (ущерб) жизненно важным интересам человека, общества, государства. Жизненно важными интересами называют совокупность потребностей, удовлетворение которых надежно обеспечивает существование и возможности прогрессивного развития человека, общества и государства. В таблице (см. ниже) представлены определения термина «безопасность» в различных словарях, а также текстах действующих Законов и государственных стандартов РФ.

Анализ различных определений термина «безопасность» позволяет выделить несколько элементов данного понятия. Во-первых, безопасность как состояние потенциальной жертвы, объекта опасности. Причем не любое состояние, а состояние защищенности от опасностей и угроз. Во-вторых, безопасность как способность объекта (человека, общества) сохранить свою сущность и основные характеристики в условиях целенаправленного, разрушающего воздействия извне или возникающих в самом объекте. В-третьих, это свойство системы, построенной на принципах устойчивости, саморегуляции, целостности. Безопасность призвана защитить каждое из этих свойств системы, так как разрушительное воздействие на любое из этих свойств приведет к гибели системы в целом.

Таблица

Понятие «безопасность» в словарях и текстах законов РФ [8]

Источник информации	Определение понятия «безопасность»
Даль В.И. Толковый словарь живого великорусского языка	БЕЗОПАСНОСТЬ – отсутствие опасности, сохранность, надежность. Безопасный – неопасный, не угрожающий, не могущий причинить зла или вреда; безвредный, сохранный, верный, надежный
Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка	БЕЗОПАСНОСТЬ – состояние, при котором не угрожает опасность, есть защита от опасности
Ефремова Т. Ф. Новый словарь русского языка	БЕЗОПАСНЫЙ. 1. Не грозящий опасностью, не причиняющий вреда; безвредный. 2. Находящийся вне опасности, не подвергающийся ей
ФЗ РФ «О безопасности» (1992)	БЕЗОПАСНОСТЬ – состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз
ФЗ РФ «О пожарной безопасности» (1994)	ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ – состояние защищенности личности, имущества, общества и государства от пожаров
ФЗ РФ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (1997)	ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ опасных производственных объектов – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и их последствий
ФЗ РФ «О безопасности гидротехнических сооружений» (1997)	БЕЗОПАСНОСТЬ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИИ – свойство гидротехнических сооружений, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и законных

Источник информации	Определение понятия «безопасность»
	интересов людей, окружающей среды и хозяйственных объектов
ФЗ РФ «Об охране окружающей среды» (2002)	ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий
ФЗ РФ «О техническом регулировании» (2002 г.)	БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОДУКЦИИ (процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации) – состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений
ГОСТ Р 22.0.02-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий	БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ – состояние защищенности населения, производственного персонала, объектов народного хозяйства и окружающей природной среды от опасностей в чрезвычайных ситуациях
ГОСТ Р 22.0.05-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения	ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙ-НЫХ СИТУАЦИЯХ – состояние защищенности населения, производственного персонала, объектов народного хозяйства и окружающей природной среды от

Источник информации	Определение понятия «безопасность»
	опасностей, возникающих при промышленных авариях и катастрофах в зонах чрезвычайной ситуации
ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля	БЕЗОПАСНОСТЬ – состояние защищенности прав граждан, природных объектов, окружающей среды и материальных ценностей от последствий несчастных случаев, аварий и катастроф на промышленных объектах

В соответствии с обозначенными в приведенной выше таблице элементами понятия «безопасность» можно выделить два типа безопасности:

1) гипотетическое отсутствие опасности, самой возможности каких-либо потрясений и катаклизмов;

2) реальная защищенность системы от опасностей, способность надежно противостоять им.

В свою очередь термин «машиностроение» имеет следующее значение [10]: Машиностроение – важнейшая комплексная отрасль обрабатывающей промышленности, включающая:

- станкостроение, приборостроение, энергетическое, металлургическое, химическое, сельскохозяйственное машиностроение (включая тракторостроение);
- транспортное машиностроение всех видов;
- электротехническую промышленность;
- радиоэлектронику и вычислительную технику.

В развитых странах удельный вес машиностроения – 30-40 %.

Таким образом, фундаментальные понятия безопасности и машиностроения совместно дают мощный понятийно-категориальный аппарат, который нуждается в постоянном осмыслении и реализации. Сложность современной ситуации определяется переплетением внешних и внутренних факторов развития отрасли, и, к сожалению, такой форс-мажорный фактор, как возникновение чрезвычайных ситуаций, для Донбасса является сейчас определяющим в любой отрасли промышленности

Следует отметить, что помимо рабочих мест машиностроение дает мощный толчок развитию новых технологий и обеспечивает практическое применение фундаментальным наукам. На долю предприятий данной отрасли еще в 2012 г. приходилось около 1/5 объемов производства всей

машиностроительной отрасли Украины. Днепропетровская, Луганская и Херсонская области в сумме производили объемы только одной Донецкой. Такой масштаб обеспечивали чуть менее 150 предприятий с общей численностью сотрудников в 70 тыс. человек. Около половины продукции машиностроения поставлялось на экспорт более чем в 100 стран мира. Основным покупателем машиностроительной продукции Донбасса являлась Российская Федерация, что составляло более 60 % всего экспорта. К сожалению, современные реалии внесли свои коррективы. На сегодня большая часть машиностроительных гигантов разделены так называемой «линией соприкосновения».

Еще одна существенная проблема машиностроения на Донбассе – это негативное воздействие предприятий на экологию. Дело в том, что плотность объектов машиностроения в регионе очень велика, в каждом городе находится по несколько крупных предприятий машиностроения, что способствует ухудшению экологической обстановки. Последствия таких негативных воздействий активно сказываются на населении региона: количество инфарктов, сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхательных путей, детской смертности, а также общее сокращение средней продолжительности жизни, угрожающе растет. Ситуацию усугубляют последствия Чернобыльской катастрофы. К тому же все больше и больше площадей сельскохозяйственных угодий становятся непригодными для посевов. Сельское хозяйство занимает ничтожно малую часть системы народного хозяйства Донбасса, тем не менее с годами ситуация только ухудшается. Остановить этот процесс в силах только государственная программа, которая не только официально, на бумаге, но и реально, на практике, внедряла бы системы защиты населения от отходов машиностроения. Пока что таковые программы находятся в стадии разработки, а предприятия продолжают производить и поставлять оборудование для шахт и металлургических заводов. По данным экспертов в 2015 году машиностроительные предприятия работали не более чем на 20-25 % от своей производственной мощности.

По состоянию на февраль 2016 года на Донбассе было частично повреждено или полностью разрушено более 10288 объектов инфраструктуры, в частности в Донецке разрушено более 6328 объектов, в том числе 56 объектов промышленного производства.

По опубликованным статистическим данным [4] объем промышленной продукции за 2015 год по сравнению с предыдущим уменьшился на 34,7 %. А за два последних года, по сравнению с 2013 годом объем промышленной продукции региона уменьшился в 2,2 раза, а в машиностроении на 33,8 %.

Спад в промышленности Донбасса, вызванный разрушениями производственной, транспортной и энергетической инфраструктуры вследствие вооруженного конфликта, сопровождался ухудшением

отраслевой структуры производства и экспорта за счет снижения абсолютных объемов и удельного веса машиностроения, от которого зависят технический прогресс и модернизация других отраслей.

Не лишним будет напомнить, что машиностроение – одна из самых сложных и многогранных отраслей промышленности. Она включает в себя более 100 различных направлений. Номенклатура производимой машиностроительными заводами продукции очень разнообразна: металлургическое, кузнечно-прессовое, горношахтное и горнорудное, коксохимическое и газонефтеперерабатывающее, подъемно-траспортное оборудование и грузовые вагоны; машины для строительства, ремонта и диагностики железнодорожного пути, автозаправщики; тяжелые металлообрабатывающие станки, машины для сельского хозяйства; специальные изделия и бытовая техника. На ведущих предприятиях отрасли, таких как Горловский машиностроительный завод, Донецкгормаш, Ясиноватский машиностроительный завод, «Норд», «Топаз», Снежнянский машиностроительный завод, Зуевский энергомеханический, Донецкий завод горноспасательной аппаратуры и др., изготавливалось около 70 % всей машиностроительной продукции Донбасса, которая экспортировалась в большинство стран мира.

Машиностроение одновременно относится к числу отраслей, производство которых связано с достаточно большими рисками возникновения техногенных аварий. При этом в современной ситуации, связанной с ведением боевых действий, возрастанием числа природных катастроф и увеличением техногенного влияния, возникновение в отрасли чрезвычайных ситуаций, приводящих к значительным экономическим потерям, становится достаточно вероятным.

Руководители любого ранга должны постоянно решать вопросы защиты персонала в условиях чрезвычайных ситуаций.

В настоящее время основными способами защиты рабочих и служащих являются:

- укрытие в защитных сооружениях;
- проведение эвакуационных мероприятий;
- использование средств индивидуальной защиты.

Учитывая, что в условиях возникновения и развития чрезвычайных ситуаций сроки проведения защитных мероприятий могут оказаться крайне ограниченными, во времена СССР средства защиты готовились заранее, а способы их применения отрабатывались постоянно. После развала СССР вопросам защиты производственного персонала в чрезвычайных ситуациях в Украине стало уделяться значительно меньше внимания. Приватизированные предприятия и государство в целом экономили средства на совершенствование гражданской обороны, защиты рабочих и служащих объектов народного хозяйства.

При строительстве промышленных объектов в обязательном порядке подготавливались защитные сооружения. Только на одном заводе «Точмаш» было построено 7 убежищ для защиты производственного персонала от возможных ядерных ударов.

Все машиностроительные предприятия имели возможность укрыть рабочих и служащих от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, сейчас же большинство убежищ подтоплены грунтовыми водами, находятся в аварийном состоянии. Непригодными стали системы электро- и водоснабжения, канализации. Системы вентиляции убежищ пришли в негодность или отсутствуют (таких убежищ 80 %), поэтому укрываться в них не всегда целесообразно и даже опасно. Возможности сил МЧС по ликвидации последствий обстрелов крайне низки, в их структуре не предусмотрено развертывание необходимого количества сил и средств, предназначенных для этих целей.

Реалии таковы, что в результате сложившихся обстоятельств флагманы машиностроения Донбасса понесли серьезные потери. По разным оценкам, на сегодняшний день сохранено около 80 % отраслевых предприятий и около 60 % готовы к работе. [4]

За 2015 год возобновлена жизнедеятельность более 300 крупных предприятий тяжелого машиностроения, химической, коксохимической, металлургической промышленности – и это с учетом того, что деятельность практически всех промышленных предприятий была приостановлена с начала проведения Украиной антитеррористической операции. В числе 300 возобновивших – 30 предприятий крупного машиностроения, четыре крупных металлургических и пять крупных коксохимических – отмечают в управлении стратегией развития промышленности.

По статистической прогнозной оценке при условии разрешения конфликта на Донбассе мирным путем восстановление отрасли ожидается к лету 2016 года. По некоторым оценкам прогнозируется увеличение объемов производства до 40 млрд. рублей в год. Такие показатели, безусловно, благоприятно отразятся на социально-экономической ситуации в регионе.

В учебно-методической и соответствующей нормативной литературе указывается, что безопасность будет обеспечиваться тогда, когда будут учтены следующие факторы:

- человеческий – любому человеку свойственно ограничения возможностей или ошибки. Этот фактор часто становится объяснением тех или иных причин чрезвычайных ситуаций, и как следствие – аварий и катастроф. Человеческая личность – это загадочное и многогранное явление, поэтому предсказывать поведение и реакции человека в той или иной ситуации со стопроцентной уверенностью практически невозможно;

- технический – зависящий от состояния технических средств. Этот фактор по своему содержанию включает конструкционные, производственно-технологические и эксплуатационные аспекты. Техника и технологии непрерывно прогрессируют и принимают новые формы. К сожалению, что бы ни изобрел человеческий гений и с какой благородной целью изначально, прежде всего, большинство изобретений находит применение в военном деле и с целью уничтожения людей;
- природный – фактор микро- и макросреды человека, прямо или косвенно влияющий на жизнь и здоровье людей.

Одна из особенностей менталитета большинства людей в том, что осознавая перечисленные факторы как причины аварий и катастроф, мы уверены в том, что нет их принципиального и стопроцентного устранения.

Сегодня как никогда ранее можно констатировать все более нарастающий процесс обострения проблем обеспечения безопасности, как отдельной личности, так и всего человечества в целом.

Актуальность проблем защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также от опасностей, возникающих при ведении боевых действий или вследствие этих действий, не снижается.

Анализ ситуации показывает, что для снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в машиностроении и снижения масштабов ущербов при возникновении таких ситуаций необходимо использование специфического экономического механизма управления предприятиями отрасли в чрезвычайных ситуациях.

Одно можно сказать однозначно: машиностроительная отрасль требует сегодня к себе повышенного внимания. Она больше других пострадала от конфликта на Донбассе. Блокада транспортных путей также стала причиной затруднения ввоза сырья и вывоза готовой продукции.

В ближайшей перспективе на предприятиях горно-шахтного машиностроения запланировано перепрофилирование для обеспечения их новыми заказами. Перепрофилирование будет происходить на базе старых предприятий, в ассортимент производимой ими продукции будут постепенно включаться товары народного потребления и сельскохозяйственная техника. Применение на производстве современных технологий поможет сэкономить время, а также сократить ряд затрат.

В результате вышеприведенного анализа проблем безопасности современного машиностроения Донбасса можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- участившиеся за последние годы случаи техногенных аварий в сочетании с ведением боевых действий при современном состоянии основных фондов машиностроительного комплекса, характеризующимся высокой степенью износа оборудования, резко повышают возможность чрезвычайных ситуаций на машиностроительных предприятиях,

последствия которых могут оказаться весьма деструктивными не только для самого предприятия, но и для региона его размещения, а также для технологически взаимосвязанными с ним предприятиями других отраслей;

- для репрезентативной оценки последствий чрезвычайных ситуаций, особенно на стадии предупреждения их возникновения, важную роль играет правильный учет факторов неопределенности, связанных с возможностью возникновения чрезвычайных ситуаций. Использование методов экономико-математического моделирования позволяет обеспечить достаточно эффективный учет такого рода факторов;
- существующие специфические особенности управления предприятиями машиностроения в экстремальных условиях, возникающих как последствия чрезвычайных ситуаций, в ряде случаев позволяет совмещать мероприятия по ликвидации последствий этих ситуаций с решением задач развития предприятия;
- для оценки экономических последствий чрезвычайных ситуаций и правильного определения источников финансирования мероприятий по ликвидации важную роль играют методы, применяемые при определении ущерба от аварий.

Анализ условий и причин возникновения чрезвычайных ситуаций на предприятиях машиностроения, а также реальной практики ликвидации их последствий позволяет типизировать эти ситуации и построить их классификацию. Так, например, тушение пожаров в зданиях цехов машиностроительной промышленности имеет свои особенности, которые обуславливаются характером технологического производства, конструктивными особенностями зданий, свойствами пожарной нагрузки и другими факторами. Отсюда же вытекают и следующие задачи по обеспечению безопасности:

- исключение гибели и других несчастных случаев с людьми;
- предупреждение аварий с выводом из строя технологического оборудования и другим материальным ущербом;
- недопущение аварий с выбросом вредных веществ;
- заблаговременное принятие мер по подготовке к ведению возможных аварийно-спасательных работ;
- эффективное использование сил и средств, выделенных для снижения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Решать эти задачи во многом помогут знания в области безопасности и поведения в чрезвычайных ситуациях. В комплексе они должны повысить подготовку всего населения Донбасса; обеспечить учет всех видов чрезвычайных ситуаций и их последствий; дать полное представление о способах защиты от опасностей; обеспечить режимы личной и коллективной безопасности в обычных условиях и условиях чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность жизнедеятельности в машиностроении : учеб. пособие / В.Г. Еремин, В.В. Сафронов, А.Г. Схиртладзе, Г.А. Харламов; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. Шк., 2002. – 310 с.
2. Безопасность жизнедеятельности: Учебник / Под ред. проф. Э.А. Арустамова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2006. – 476 с.
3. Безпека життєдіяльності (забезпечення соціальної, техногенної та природної безпеки: навч. посібник / В.В. Бєгун, І.М. Науменко. – К., 2004. – 328 с.
4. Восстановление Донбасса: форум [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://restoring-donbass.com/novosti/32351-obem-promyishlennoy-produktsii-donetskoy-oblasti-za-2015-god-umenshilsya-na-34-7/ (дата обращения: 01.04.16).
5. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А.И. Губинский. – М.: Наука, 1982. – 269 с.
6. Козлов А.В. Функция Российского государства по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Вести Волгоград. гос. ун-та, серия 5, юриспруд. / А.В. Козлов. – 2011. – № 1(14). – С. 239–243.
7. Кочеткова К.Е. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие / К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревский, А.В. Забечаева. – М; АСВ, 2007. – 210 с.
8. Охрана труда: информационный ресурс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_05.html (дата обращения: 01.04.16).
9. Прохоров С.А. Методы и средства проектирования профилей интегрированных систем обеспечения комплексной безопасности предприятий наукоемкого машиностроения / С.А. Прохоров, А.А. Федосеев, В.Ф. Денисов, А.В. Иващенко. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2009. – 199 с.
10. Свободный словарь терминов, определений и понятий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://termin.bposd.ru/publ/14-1-0-10272 (дата обращения: 01.04.16).

A.Yu. Artyomova

SOME PROBLEMS OF ACCIDENT PREVENTION OF DONBASS MODERN MECHANICAL ENGINEERING

Donetsk National Technical University

Abstract

In the given article the state of one of the leading branches of industry in Donbass mechanical engineering is appraised. The basic factors of accident

prevention in industrial complex are marked. As a result of the analysis of safety problems of Donbass modern mechanical engineering the basic tasks of accident prevention are formulated, the proper recommendations are developed.

Keywords: safety level, safety problems, cases of emergency, mechanical engineering, protection methods, population and territory defence.

REFERENCES

[1] Safety in mechanical engineering : tutorial / V.G. Eremin, V.V. Safronov, A.G. Shirtladze, G.A. Harlamov; edited Yu.M. Solomentseva. – M.: Higher school, 2002. – 310 p. (rus)
[2] Life safety: a Textbook / edited prof. E.A. Arustamova. – issue 10 – M.: publishing and trading Corporation «Dashkov i K°», 2006. – 476 p. (rus)
[3] Life safety (the social, natural and technological security: tutorial / V.V. BEgun, I.M. Naumenko. – K., 2004. – 328 p. (ukr)
[4] The restoration of the Donbass: the forum [Electronic resource]. – Access mode:http://restoring-donbass.com/novosti/32351-obem-promyishlennoy-produktsii-donetskoy-oblasti-za-2015-god-umenshilsya-na-34-7/ (date of access: 01.04.16). (rus)
[5] Gubinskiy A.I. The reliability and quality of functioning of ergatic systems / A.I. Gubinskiy. – M.: Science, 1982. – 269 p. (rus)
[6] Kozlov A.V. The function of the Russian state on the prevention and liquidation of emergency situations // News of Volgograd state University, series 5, law / A.V. Kozlov. – 2011. – # 1(14). – P. 239–243. (rus)
[7] Kochetkova K.E. Accidents and disasters. Prevention and liquidation of consequences: a tutorial / K.E. Kochetkova, V.A. Kotlyarevskiy, A.V. Zabechaeva. – M; ASV, 2007. – 210 p. (rus)
[8] Labour protection: an information resource [Electronic resource]. – Access mode:: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_05.html (date of access: 01.04.16). (rus)
[9] Prohorov S.A. Methods and tools for designing profiles of integrated systems of complex safety of the enterprises of high-tech engineering / S.A. Prohorov, A.A. Fedoseev, V.F. Denisov, A.V. Ivaschenko. – Samara: Samarskiy nauchnyiy tsentr RAN, 2009. – 199 p. (rus)
[10] Free dictionary terms, definitions and concepts [Electronic resource]. – Access mode: http://termin.bposd.ru/publ/14-1-0-10272 (date of access: 01.04.16). (rus)

УДК 628.16; DOI 10.1872/MMF-2016-123

Брунман М. В., Брюс Ф. О., Дьяченко В. А.

МОБИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНАЯ УСТАНОВКА ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ И СТОКОВ

Брунман Михаил Владимирович, аспирант, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Мехатроника», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
E-mail: brunman-m@mail.ru

Брюс Федор Олегович, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: 2145545@gmail.com

Дьяченко Владимир Алексеевич, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-85-30, E-mail: dva40@inbox.ru

Аннотация

Предложена мобильная элеткролизная установка для оперативного обеспечения питьевой водой небольших населенных пунктов, пострадавших от чрезвычайных происшествий (наводнений, землетрясений и др.), а также для использования в местах армейских учений или вооруженных конфликтов.

Изложены принципы построения и функционирования установки, приведены ее технологическая схема, компоновка, основные конструктивные и технологические параметры.

Ключевые слова: обеззараживание воды, анолит, феррат, мембранный электролиз, мобильная установка, технологическая схема, основные параметры.

Труднодоступность некоторых населенных пунктов существенно осложняет задачу устранения последствий чрезвычайных ситуаций, поставки питьевой и технической воды в зону бедствия. Эта задача может быть решена путем разворачивания полевого госпиталя и кухни, а также установки для очистки и обеззараживания воды непосредственно на месте потребления.

Для решения задачи очистки и дезинфекции воды на месте существуют мобильные установки, применяющие хлор и выполненные на базе автоприцепа. Однако данные установки имеют ряд существенных ограничений по их применению. Так, например, при наводнении или сходе селей, доставка автоприцепа может быть существенно затруднена, так как подобные препятствия способен преодолеть только специальный транспорт. Более того, применение хлора в чистом виде или в виде диоксида хлора накладывает строжайшие требования к его транспортировке и хранению ввиду сильной токсичности. Выполнение этих требований может быть осложнено в зоне ЧС. А применение хлора в виде гипохлорита требует постоянного снабжения исходным сырьем, что также не всегда возможно или затруднительно.

Ввиду указанных недостатков авторы предлагают использовать хлор в составе анолита для обеззараживания воды в зоне бедствия. Анолит, содержащий газообразный хлор и другие хлорсодержащие соединения, предлагается производить на месте потребления с помощью мембранного электролиза, что обеспечит высокую эффективность по затрачиваемым ресурсам и электроэнергии, а также безопасность работы всей установки. Сырьем для такого производства является вода и поваренная соль.

Другим преимуществом применения анолита и мембранного электролиза для его получения является побочный продукт этого процесса, раствор щелочи NaOH. Вместо утилизации данный раствор щелочи может выступать в качестве сырья для мембранного производства феррата натрия (Na_2FeO_4). Этот реагент является наиболее сильным из известных окислителей и может эффективно удалять широкий спектр загрязнителей как неорганического, так и органического происхождения. При этом феррат не образует опасных побочных продуктов и быстро разлагается в очищаемой воде. Он также осуществляет коагулирующий эффект, способствующий лучшей водоподготовке [1]. Совместное применение двух реагентов для водоподготовки существенно улучшает качество воды на выходе установки.

Ввиду возможности одновременного производства сразу двух реагентов для водоподготовки на месте потребления предлагаемая установка является мобильным комплексным электролизным агрегатом (МКЭА).

Таким образом, для очистки и обеззараживания воды в населенных пунктах, попавших в зону ЧС, предлагается мобильная установка, производящая с помощью мембранного электролиза хлорсодержащий анолит и феррат натрия. Для такой установки сформулированы количественные требования по объемам обрабатываемой воды в сутки, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные требования к МКЭА по объему водоподготовки в сутки.

Для обеспечения полевого госпиталя (на 100 человек)	до 4,0 т воды (анолит + феррат)
Для обеспечения полевой кухни (на 150 человек)	до 0,15 т воды (анолит + феррат)
Для потребностей в питьевой воде	0,4-0,5 т воды (анолит + феррат)
Для обеззараживания колодцев или сточных вод	10-20 т воды (феррат)

При иной структуре водопотребления важен суммарный потециал установки по водоподготовке.

Ниже приведены основные функциональные и конструктивные требования к МКЭА:

- Производительность (в час)
  по аналиту (Cl_2) – не менее 6 г/час
  по феррату (Na_2FeO_4) – не менее 5 г/час
- Общая масса не должна превышать 300кг
- Установка должна иметь модульное построение (для удобства транспортировки, монтажа, обслуживания и оперативного ремонта).
- Возможность автономной работы, без подключения к электрической сети. Продолжительность непрерывной работы – 48 часов без перезарядки АКБ.
- Время подготовки к пуску – не более 60 минут.
- Время пуска – не более 60 минут от включения до получения обеззараживающих веществ.
- Конструкция установки должна позволять ее транспортировку различными видами транспорта: наземным (прицеп, кузов), воздушным (самолет, вертолёт), надводным (лодка, катер на воздушной подушке).

Отечественных и зарубежных аналогов предлагаемой установки не обнаружено. Известны установки для отдельного мембранного производства анолита [2] или феррата натрия [3], мобильные установки для производства феррата химическим способом [4] и установки для их одновременного безмембранного производства [5]. Однако предлагаемое решение мобильной установки для мембранного производства анолита и феррата натрия для обеззараживания вод сочетает в себе все приведенные выше преимущества и лишено многих недостатков упомянутых аналогов.

С помощью него анолит и феррат используются непосредственно на месте их синтеза: анолит - для обеззараживания питьевой воды, а ферраты направляются в водоемы, пострадавшие от загрязнения в результате ЧС, колодцы, либо могут также использоваться в системе водоподготовки питьевой воды.

Для большей компактности в МКЭА два электролизных агрегата (для производства анолита и феррата [6, 7], соответственно) объединены в один трехкамерный агрегат.

Для эффективного и безопасного функционирования МКЭА его работой управляет система автоматического управления (САУ). В состав САУ входят датчики (уровня: в баках, сепараторе и камерах электролизера, температуры – в электролизере, давления – в системе отбора анолита) и устройство управления (на база контроллера с монитором и устройствами ввода информации). Также к устройству управления подключаются насосы и источник питания на базе аккумулятора.

Основными управляемыми параметрами процесса получения анолита и феррата выбраны напряжение, сила тока, расход ресурсов, время обработки, энергопотребление, температура.

С учетом компонентов САУ в состав МКЭА входят: электролизный трехкамерный модуль, блок насосов и аккумуляторов, емкость с умягченной водой, емкость с соленой водой, пульт управления, коммуникации, датчики, модуль экспресс-анализа воды.

Вся установка может быть организована, например, на базе автомобиля УАЗ 469 (рисунок 1) или в специальной лодке.

Примерная компоновка МКЭА, собранная на базе автомобиля УАЗ 469, показана на рисунке 1.

Такая мобильная установка может работать непрерывно в течении 48 часов под надзором одного оператора. За двое суток установка может произвести 468 г анолита, которого хватит для обеззараживания 58,5 тонн питьевой воды, а также 960 г феррата для обеззараживания 384 тонн сточного и технического водоснабжения (либо дополнительная очистка питьевой воды в случае повышенной ее загрязненности). В безводных зонах МКЭА может в качестве прицепа привезти 1-2 цистерны с водой, требующей обеззараживания.

Технологическая схема электролизера МКЭА представлена на рисунке 2.

Электролизер для производства хлорсодержащего анолита и феррата натрия состоит из одной катодной камеры, расположенной по середине электролизера, и двух анодных камер, расположенных с двух сторон от катодной камеры напротив друг друга. Камеры разделены между собой катионообменной мембраной.

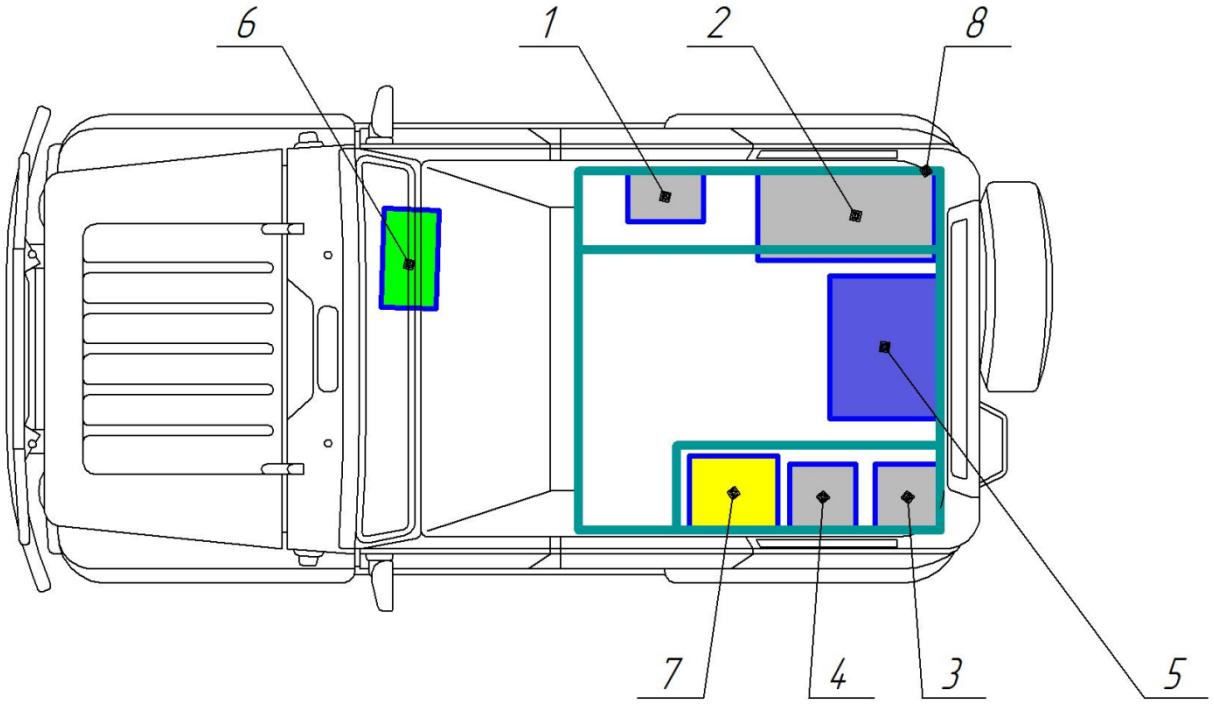


Рис. 1. Мобильная установка по обеззараживанию воды на базе автомобиля УАЗ 469: 1 - модуль электролизный трехкамерный, 2 - блок насосов и аккумуляторов, 3 - емкость (20 л) с умягченной водой, 4 - емкость (20 л) раствор $NaCl+H_2O$, 5 - коммуникации (кабели, трубопроводы, арматура), 6 - пульт управления, 7 – модуль экспресс-анализа воды, 8 – рама.

Первая из анодных камер предназначена для выработки анолита. Внутри камеры возле мембраны без зазора размещается перфорированный титановый анод. В камере происходит диссоциация насыщенного раствора NaCl в воде на ионы Na+ и Cl- , при этом ион Cl- окисляется на аноде и превращается в газообразный хлор (Cl2), а ион Na+ через мембрану попадает в катодную камеру. В камеру насосом-дозатором подается насыщенный раствор NaCl, а вытесненный под давлением анолит поступает в сепаратор, откуда вместе с образующимся газообразным кислородом всасывается в трубопровод с обрабатываемой водой.

Вторая анодная камера предназначена для выработки феррата. Внутри этой камеры размещается наборный расходуемый анод из стальных пластин. Тип стали подобран для их оптимального разложения в ходе выработки феррата. Пластины устанавливаются в специальное устройство для их перемещения внутри камеры, что позволяет изменять эффективную площадь взаимодействия анода с электролитом и управлять производительностью по феррату, не меняя ток через ячейку и не уменьшая производительность по анолиту. В камере под действием тока происходит разложение стального анода с образованием феррата натрия (Na2FeO4) и ионов Na+, переходящих через мембрану в катодную камеру. В камеру насосом-дозатором подается раствор щелочи, взятый из катодной

камеры. В верхней части камеры организован сток для произведенного раствора феррата натрия. В крышке камеры организован отвод для образующегося газообразного кислорода.

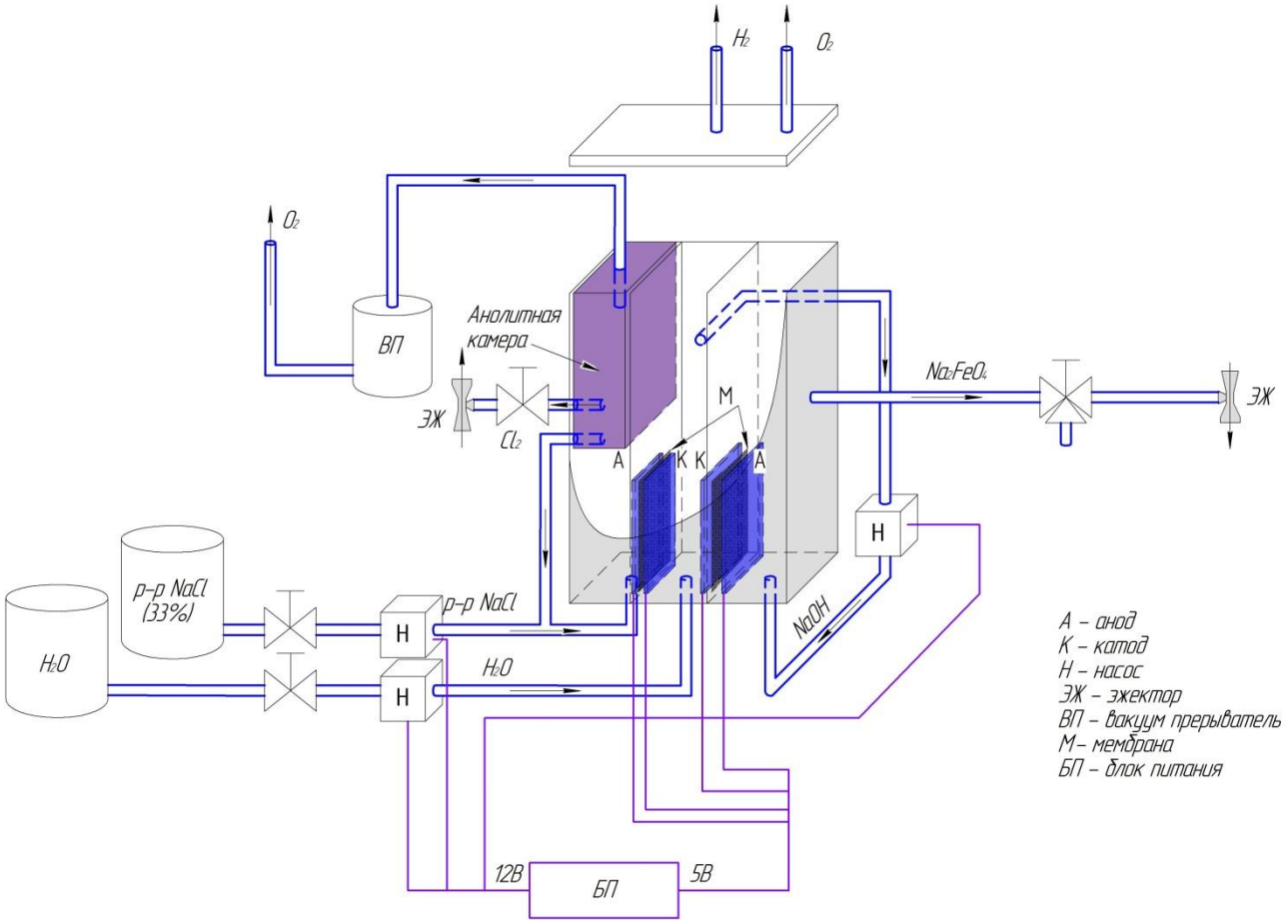


Рис. 2. Технологическая схема рабочей платформы МКЭА.

В катодной камере вдоль мембран с нулевым зазором размещаются два перфорированных электрода из нержавеющей стали. Попадающие в камеру через мембраны ионы Na+ взаимодействуют с анионами OH-, образовавшимися под воздействием электрического тока на молекулы воды. В результате в катодной камере образуется водный раствор щелочи. В камеру насосом-дозатором подается умягченная вода, в верхней части камеры организован отвод щелочи для подачи во вторую анодную камеру. В крышке камеры организован отвод для образующегося газообразного водорода с выводом, разнесенным с выводом кислорода для исключения их перемешивания.

Система автоматического управления (на рисунке 2 не показана) мобильным комплексным электролизным агрегатом обеспечивает в автоматическом режиме его пуск, остановку (в том числе и аварийную), работу с поддержанием выбранных параметров, а также сбор и хранение данных о ходе процесса производства.

Основные технические характеристики электролизера приведены ниже:

1. Тип элетролизера – мембранный биполярный
2. Поверхность электродов рабочая
   в хлораторе $0{,}0076 м^2$
   в ферраторе $0{,}022 м^2$
3. Нагрузка линейная, кА 0,14
4. Плотность тока кА/м.кв 1,6
5. Напряжение, В не более 5
6. Температура в электролизере, ^0C 60
7. Производительность, г/час
   по хлору 9,75
   по феррату 5
8. Масса в рабочем состоянии, кг 38
9. Основной материал: шин – медь М1р ГОСТ495-77, рамок, опор коллекторов – Ст.3 ГОСТ380-2005, трубок – фторопласт – 4 ГОСТ 10007, остальных деталей – титан ВТ1-0 ГОСТ19807-91.
10. Мембрана – катионообменная, типа Nafeon или Flemion

Заключение

Предложенная установка для автономного снабжения труднодоступных населенных пунктов питьевой и технической водой на месте их потребления отвечает принятым требованиям по мобильности и производительности. Малые габариты и вес установки, а также отсутствие токсичных реагентов позволяют осуществить ее транспортировку на место применения любым видом транспорта, как наземного (в багажном отделении или на прицепе), так и воздушного или надводного (на спасательной лодке или судне на воздушной подушке). Производительность установки позволяет обеспечить питьевой водой сразу и полевой госпиталь (на 100 человек), и полевую кухню (на 150 человек), а также дополнительно подготовить до 15 тонн питьевой воды в сутки и обеззаразить до 20 тонн в сутки стоков, колодцев и открытых водоемов. Система автоматического управления установки обеспечивает ее автономную работу и практически не требует обслуживающего персонала.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России, номер проекта RFMEFI57514X0080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракчеев Е. Н., Брунман В. Е., Волков А. Н., Дьяченко В. А., Петкова А. П., Брунман М. В., Коняшин А. В. Обеззараживание и очистка воды с помощью

анолита и феррата натрия и установка для их комплексного производства // Вода и экология, № 1, 2016. С. 26-36.
2. Пат 113735 РФ, МПК C02F. Станция обеззараживания воды / Новичков Е. П., Аракчеев Е. Н., Коняхин О. А., Африн С. А. - 2011.
3. Пат. 102925919 КНР, МПК C25B1/00, C25B15/00, C25B15/04. On-line addition device for three-dimensional electrode electrochemical oxidation ferrate solution / WANG L., MA J., LI X., WANG L., ZHANG H. – 2012.
4. Пат. 2014042101 США, МПК C01G49/00, C02F1/52, C02F1/72. Methods of synthesizing an oxidant and applications thereof / Ciampi L. E., Daly L. J. – 2013.
5. Патент 101202765 Корея, МПК C02F1/461. Ballast water treatment apparatus and method using ferrate - 2012.
6. Аракчеев Е. Н., Брунман В. Е., Волков А. Н., Дьяченко В. А., Петкова А. П., Брунман М. В., Коняшин А. В., Сорокин А. В. Комплексный электролизный агрегат производства анолита и феррата для обработки вод, загрязненных продуктами нефтепераработки и вредными примесями // Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 2, 2016. С. 45-48.
7. Пат. 160773 РФ, МПК C25B, C01D, C01G, C02F. Установка для комплексного получения хлорсодержащих реагентов и феррата натрия / Волков А. Н., Брунман В. Е., Коняшин А. В., Брунман М. В., Петкова А. П., Дьяченко В. А., Аракчеев Е. Н. – 2015.

Brunman M. V., Bruice F. O., Djachenko V. A.

MOBILE ELECTROLYTIC UNIT FOR DRINKING WATER AND WASTEWATER DISINFECTION

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A mobile electrolytic unit for efficient water supplying with drinking water for small settlements, suffered from emergency situation (flood, earthquake etc.) and areas of military field management or conflicts is proposed.

The principles of unit's construction and operation, its process chart, configuration and main characteristics are scoped.

Key words: water disinfection, anolyte, ferrate, membrane electrolysis, mobile unit, process chart, main characteristics.

REFERENCES

[1] Arakcheev E. N., Brunman V. E., Volkov A. N., Djachenko V. A., Petkova A. P., Brunman M. V., Konyashin A. V. Disinfection and water treatment using anode liquor and sodium ferrate and apparatus for their integrated production. Water and ecology. 2016; 1: 26-36.(rus.)

[2] Pat. 113735 RU, IPC C02F. Plant for water disinfection. Novichkov E. P., Arakcheev E. N., Konyakhin O. A., Afrin S. A. - 2011.
[3] Pat. 102925919 CH, IPC C25B1/00, C25B15/00, C25B15/04. On-line addition device for three-dimensional electrode electrochemical oxidation ferrate solution / WANG L., MA J., LI X., WANG L., ZHANG H.; 2012.
[4] Pat. 2014042101 US, IPC C01G49/00, C02F1/52, C02F1/72. Methods of synthesizing an oxidant and applications thereof. Ciampi L. E., Daly L. J.; 2013.
[5] Pat. 101202765 KR, IPC C02F1/461. Ballast water treatment apparatus and method using ferrate; 2012.
[6] Arakcheev E. N., Brunman V. E., Volkov A. N., Djachenko V. A., Petkova A. P., Brunman M. V., Konyashin A. V., Sorokin A. V. Complex electrolytic unit for anode liquor and ferrate production in purpose of treating waters, soiled by oil refining products and harmful admixtures. Chemical and Petroleum Engineering. 2016; 2: 45-48.
[7] Pat. 160773 RU, IPC C25B, C01D, C01G, C02F. Apparatus for complex production of chlorine containing reagents and sodium ferrate. Volkov A. N., Brunman V. E., Konyashin A. V., Brunman M. V., Petkova A. P., Dyachenko V. A., Arakcheev E. N.; 2015.

УДК 577:620.3(07) + 378.147 ; DOI 10.1872/MMF-2016-124

А.Л. Буляница[1], А.А. Евстрапов[2], Я.С. Посмитная[3], К.И. Белоусов[4]

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КУРСА МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДЛЯ МАГИСТРОВ И АСПИРАНТОВ

[1]Буляница Антон Леонидович, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Институт аналитического приборостроения РАН, Россия,
Тел.: (812)552 12-93, E-mail: antbulyan@yandex.ru

[2]Евстрапов Анатолий Александрович, д.т.н, профессор
Институт аналитического приборостроения РАН, Россия,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)363 07-28, E-mail: an_evs@mail.ru

[3]Посмитная Яна Станиславовна, ассистент
Институт аналитического приборостроения РАН, Россия,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 498-10-65, E-mail: posmitnaya@rambler.ru

[4]Белоусов Кирилл Ильич, аспирант
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 741-31-09, E-mail: belousov_k.i@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены принципы формирования и преподавания базового курса «Микро и нанотехнологии для биологических и медицинских исследований», ориентированного на студентов старших курсов, магистров и аспирантов. Курс предназначен для специалистов, занимающихся проектированием и созданием приборов для биологических и медицинских исследований, физическими экспериментами, химическими технологиями и другими смежными специальностями. Выводы основываются на опыте преподавания указанной дисциплины в

Университете ИТМО и Институте аналитического приборостроения Российской академии наук (оба СПб), СПб Национальном исследовательском Академическом университете Российской академии наук (Академический университет) и Сибирском федеральном университете (Красноярск)

Ключевые слова: микро- и нанотехнологии, принципы формирования курса, опыт преподавания, биологические и медицинские исследования, физический эксперимент, микрофлюидика (микрогидродинамика), численное моделирование.

Целью рассматриваемого курса является формирование у студентов представлений о микро- и нанотехнологиях, применяемых, в первую очередь, в биологических и медицинских исследованиях; принципах, методах и технологиях, используемых при разработке современного приборного оснащения для данных исследований. Представленные в базовом учебном пособии [1] материалы способствуют освоению подходов, используемых в современном приборостроении при создании высокопроизводительных систем для анализа биологических проб, изучению функционирования устройств, основанных на наукоемких технологиях и принципах микрофлюидики (микрогидродинамики). Этот курс лекций читался студентам старших курсов Университета ИТМО и Академического университета (Санкт-Петербург), начиная с 2008 года, а также частично - студентам и магистрантам Института фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского Федерального университета (Красноярск). Кроме того, в углубленном (расширенном) объеме он предназначался аспирантам Института аналитического приборостроения РАН, обучающимся по специальности 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики, поскольку решением Ученого Совета института был включен в специальную часть кандидатского экзамена.

Более детальный анализ учебных программ показал следующее. Дисциплины профиля «Микробиология и биотехнология», включенные в учебный план Института фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского Федерального университета такие, как экологическая биотехнология; математическое моделирование биотехнологических процессов; процессы и аппараты биотехнологии; современная аппаратура и методы исследования биологических систем и др. непосредственно связаны с микро- и нанотехнологиями.

Магистерская программа «Нанобиотехнологии» («Физика живых систем») Академического университета включает предмет «Микрофлюидика и нанофлюидика» в 10-м и 11-м семестрах с лекционными и практическими занятиями с формой отчетности в виде и экзамена и зачета.

Специальность 200100 «Приборостроение» с профилем 200100.68.07 «Методы диагностики и анализа в бионанотехнологиях» Университета ИТМО, предполагает изучение различных разделов курса Микро– и нанотехнологии для биологических и медицинских исследований. Например, отдельные разделы курса включены в учебную программу дисциплин «Введение в бионанотехнологии», «Современные методы исследований в биологии и медицине», «Методы и приборы микро- и нанодиагностики в биологических исследованиях», «Микрочиповые платформы для анализа и модификации биологических объектов».

Указанные курсы содержат лекционные и практические занятия, а также рассчитаны на самостоятельную работу студентов. К контрольным мероприятиям первых двух курсов относятся тестирования, проводимые два раза в семестр, и написание реферата. В качестве теста предлагается дать краткий ответ на 4-5 предложенных вопросов, время тестирования составляет 40 минут. Курсы «Методы и приборы нанотехнологий для создания микро- и наноразмерных систем» и «Микрочиповые платформы для анализа и модификации биологических объектов» содержат лабораторные работы, по которым требуется подготовить отчеты. Изучение дисциплин заканчивается сдачей экзамена.

К компетенциям данных курсов относятся: способность к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию; способность действовать в нестандартных ситуациях, нести ответственность за принятые решения; способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы; способность и готовность к выбору оптимального метода и разработке программ экспериментальных исследований, проведению измерений с выбором технических средств и обработкой результатов; способность и готовность к оформлению отчетов, статей, рефератов на базе современных средств редактирования и печати в соответствии с установленными требованиями; способность к разработке планов научно-исследовательских и технологических работ на основе анализа современного состояния приборостроения; готовность к разработке технических заданий, постановке цели и задач проектирования приборов и систем для биологических и медицинских исследований на основе современных технологий.

Курс «Введение в бионанотехнологии» знакомит студентов с основами биохимии, цитологии, молекулярной биологии и генной инженерии, а также современными методами исследований, применяемыми в этих областях.

Дисциплина «Современные методы исследований в биологии и медицине» дает представление о методах исследования в биологии и медицине. Излагаются базовые принципы анализа биологических проб и общие представления о правилах работы с биологической пробой. Целью

является формирование основных знаний о строении и функциях биологических объектов (клетки, бактерии, белков, нуклеиновых кислот и т.д.) и современных методах их исследований, об основных процессах, протекающих в живых микросистемах (клетках), а также способах воздействия на них, методах анализа и диагностики, применяемых в медицине и биологии.

Дисциплина «Методы и приборы нанотехнологий для создания микро- и наноразмерных систем» способствует формированию научной базы для изучения специальных дисциплин, закладывает фундамент последующего обучения в аспирантуре, даёт цельное представление о методах и приборах микро- и нанотехнологий, обеспечивает магистрантов необходимыми знаниями для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах.

Слушатели курса «Микрочиповые платформы для анализа и модификации биологических объектов» получают представление о современных микрочиповых платформах для исследований биологических проб, синтеза веществ, скрининга лекарственных средств. Целью является формирование знаний, умений и навыков в области создания микрочиповых платформ для исследований биологических объектов, представлений о методах исследования биообъектов.

Отметим, что образовательная программа подготовки магистров «Методы диагностики и анализа в бионанотехнологиях» по направлению 12.04.01 «Приборостроение» прошла профессиональную аккредитацию сроком на 5 лет, что подтверждается соответствующим сертификатом.

Содержание основных разделов базового учебного пособия [1] представлено далее.

Введение, включающее а) анализ тенденций развития аналитических приборов и систем для биологических и медицинских исследований; б) микро- и нанотехнологии при получении информации о биологических объектах на качественно новом уровне; в) биологические материалы и биологические пробы; г) особенности изучения биологических объектов [2-4].

Раздел «Основы микро- и нанофлюидики» содержит информацию о гидродинамических и реологических свойствах жидкостей; особенностях описания ньютоновских и неньютоновских жидкостей, а также принципах и подходах к моделированию в микро- и нанофлюидике.

Из раздела «Управление движением и разделение частиц в жидкости. Особенности воздействия внешних полей на биологические частицы (макромолекулы, клетки)» в качестве специального параграфа выделено направление «Электрокинетические процессы в микро- и нанофлюидике», имеющее важное прикладное значение для ряда аналитических и технологических приложений.

Раздел «Анализ биологических проб», по существу, является основным в данном пособии (примерно третья часть от общего объема). Он включает, описание различных типов приборов и устройств, принципов их функционирования, а также методов исследования биологических объектов [5].

Заключительный раздел посвящен применению нанообъектов и наноструктур: квантовых точек, нанороботов и био-нанороботов, молекулярных машин, наноразмерных исполнительных механизмов и устройств адресной доставки лекарств.

Отметим, что сравнительно недавно большим коллективом авторов, в том числе, и авторов настоящего доклада, выпущена монография на русском языке, содержащая статьи, относящиеся к различным разделам микрофлюидики [6]. Она, правда, в большей

Особенностью курса является политехнический (междисциплинарный) характер, т.к. его разделы формально могут быть отнесены к различным областям знаний - математика, физика, химия, биология и смежным дисциплинам: математическая физика и биофизика, биохимия, физическая химия, биомедицина, аналитическая химия и т.п.

С другой стороны, некоторые ключевые вопросы, связанные с проектированием и изготовлением устройств, находятся вне рамок пособия [1]. Тем самым, актуальным представлялось создание учебных материалов либо относящихся к вопросам, не рассмотренным в базовом пособии, либо более подробно и детально рассматривающих отдельные разделы. Исходя из этих соображений, для магистрантов университета ИТМО были разработаны пособия [7,8]. В частности, сравнительно кратко в [1] был рассмотрен раздел, касающийся принципов и реализации «капельной» (droplet)-микрофлюидики. Этот пробел восполнен учебным пособием [8]. Т.к. данное направление исследований сейчас актуально, то публикации по этой теме достаточно многочисленны, например, легко доступны статьи [9,10] и более поздние, включая 2015 и 2016 гг.

Общие выводы, касающиеся внедрения в учебный процесс курса «Микро- и нанотехнологии»:

1. Поскольку необходимым условием для эффективного восприятия учебного курса представляется наличие у студентов базовых знаний в самых различных областях (математика, физика, химия, материаловедение, биология, программирование, в первую очередь, методы численного моделирования), целесообразно включать этот курс в магистерскую (5-6 курсы), а не бакалаврскую (3-4 курсы) учебную программу;
2. Учитывая междисциплинарный (политехнический) характер основных разделов курса, желательно его «разделение» между несколькими лекторами (преподавателями). Например, специалистами в области математики, вычислительной математики и математической

физики (первый), физики, физической и аналитической химии (второй), биология, биохимия, медицина и т.п. (третий) и т.п.

3. Наличие множества разделов курса, каждый из которых обладает определенной автономностью и самостоятельностью требует регулярного контроля знаний студентов. Т.е. наличие одного экзамена (или зачета) по завершении семестра представляется явно недостаточным. Формы контроля знаний – тестирование, написание рефератов, подготовка кратких сообщений (презентаций), используемые при преподавании данного курса, описаны выше. Разумеется, выбор формы отчетности со стороны студентов определяется характером изучаемого материала, его объемом, отчасти, принятыми традициями. К сожалению, при оценивании содержания рефератов неизбежно приходится использовать системы типа «Антиплагиат», поскольку в ряде случаев доля неоригинального материала может превышать 85, а то и 90%.

Реализация вышеуказанных принципов подтверждена составом авторов данного доклада, каждый из которых либо читает определенный фрагмент курса, либо участвует в подготовке соответствующих разделов учебных пособий, либо разрабатывает учебно-методических материалы по другим разделам курса «Микро- и нанотехнологии», а также выбором разнообразных форм контроля знаний студентов, описанных ранее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанотехнологии в биологии и медицине. Микрофлюидика [Электронный ресурс]: курс лекций [для студентов и магистрантов Института фундаментальной биологии и биотехнологии СФУ] / Сиб. федер. ун-т, Ин-т фундамент. биологии и биотехнологии ; сост.: А.А. Евстрапов, А.Л. Буляница. - Электрон. текстовые дан. (PDF, 3,7 Мб). - Красноярск : СФУ, 2015. - 133 с. - Загл. с титул. экрана. - Библиогр.: с. 131-132. - Изд. № 2015-1337 : Б. ц.
2. G. Plopper. Principles of Cell Biology. 2nd Ed. 2016. 566 p
3. A. Tiwari, A.P.F. Turner. Biosensors Nanotechnology. 2014. 552 p.
4. R.P. Schaudies. Biological Identification. DNA Amplification and Sequencing, Optical Sensing, Lab-on-chip and Portable Systems. 2014. 478 p.
5. Jean Berthier. Micro-Drops and Digital Microfluidics. Second Ed. 2013. 545 p.
6. Микрофлюидные системы для химического анализа // под ред. Золотов Ю.А., Курочкин В.Е., Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 528 с. ISBN 978-5-9221-1315-1
7. Основы нанотехнологий. Часть 1: учебное пособие /А.А. Евстрапов, Я.С Посмитная; М-во образования и науки РФ, Университет ИТМО.-СПб. [Университет ИТМО], 2014. Ч.1.: Микро- и нанотехнологии для биологических и медицинских исследований, - 2014. – 118 с., илл.;- Библиогр. С.113-118.
8. Микро- и нанотехнологии для биологических и медицинских исследований. Ч.2. Капельная микрофлюидика: учебное пособие /Университет ИТМО; сост.

К.И. Белоусов, А.А. Евстрапов, И.В. Кухтевич, Я.С. Посмитная. – СПб, Университет ИТМО, 2015. – 55 с.
9. Helen Song, Delai L. Chen, and Rustem F. Ismagilov. Reactions in Droplets in Microfluidic Channels // Angew Chem Int Ed Engl. 45 (44), 7336–7356 (2006).
10. Shia-Yen Teh, Robert Lin, Lung-Hsin Hung and Abraham P. Lee. Droplet microfluidics // Lab Chip, **8**, 198-220 (2008).

A.L. Bulyanitsa[1,2], A.A. Evstrapov[2,3], Ya.S. Posmitnaya[2,3], K.I. Belousov[3]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia
[2] Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg, Russia
[3] Saint-Petersburg national research University of information technologies, mechanics and optics (University ITMO), Russia, St. Petersburg

Abstract

The principles of formation and teaching of a basic course "Micro and nanotechnology for biological and medical research", focused on students, masters and postgraduates. The course is intended for professionals involved in the design and construction of devices for biological and medical research, physical experiments, chemical technology and other related specialties. The findings are based on the experience of teaching the indicated subjects at the University ITMO and the Institute for analytical instrumentation of the Russian Academy of Sciences (both St. Petersburg), St. Petersburg National research Academic University of the Russian Academy of Sciences (the Academic University) and Siberian Federal University (Krasnoyarsk)

Keywords: micro - and nanotechnology, the principles of formation of a course, experience in teaching, biological and medical research, physical experiment, microfluidics (microhydrodynamics), numerical simulation

REFERENCES

[1] Nanotechnology in biology and medicine. Microfluidics [Electronic resource]: a course of lectures for students and undergraduates of the Institute of fundamental biology and biotechnology Siberian Federal University] / Sib. Feder. University, Institute Foundation. biology and biotechnology; ed.: A.A. Evstrapov, A.L. Bulyanitsa. - Electron. text data. (PDF, 3.7 MB). - Krasnoyarsk: SFU, 2015. - 133 p. (rus)
[2] G. Plopper. Principles of Cell Biology. 2nd Ed. 2016. 566 p.
[3] A. Tiwari, A.P.F. Turner. Biosensors Nanotechnology. 2014. 552 p.
[4] R.P. Schaudies. Biological Identification. DNA Amplification and Sequencing, Optical Sensing, Lab-on-chip and Portable Systems. 2014. 478 p.
[5] Jean Berthier. Micro-Drops and Digital Microfluidics. Second Edition. 2013. 545 p.

[6] Microfluidic systems for chemical analysis // eds by Y. A. Zolotov, V. E. Kurochkin, Moscow, FIZMATLIT, 2011. 528 p. ISBN 978-5-9221-1315-1 (rus)
[7] Fundamentals of nanotechnology. Part 1: tutorial /A.A. Evstrapov, Ya.S. Posmitnaya; Ministry of education and science of the Russian Federation, the ITMO University.-SPb. [The ITMO University], 2014. Part 1. Micro and nanotechnology for biological and medical research in 2014. 118 p., Ref. P. 113-118 (rus)
[8] Micro and nanotechnology for biological and medical research. Part 2. Droplet microfluidics: a tutorial /the ITMO University; ed. K.I. Belousov, A.A. Evstrapov, I.V. Kukhtevich, Ya.S. Posmitnaya. St-Petersburg, University ITMO, 2015. 55 p. (rus)
[9] Helen Song, Delai L. Chen, and Rustem F. Ismagilov. Reactions in Droplets in Microfluidic Channels // Angew Chem Int Ed Engl. 45 (44), 7336–7356 (2006).
[10] Shia-Yen Teh, Robert Lin, Lung-Hsin Hung and Abraham P. Lee. Droplet microfluidics // Lab Chip, 8, 198-220 (2008).

УДК 658.562.012.7; DOI 10.1872/MMF-2016-125

В. А. Косова[1], Д.М.Давыдова[2]

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

[1]Валентина Андреевна Косова, ассистент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: kosova.va@yandex.ru

[2]Дарья Михайловна Давыдова, студент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: dasha-bryanskaya@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обеспечения качества механической обработки корпусных деталей. Для этого автоматизирован процесс обработки результатов замеров и организации статистического контроля производства с помощью контрольных карт Шухарта. В ходе работы изучен существующий процесс контроля деталей после механической обработки, разработана база данных, создано автоматизированное приложение для формирования отчетов и построения контрольных карт Шухарта. Внедрение автоматизированного приложения позволит отслеживать информацию по возникающим несоответствиям, накапливать статистические данные, предупреждать появление брака.

Ключевые слова: автоматизированное приложение, контрольные карты Шухарта, статистический контроль.

Введение

Современная экономическая ситуация, неизбежный рост цен на импортные товары на фоне прогнозов от Международного валютного фонда о рецессии российской экономики вынуждают отечественные промышленные предприятия всё чаще задумываться над вопросами удовлетворенности потребителей и сохранения стабильного дохода [1]. Ответы на подобные вопросы, бесспорно, связаны с понятием качества продукции, для достижения которого можно выделить два важных фактора

- автоматизацию процесса обработки результатов контроля и организацию статистического контроля производства с помощью контрольных карт [2]. Контроль стабильности технологического процесса реализуется на основе стандарта ГОСТ Р 50779.42-99 Контрольные карты Шухарта [3].

Разработка приложения осуществлена для машиностроительного предприятия, где введена операция выборочного автоматизированного контроля геометрии корпусных деталей редуктора.

Технологический процесс изготовления корпусных деталей редуктора на предприятии следующий: изготовление заготовок деталей методом литья под давлением и последующая механическая обработка на станках с ЧПУ [4].

После изготовления деталей инженером по качеству производится выборочный автоматизированный контроль с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) Mitutoyo BRT-A916. Полученные результаты контроля автоматически заносятся в отчет - файл формата MS Excel. После этого проводится анализ на предмет отклонений размеров от максимально (минимально) допустимых значений: данные отчета сопоставляются с размерами, заданными в конструкторской документации [5]. По результатам анализа принимается решение о возможной корректировке процесса: внесении изменений в управляющие программы обработки деталей на станках с ЧПУ, замену инструмента и т.д.

Следует отметить, что процесс обработки замеров на предприятии не автоматизирован и отнимает много времени. Также отсутствует возможность анализа несоответствий за определенный промежуток времени.

Для решения вышеперечисленных проблем создано многопользовательское автоматизированное приложение. Использование приложения позволит сократить время на формирование отчетов о результатах контроля геометрии деталей и оценивать стабильность технологического процесса механической обработки деталей посредством построения контрольных карт индивидуальных значений.

Разработка приложения

Автоматизированное приложение предназначено для инженера по качеству и инженера-технолога. При работе автоматизированного приложения обеспечивается процесс обработки результатов замеров КИМ и построение контрольных карт Шухарта. Автоматизированное приложение разработано в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0 [6].

Для реализации процесса обработки замеров посредством автоматизированного приложения был разработан алгоритм [7]. Схема алгоритма представлена на рисунке 1.

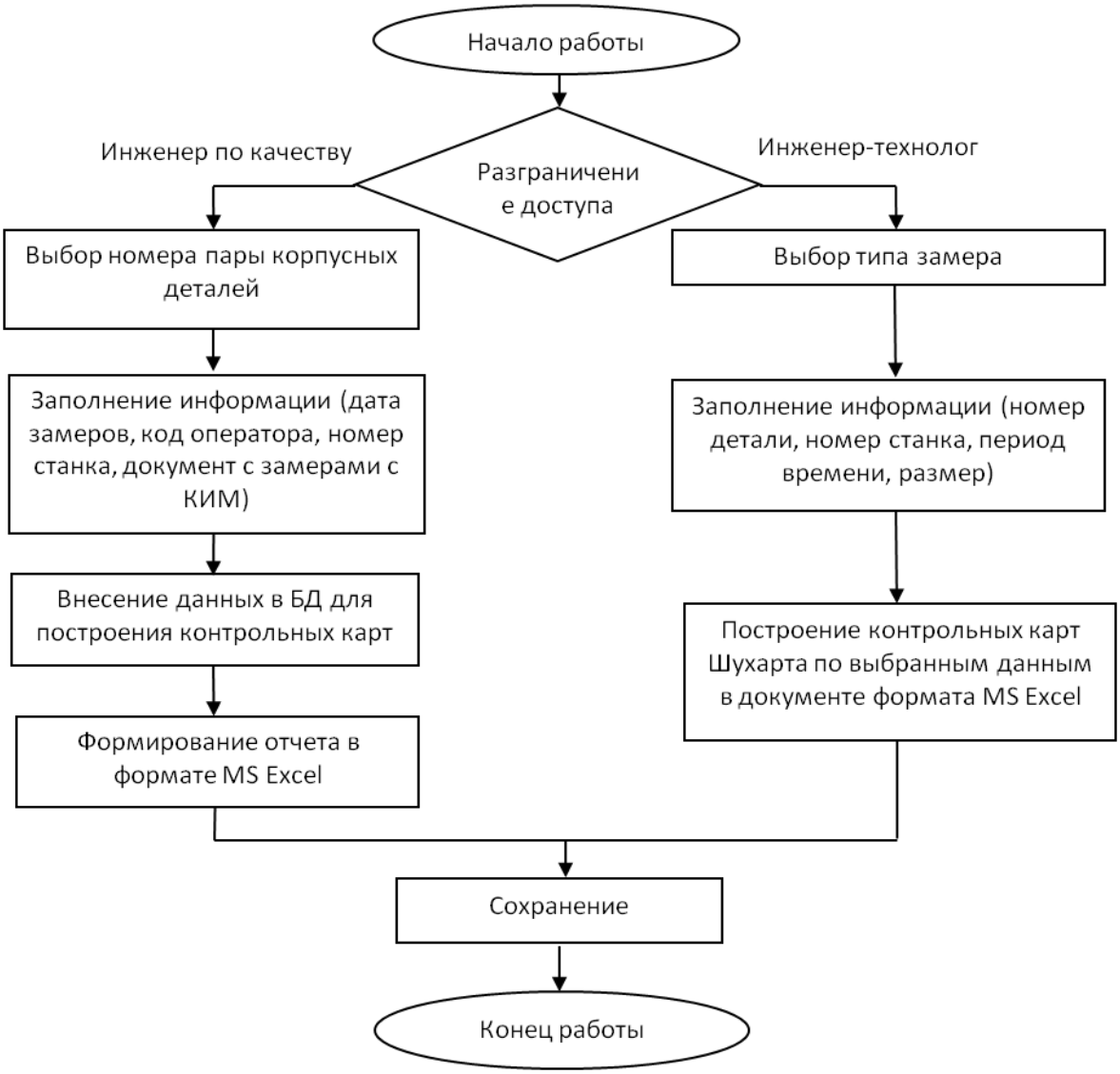


Рисунок 1 – Алгоритм работы приложения

Выборочный контроль корпусных деталей после механической обработки проводит инженер по качеству. Он измеряет детали, обрабатывает полученные с КИМ замеры и формирует отчет. Анализ данных отчета – задача инженера-технолога. Он просматривает результаты замеров, оценивает стабильность работы станка, принимает решение о выпуске деталей, а в случае обнаружения отклонений проводит корректирующие мероприятия [8].

Согласно функциям доступ пользователей к автоматизированному приложению разграничен. Инженер по качеству имеет права администратора; для него доступна функция внесения результатов замеров. Инженер-технолог может просматривать информацию в режиме чтения и печати; редактирование и внесение данных при этом запрещено [9].

Для хранения данных использована база данных MS Access, которую условно можно разделить на две составляющие:

1) Таблицы со справочной информацией о корпусных деталях.
2) Таблицы для внесения данных КИМ.
Классификация таблиц базы данных представлена на рисунке 2.

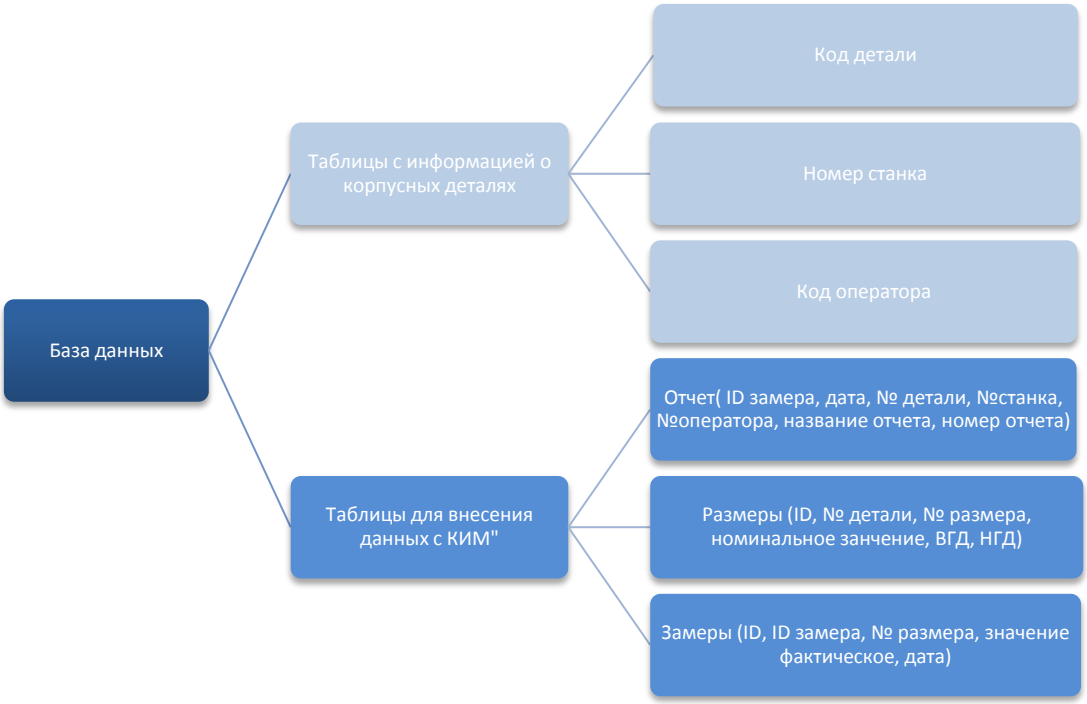


Рисунок 2 - Классификация таблиц базы данных

База данных MS Access хранится на сервере. Доступ к информации таблиц базы данных осуществляется с использованием технологии ADO [10].

Для создания пользовательского интерфейса автоматизированного приложения были разработаны формы, навигация по которым осуществляется по следующей схеме (рисунок 3).

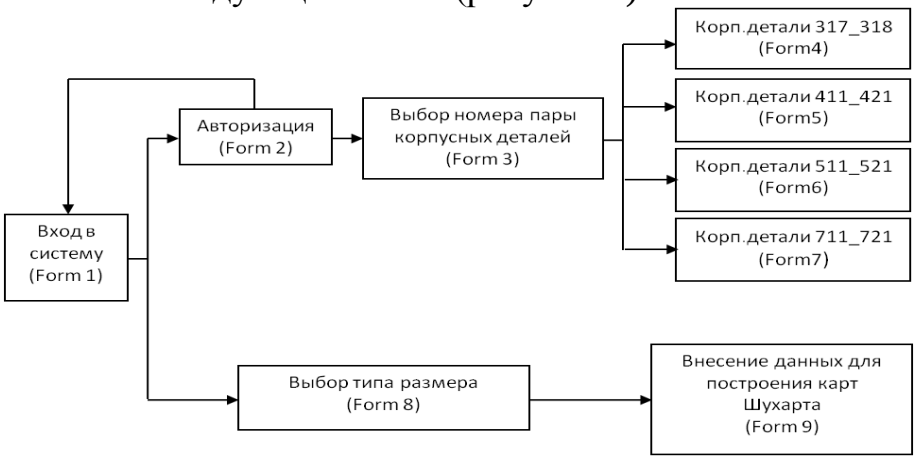


Рисунок 3 – Схема навигации по формам автоматизированного приложения

Работа в автоматизированном приложении начинается с выбора пользователя и перехода на форму авторизации. Вид главной формы представлен на рисунке 4.

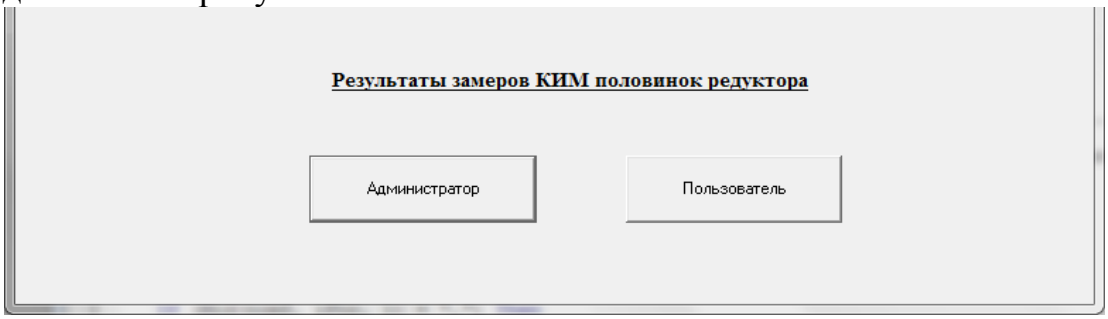


Рисунок 4 – Главная форма

Модуль администратора

При нажатии на кнопку “Администратор” появляется форма авторизации (рисунок 5).

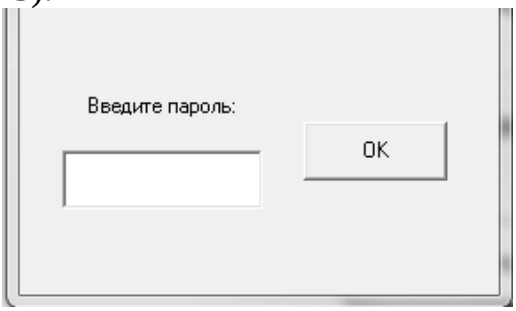


Рисунок 5 – Форма авторизации

После ввода правильного пароля и нажатия на кнопку “ОК” открывается доступ к форме выбора типа детали (рисунок 6).

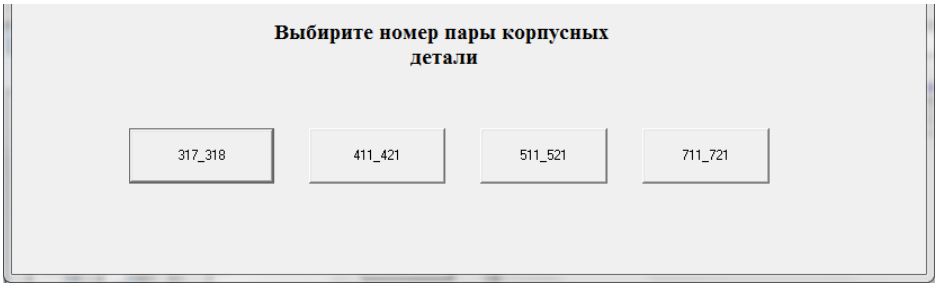


Рисунок 6 – Форма выбора типа деталей

При нажатии на кнопку, соответствующую типу детали, осуществляется переход на форму создания отчета (рисунок 7).

На форме создания отчета необходимо заполнить информацию:

– дата проведения замеров КИМ;
– № станка, на котором осуществлялась механическая обработка;
– код оператора;
– путь к файлу с замерами КИМ;

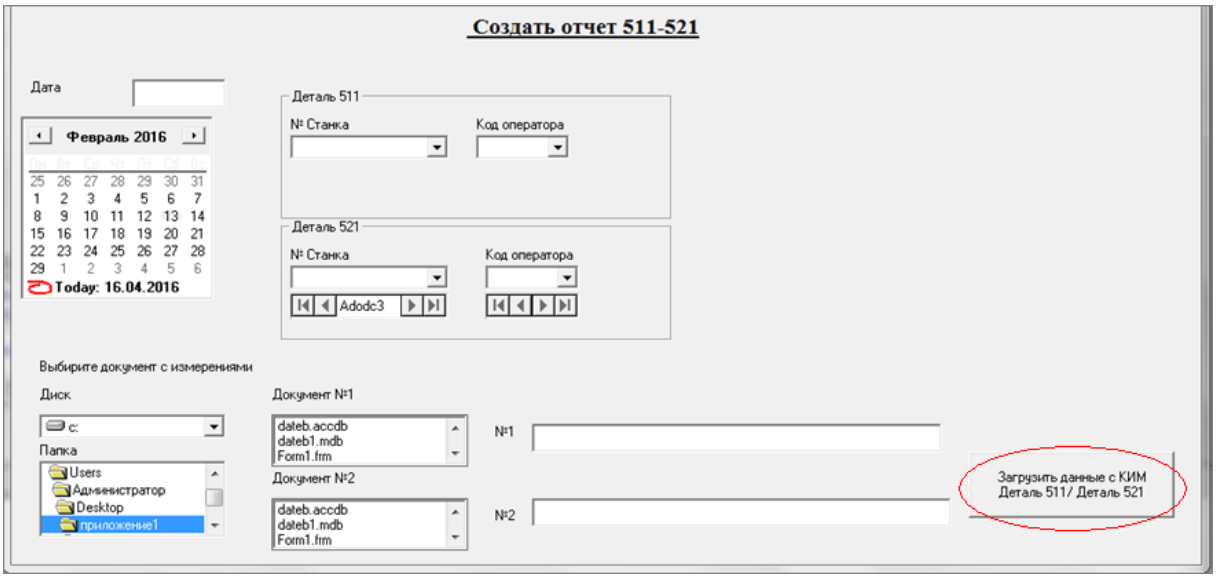


Рисунок 7 - Форма создания отчета

При нажатии на кнопку “Загрузить данные КИМ”, значения замеров КИМ автоматически вносятся в таблицы базы данных “Отчет” (рисунок 8), “Размеры” (рисунок 9) и в шаблон отчета – файл MS Excel (рисунок 10).

Otchet

ID_Замера	Дата_замеров	№_Детали	№_Станка	№_Оператора	Название отчета	№ отчета
69	10.02.2016	005.67.0511			_10.02.2016-2.xls	2
70	10.02.2016	005.67.0521			_10.02.2016-2.xls	2
71	05.02.2016	005.67.0511			_05.02.2016-2.xls	2
72	13.02.2016	005.67.0511			511_521_13.02.2016-1	1

Рисунок 8 - Таблица “Отчет”

Otch... Razmer

ID	№_Детали	№_Размера	Номинал_размер	ВГД	НГД	Тип размер
1	005.67.0511	1	197,5	197,53	197,47	Линейный раз
2	005.67.0511	2	8	7,985	7,949	Диаметральны
3	005.67.0511	3	556,4	556,43	556,37	Линейный раз
4	005.67.0511	4	8	7,985	7,949	Диаметральны
5	005.67.0511	5	40	39,997	39,958	Диаметральны
6	005.67.0511	6	35	35,062	35	Диаметральны
7	005.67.0511	7	67,7	67,73	67,67	Линейный раз
8	005.67.0511	8	63,2	63,23	63,17	Линейный раз
9	005.67.0511	9	35	34,997	34,938	Диаметральны
10	005.67.0511	10	67,7	67,73	67,67	Линейный раз

Рисунок 9 - Таблица “Размер”

В таблицу шаблона автоматически добавляются фактические размеры, полученные в процессе измерений корпусных деталей. После внесения данных осуществляется автоматическое сравнение результатов замеров с заданными; при этом красным цветом выделяются ячейки с размерами, выходящие за пределы поля допуска. Созданный отчет автоматически сохраняется в папку. В случае если номер детали и дата двух отчетов совпадают, к названию документа прибавляется порядковый номер.

№	Размер по чертежу						Фактический размер		№	Размер по чертежу						Фактический размер	
	Координата	Допуск НГД	Допуск ВГД	Отверстие	Допуск НГД	Допуск ВГД	Координата	Отверстие		Координата	Допуск НГД	Допуск ВГД	Отверстие	Допуск НГД	Допуск ВГД	Координата	Отверстие
1	100	-0,5	0,5	Ø5	-0,5	0,5	1	2	1	100	-0,5	0,03	Ø5	-0,5	0,5	1	2
2	285	-0,5	0,5	Ø7	-0,5	0,5	3	4	2	285	-0,5	0,03	Ø7	-0,5	0,5	3	4
3	-	-	-	Ø10	-0,5	0,5	-	5	3	-	-0,5	-	Ø30	-0,5	0,5	-	5
				Ø20	-0,5	0,5	-	6									
4	50	-0,5	0,5	Ø12	-0,5	0,5	7	9	4	50	-0,5	0,03	Ø25	-0,5	0,5	6	8
(1)	68	-0,5	0,5				8		(1)	68	-0,5	0,03				7	
5	33	-0,5	0,5	Ø18	-0,5	0,5	10	12	5	33	-0,5	0,03	Ø36	-0,5	0,5	9	11
(2)	78	-0,5	0,5				11		(2)	78	-0,5	0,03				10	
6	150	-0,5	0,5	Ø20	-0,5	0,5	13	15	6	150	-0,5	0,03	Ø20	-0,5	0,5	12	14
	36	-0,5	0,5				14			36	-0,5	0,03				13	
7	98,5	-0,5	0,5	Ø30	-0,5	0,5	16	18	7	98,5	-0,5	0,03	Ø20	-0,5	0,5	15	17
	78	-0,5	0,5				17			78							
8	78,1	-0,5	0,5	Ø45	-0,5	0,5	19	21		78,1	-0,5	0,03				16	
	45	-0,5	0,5				20			45							
9	78,6	-0,5	0,5	Ø7	-0,5	0,5	22	23	8	78,6	-0,5	0,05	Ø10	-0,5	0,5	18	19
10	97	-0,5	0,5	Ø80	-0,5	0,5	24	25	9	97	-0,5	0,03	Ø7	-0,5	0,5	20	21
				Ø52	-0,5	0,5	26	27					Ø56	-0,5	0,5	22	23
11	Допуск плоскостности				0,25		28		10	Допуск плоскостности				0,25		24	
12	Смещение отверстий по оси		Y	Ø40	-0,5	0,5	29		12	Смещение отверстий по оси		Y	Ø20	-0,5	0,5	25	
				Ø35	-0,5	0,5	30						Ø10	-0,5	0,5	26	
				Ø12	-0,5	0,5	31						Ø12	-0,5	0,5	27	
				Ø72	-0,5	0,5	32						Ø25	-0,5	0,5	28	
				Ø52	-0,5	0,5	33										
13	Несосность отверстий по оси		X	Ø30 и Ø40	-0,5	0,5	34		13	Несосность отверстий по оси		X	Ø52 и Ø20	-0,5	0,5	29	
			Y				35										
			X	Ø32 и Ø40	-0,5	0,5	36										
			Y				37					Y				30	
			X	Ø80 и Ø52	-0,5	0,5	38										
			Y				39										

Рисунок 10 – Шаблон отчета – файл MS Excel

Модуль пользователя

Для доступа к внесенным данным инженеру-технологу необходимо нажать на кнопку “Пользователь” главной формы автоматизированного приложения; при этом осуществляется переход на форму типов размеров (рисунок 11).

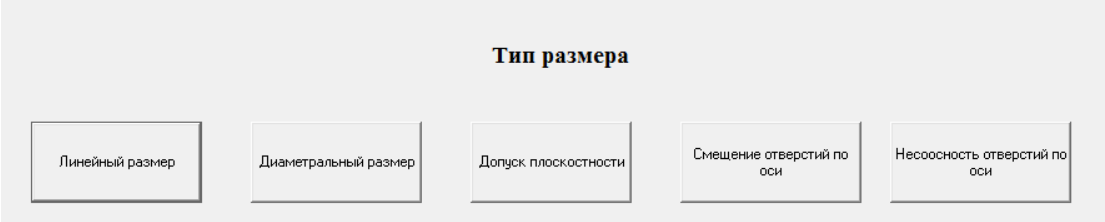


Рисунок 11 – Форма типов размеров

При выборе размера инженер-технолог выбирает кнопку перехода на соответствующую форму (рисунок 12).

Для того чтобы инженер-технолог в дальнейшем мог идентифицировать причину дефекта, на форме предусмотрены фильтры: по дате замеров, по координате, по номеру станка.

После фильтрации данных инженер-технолог нажимает на кнопку “Построить контрольную карту Шухарта”. При этом результаты запроса автоматически вносятся в книгу MS Excel и осуществляется построение контрольной карты Шухарта, анализируя которую инженер-технолог принимает решение о необходимости корректировки процесса: внесении изменений в управляющие программы обработки деталей на станках с ЧПУ, замене инструмента и т.д.

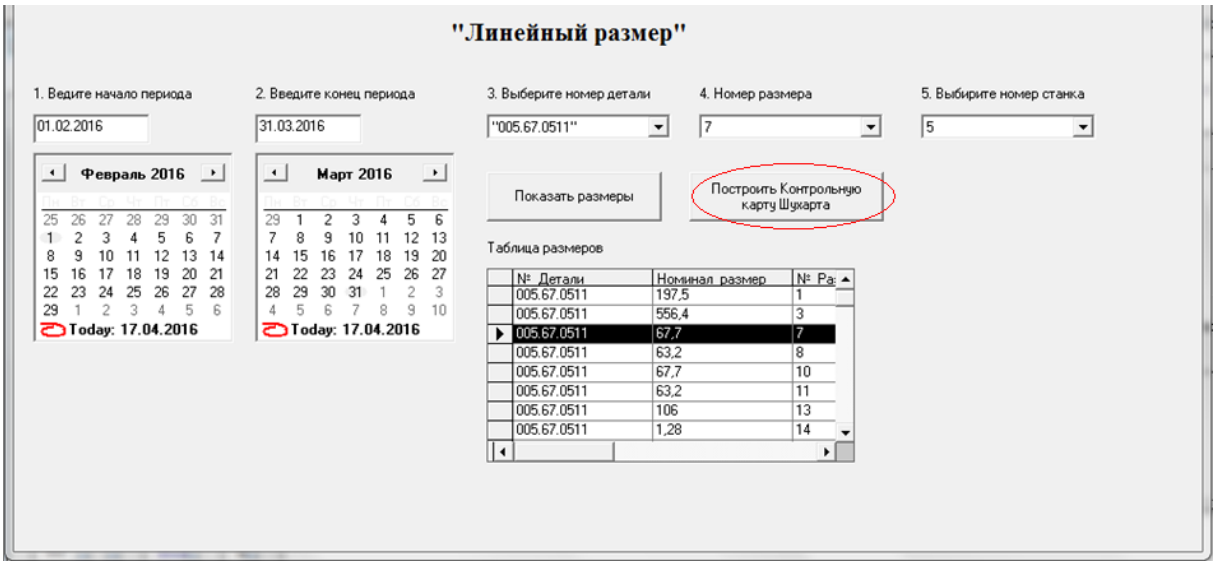


Рисунок 12 – Форма фильтрации

Заключение

В результате проделанной работы создано автоматизированное приложение, с помощью которого осуществляется процесс обработки замеров КИМ и построение контрольных карт, используемых для обеспечения стабильности процесса механической обработки.

Внедрение разработанного приложения позволит сократить время обработки замеров, обеспечит предупреждение брака механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евгений Калюков. Россию ждет спад [Электронный ресурс]. http://www.rbcdaily.ru/economy/562949997534090 – Загл. с экрана. - Яз.рус.
2. ГОСТ Р 50779.42-99 Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
3. М.И.Седлер, В.А.Степанова. Повышение качества изготовления деталей путем организации статистического контроля их производства. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – с 1012-1018.
4. А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин. Типовые технологические процессы изготовления деталей машин: учебное пособие / – 2-е изд., стер. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 112 с.
5. Интерпретация контрольных карт Шухарта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://quality.eup.ru/MATERIALY7/kks.htm – Загл. с экрана. - Яз.рус
6. Г.З. Гарбер Основы программирования на Visual Basic и VBA в Excel, 2007. – Солон-Пресс, 2008. – 192 с.
7. ГОСТ 19.003-80. Схемы алгоритмов и программ. Обозначения условные графические

8. М.И. Седлер, М.Х. Седлер Статистические методы в управлении качеством [Электронный ресурс]: учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2013г. URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2909.pdf
9. В.С.Давыдова, В.А.Степанова. Решение проблемы повышения качества управления документацией в процессе входного контроля деталей путем создания автоматизированного приложения. Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ» материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Санкт-Петербург, 2015, с.357-360.
10. Хисматуллина А.Т., Седлер М.И., Создание автоматизированной системы учета контрольно-измерительного оборудования на предприятии ОАО "Звезда", Неделя науки СПбГПУ материалы научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: М.С. Кокорин (ответственный редактор) и др. 2014. С. 299-302.

V. A. Kosova, D. M. Davydova

QUALITY ASSURANCE OF MECHANICAL TOOLING DUE TO PROCESS AUTOMATION

all: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Within the scope of this publication, questions of quality assurance of mechanical tooling components are considered. For this reason a process of measurement data processing and statistic control is automated. Existing process of quality control was studied. Database and automated application was developed for the purpose of report generation and building Shewhart Control Charts. Implementation of the automated application allows provide information about non-conformities keeps statistic data and prevents the appearance of rejected items.

Key words: automated application, Shewhart Control Charts, statistical control.

REFERENCES

[1] Evgenij Kaljukov. Rossiju zhdet spad [Jelektronnyj resurs]. http://www.rbcdaily.ru/economy/562949997534090 – Zagl. s jekrana. - Jaz.rus.
[2] GOST R 50779.42-99 Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty Shuharta.
[3] M.I.Sedler, V.A.Stepanova. Povyshenie kachestva izgotovlenija detalej putem organizacii statisticheskogo kontrolja ih proizvodstva. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 4-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. / pod red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova. – Spb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. Pp 1012-1018.

[4] A.G. Tkachev, I.N. Shubin. Tipovye tehnologicheskie processy izgotovlenija detalej mashin: uchebnoe posobie / – 2-e izd., ster. – Tambov : Izd-vo Tamb. gos. tehn. un-ta, 2007. 112 p.
[5] Interpretacija kontrol'nyh kart Shuharta [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://quality.eup.ru/MATERIALY7/kks.htm – Zagl. s jekrana. - Jaz.rus
[6] G.Z. Garber Osnovy programmirovanija na Visual Basic i VBA v Excel, 2007. – Solon-Press, 2008. 192 p.
[7] GOST 19.003-80. Shemy algoritmov i programm. Oboznachenija uslovnye graficheskie
[8] M.I. Sedler, M.H. Sedler Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom [Jelektronnyj resurs]: uchebnoe posobie. – Sankt-Peterburg, 2013g. URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2909.pdf
[9] V.S.Davydova, V.A.Stepanova. Reshenie problemy povyshenija kachestva upravlenija dokumentaciej v processe vhodnogo kontrolja detalej putem sozdanija avtomatizirovannogo prilozhenija. Nauchnyj forum s mezhdunarodnym uchastiem «Nedelja nauki SPbPU» materialy nauchno-prakticheskoj konferencii. Institut metallurgii, mashinostroenija i transporta SPbPU. Sankt-Peterburg, 2015, pp.357-360.
[10] Hismatullina A.T., Sedler M.I., Sozdanie avtomatizirovannoj sistemy ucheta kontrol'no-izmeritel'nogo oborudovanija na predprijatii OAO "Zvezda", Nedelja nauki SPbGPU materialy nauchno-prakticheskoj konferencii c mezhdunarodnym uchastiem. Redakcionnaja kollegija: M.S. Kokorin (otvetstvennyj redaktor) i dr. 2014. Pp. 299-302.

УДК 378:622; DOI 10.1872/MMF-2016-126

Е.Н. Кушниренко

ЛИЧНОСТНО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД КАК ОДНО ИЗ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ-ГОРНЯКОВ

Елена Николаевна Кушниренко
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: teacherlk@newmail.ru

Аннотация

В статье рассматривается личностно-деятельностный подход, который является одним из педагогических условий применения компьютерно-ориентированного обучения в профессиональной подготовке будущих инженеров-горняков. На основе проведенного теоретико-методологического анализа личностно-деятельностного подхода сделан вывод, что он является важным составляющим в профессиональной подготовке будущих инженеров-горняков, так как он способствует развитию личностных и профессиональных навыков и умений будущих специалистов.

Ключевые слова: профессиональное образование, педагогические условия, личностно-деятельностный подход, профессиональная компетентность, инженеры-горняки.

Профессиональная деятельность будущего специалиста горного профиля имеет свою специфику и предполагает специальные условия формирования готовности к выполнению профессиональных обязанностей. Эффективность и результативность формирования готовности будущих инженеров-горняков к профессиональной деятельности зависит от многих факторов, таких как совокупность принципов, методов, приемов и средств обучения, а также педагогических условий организации обучения.

В педагогических исследованиях современной высшей школы рассматриваются проблемы улучшения функционирования педагогических систем и повышения эффективности процесса обучения. Наибольший интерес у ученых вызывает обоснование, проверка и подтверждение педагогических условий, которые обеспечат успешную подготовку будущего специалиста к профессиональной деятельности.

Современный рынок труда требует качественно новых преобразований в структуре учебного процесса. Поэтому необходимо создавать такие педагогические условия учебного процесса, при которых будут взаимодействовать все компоненты, и процесс получения теоретических знаний будет происходить параллельно с практической деятельностью.

Нет сомнения в том, что современное обучение должно быть личностно-ориентированным и деятельностным.

Данные дидактические подходы к обучению рассмотрены в работах таких выдающихся ученых и исследователей, как Г.А. Атанов, Л.С. Выготский, П.Я. Гальперин, В.И. Загвязинский, А.Н. Леонтьев, А.В. Петровский, К.К. Платонов, И.В. Роберт, С. Л. Рубинштейн, С.В. Савченко, В.В. Сериков, Н.Ф. Талызина, О.Ф. Турянська, А.И. Шевченко, В.В. Ягупов, И.С. Якиманская и др.

Очевидно, что разработка данных подходов – достаточно сложная теоретическая и практическая задача. Сложность заключается в том, что личность одновременно является одним из самых уникальных созданий в мире и субъектом реорганизации этого мира и самого себя. Реорганизация личности совершается и в учебной деятельности.

Основная задача личностно-ориентированного обучения заключается в психолого-педагогической помощи личности в становлении ее субъектности, социализации, культурном, жизненном и профессиональном самоопределении.

Важнейшим требованием, предъявляемым к современному образованию, является его гуманистическая и личностная направленность, когда человек рассматривается как основная ценность. Исходя из этих принципов, все методы, формы и технологии образования являются не самоцелью, а средством обеспечения наиболее благоприятных условия для личностного саморазвития. Основу такого подхода составляет методологическое требование, изложенное К.Д. Ушинским: «Если педагогика хочет воспитывать человека во всех отношениях, то она должна, прежде всего, изучить его тоже во всех отношениях» [13, с. 23].

Предпосылки появления личностно-ориентированного и деятельностного подходов определяются в различных исследованиях личности.

Так, ученый В.В. Сериков дает определение личностно-ориентированного обучения, анализируя реализацию личностных функций человека в образовательном процессе. Он считает, что полнота этих функций, представленность их в деятельности субъектов учебного процесса могут свидетельствовать о том, что образовательный процесс достиг личностного уровня своего функционирования, и что главной функцией личностно-ориентированного образования является обеспечение

личностного развития каждого субъекта учебного процесса, настаивая на признании за учеником права на самоопределение и самореализацию в процессе познания через овладение собственными способами учебной работы [10, с. 21-25].

По мнению В.В. Серикова, содержание личностного подхода состоит в создании условий для проявления личностных функций студента, его универсальных личностных способностей: мотивации, выбора, содержания, творчества, самореализации, рефлексии и т.д. [10, с. 21-25]. Идею реализации данных условий ученый видит в создании личностно-ориентированных ситуаций, в которых будет востребовано проявление личностных функций и осуществление поиска нового содержания, возможность творческого выбора вариантов решения проблем, и деятельность, в процессе которой будет формироваться субъективный опыт обучаемого.

Разрабатывая концепцию личностно-ориентированного образования, И.С. Якиманская рассматривает личность как цель и фактор образовательного опыта в процессе обучения. Теоретическое назначение ее концепции личностно-ориентированного обучения состоит в раскрытии природы и условий реализации личностно-развивающих функций образовательного процесса. Практическая ценность этой концепции заключается в разработке регулятивов для практики образования, которая должна стать альтернативной традиционному обучению [15, с. 64-77]. По ее мнению, личностная ориентация образования предусматривает такой способ усвоения содержания образования субъектом, во время которого происходит своеобразное «снятие» объективного значения материала и выявления в нем субъективного смысла личностно-утвердительных ценностей. Личностно-ориентированное обучение – это такое обучение, центром которого является личность обучающегося, его самобытность, самоценность: субъектный опыт каждого сначала раскрывается, а затем согласовывается с содержанием образования [15, с. 31-42].

На современном этапе личностный подход становится главным психолого-педагогическим принципом организации учебно-воспитательного процесса, от которого зависит эффективность перехода системы образования на развитие личности обучающегося, тем не менее, его научно-методический уровень не удовлетворяет педагогов и психологов.

Авторы коллективного проекта ООО «Дрофа» и Института ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании (ИИТО ЮНЕСКО) [8, с. 89] провели исследование современных педагогических технологий и пришли к выводу, что личностно-ориентированный и деятельностный подходы предусматривают:

1) унитарный взгляд на обучающегося как на личность, развитие способности личности к самоорганизации, к умению самостоятельно

решать профессиональные, жизненные и внутренние проблемы. При этом образование рассматривается как средство решения этих проблем;

2) ориентацию на нужды, личный опыт и уровень реального развития личности обучающегося и построение процесса образования в области его ближайшего развития, т.е. личной направленности развития;

3) что знания являются средством развития личности и перестают быть самоцелью;

4) развитие разносторонних способностей личности, а именно, умственных, творческих, коммуникативных, рефлексивных, а также развитие мотивационно-ценностной сферы личности;

5) что в личностно-ориентированном образовании осуществляется субъект-субъектный способ взаимодействия, реализуемого в совместной деятельности. Здесь представлены равноправные действующие лица – преподаватель и обучающийся, причем оба имеют собственные мотивы, цели деятельности и надлежащие возможности для их осуществления;

6) что основное отличие личностно-ориентированного подхода состоит в том, что приоритетом в нем является учебная деятельность, имеющая своей целью и результатом не решенную задачу, а овладение учащимся общим способом решения задач данного класса, решения подобных проблем;

7) что при личностно-ориентированном подходе к обучению базовым становится продуктивная, творческая деятельность, а репродуктивная, направленная на отработку системы отдельных умений и навыков, выступает в качестве вспомогательной по отношению к базовой деятельности;

8) что образовательный процесс является некоторым циклом – проблемная ситуация, деятельность обучающегося по анализу ситуации и постановке проблемы, решение проблемы, рефлексия способа решения и самоизменения. Многократное прохождение обучающимся, этого цикла обеспечивает развитие способностей, рост его самостоятельности и субъективности [8, с. 89].

В последние годы существенно возрос интерес к личностному подходу именно в педагогической психологии и практической педагогике. И.А. Зимняя, утверждая важность личностного подхода, отмечала равноценность его с деятельностным подходом в педагогическом процессе. Это позволило выделить цель личностно-ориентированного подхода, которая заключается в «переориентации всего процесса обучения на постановку и решение самими обучающимися учебных задач (исследовательских, профессиональных, познавательно-коммуникативных)». Далее автор говорит о том, что «организация обучения на основе личностно-деятельностного подхода означает, что все методические решения преподавателей должны преломляться через призму того, кого они обучают: его потребностей, мотивов, способностей,

активности, интеллекта и других индивидуально-психологических особенностей» [4, с. 64].

Деятельностный подход к жизни является важным достижением психологии. Он основан на принципиальном положении о том, что психика человека неразрывно связана с ее деятельностью и деятельностью обуславливается [1, с. 18]. Под деятельностью при этом понимается специальная активность человека, проявляющаяся в процессе его взаимодействия с окружающим миром, и это взаимодействие состоит в решении важных жизненных задач, которые определяют существование и развитие человека. По мнению А.Н. Леонтьева, человеческая жизнь – это «совокупность, точнее система деятельностей, сменяющих друг друга» [5, с. 81].

Человек не рождается с уже имеющимися взглядами на мир, знаниями о нем, умением решать различные задачи. Осуществлять деятельность человеку позволяет усваиваемый им опыт предыдущих поколений, а именно воспитание и обучение. Таким образом, деятельностный подход необходимо реализовывать и в обучении, т.е. процесс обучения следует рассматривать как деятельность личности.

Обучение любой дисциплине является одновременно и обучением соответствующим умственным действиям, а формирование умственного действия невозможно без усвоения определенных знаний. Диалектическое понимание здесь заключается в том, что приобрести знания означает выполнить с их помощью любую работу. Если мы будем ставить знания впереди деятельности, то эти знания будут беспредметными и фактически их усвоить нельзя, их можно только запомнить. Поэтому первичными с точки зрения целей обучения являются деятельность и действия, входящие в ее состав, а не знания. Они усваиваются для того, чтобы с их помощью выполнять действия, осуществлять деятельность, а не для того, чтобы они просто запоминались и служили только повышению эрудиции [1, с. 20]; [2, с. 39]; [3, с. 236-278].

Проведя анализ личностно-ориентированного и деятельностного подходов к обучению и основываясь на исследованиях ученых, можно сделать вывод, что эти два подхода используются в тесной связи в учебно-воспитательном процессе. Поэтому считаем целесообразным для определения подхода к организации компьютерно-ориентированного процесса обучения будущих инженеров-горняков использовать термин «личностно-деятельностный» подход.

Личностно-деятельностный подход акцентирует внимание на создании личностного потенциала специалиста, а не только на усвоении профессиональных знаний, умений и навыков.

Личностно-деятельностный подход вносит изменения в представление о важных задачах профессионального образования, которые заключаются не только в получении профессиональных знаний, способов деятельности,

норм и ценностей, в развитии определенных личностных свойств, но и в раскрытии сущностных сил личности, ее интеллектуального и нравственного потенциала, ее способности свободно ориентироваться в сложных социальных и профессиональных обстоятельствах; не только обслуживать существующие технологии, но и осуществлять инновационные, творческие процессы, формировать собственные профессиональные компетенции. Личностно-деятельностный подход заключается в становлении студента как активного субъекта, реализующего в учебном процессе и в будущей профессии свой способ жизнедеятельности, свою личностность [4, с. 65].

Наш опыт работы в условиях современного высшего образования подтверждает то, что только «знаниевый» подход, т.е. передача студентам суммы знаний для их запоминания с минимальным количеством задач для их применения (особенно на начальных курсах) не решает проблемы подготовки высококачественных специалистов для современного быстро изменяющегося технологического производства.

Итак, будем считать, что при применении личностно-деятельностного подхода к организации компьютерно-ориентированного процесса обучения будущего инженера-горняка нужно понимать определенные концептуальные положения, перечисленные ниже.

1. При проектировании и организации процесса обучения первичны не знания, а деятельность и действия, соответствующие профессиональным требованиям к будущему специалисту.

2. Конечной целью обучения является не запоминание знаний, а формирование способа действий, обеспечивающих выполнение будущей профессиональной деятельности. Содержание обучения составляется на основе системы действий, необходимых для выполнения задач будущей профессиональной деятельности, и в него входят знания, обеспечивающие их выполнение. Как указано в отраслевом образовательном стандарте высшего профессионального образования направления «Горное дело», специальности 7.090315 «Маркшейдерское дело», 7.090303 «Строительство подземных сооружений и шахт» образовательно-квалификационного уровня – базовое высшее образование – «Бакалавр», к профессиональным задачам инженера-горняка в области исследовательской и проектно-конструкторской деятельности относятся: сбор и систематизация информационных и исходных данных для проектирования шахт, решение на топографических картах инженерных задач по выбору направления и уклонов трассы, строительной площадки; выполнения расчетов элементов строительных конструкций по разным группам предельных состояний; избрание расчетной схемы и выполнение расчетов фундаментов с учетом условий строительства; организация работы при проведении горных выработок, горных разработок открытым способом с учетом требований безопасности труда и охраны окружающей

среды; избрание конструктивной схемы при сооружении подземных переходов, станций метрополитенов, подземных сооружений специального назначения и т.д.

Знания не являются самодостаточными, они являются лишь средством (инструментом) профессионального становления и воспитания будущего специалиста. Они играют вспомогательную роль, разъясняют и подготавливают практические действия. Усваивать знания можно только в процессе оперирования ими, т.е. в процессе их использования в соответствующих действиях, а не в процессе их запоминания.

3. Механизмом осуществления учебной деятельности является решение задач, а не простая проработка теоретического материала. Если студент-горняк не решает учебных задач, то это означает, что его учебная деятельность неорганизованная, и студент не сможет приобрести практические навыки по выполнению проектных и расчетных работ.

4. Обучение представляет собой совокупность двух взаимосвязанных, но самостоятельных деятельностей – учебной деятельности обучающего (научно-педагогического работника, или преподавателя) и учебной деятельности студента. В учебной деятельности обучающего субъектом деятельности является преподаватель, объектом – студент, а продуктом деятельности являются изменения объекта деятельности в соответствии с запланированной моделью специалиста. В учебной деятельности студента субъектом ее является студент, объектом – также студент, а продуктом деятельности становятся изменения, которые происходят в самом субъекте, т.е. студенте. Учебная деятельность преподавателя как ее субъекта предусматривает проектирование и организацию деятельности объекта (студента), а также систематическое управление процессом его компьютерно-ориентированной учебной деятельности.

Применяя личностно-деятельностный подход к компьютерно-ориентированному обучению будущих инженеров-горняков, преподаватель посредством проектирования и контроля над учебной деятельностью студентов способствует выполнению требований, как указано в образовательно-квалификационной характеристике направления «Горное дело», специальности 7.090315 «Маркшейдерское дело», 7.090303 «Строительство подземных сооружений и шахт», образовательно-квалификационного уровня – базовое высшее образование – «Бакалавр», по формированию через учебную деятельность личностных и профессиональных навыков и умений, а именно: владение навыками самостоятельной учебной и поисково-исследовательской работы; умение настойчиво и целенаправленно решать учебные и инженерные задачи; выбирать необходимые методы исследования и поиска, исходя из задач конкретного исследования; обрабатывать и анализировать полученные

результаты; использовать современные информационно-коммуникационные технологии для произведения расчетов.

5. Учебная деятельность студента, в которой он является одновременно субъектом, объектом и ее продуктом, имеет некоторые особенности, определенные следующим перечнем: цель учебной деятельности по ее проектированию и организации определяется преподавателем (тем, кто учит), продукт учебной деятельности студента – это не преобразование внешних объектов, а изменения в самом себе (преобразование самого себя) на основе личностно-деятельностного подхода; прямой продукт учебной деятельности представляет собой изменения студента, которые предусматривались целями учебной деятельности, а побочным продуктом становятся изменения студента, которые целями обучения не предусматривались. Прямой и побочный продукты совпадают по форме (изменения студента); продукт учебной деятельности студента не может быть отделен от субъекта, так как он является свойством самого субъекта (студента) [6, с. 7-9].

Таким образом, личностно-деятельностный подход мы считаем необходимым педагогическим условием использования компьютерно-ориентированного обучения в профессиональной подготовке будущих инженеров-горняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атанов Г.А. Обучение и искусственный интеллект, или Основы современной дидактики высшей школы / Г.А. Атанов, И.Н. Пустынникова. – Донецк: Изд-во ДОУ, 2002. – 504 с.
2. Гальперин П.Я. Основные результаты исследования по проблеме «Формирование умственных действий и понятий» / П.Я. Гальперин. – М.: Изд-во МГУ, 1965. – 52 с.
3. Гальперин П.Я. Психология мышления и учение о поэтапном формировании умственных действий / П.Я. Гальперин // Исследование мышления в советской психологи: сб. науч. трудов. – М.: Наука, 1966. – С. 236–278.
4. Зимняя И.А. Психология обучения иностранным языкам в школе / И.А. Зимняя. – М.: Просвещение, 1991. – 222 с.
5. Леонтьев А.Н. Деятельность, сознание, личность / А.Н. Леонтьев. – М.: Политиздат, 1975. – 304 с.
6. Методичні рекомендації до планування змісту навчання з навчальної дисципліни на основі побудови предметної моделі фахівця (адаптовані до вимог кредитно-модульної системи організації навчального процесу) / Уклад.: Є.С. Кленцев, Н.В. Міклашевич, І.А. Шкробова. – Макіївка: ДонНАБА, 2005. – 20 с.
7. Освітні технології: навч. метод. посіб. / О.М. Пєхота, А.З. Кіктенко, О.М. Любарська [та ін.]; за заг. ред. О. М. Пєхоти. – К.: А.С.К., 2001. – 256 с.

8. Основы деятельности тьютора в системе дистанционного образования: специализированный учебный курс / С.А. Щенников, А.Г. Теслинов, А.Г. Чернявская [и др.]. – 2-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2006. – 591 с.
9. Пєхота О.М. Особистісно-орієнтована освіта і технології / О.М. Пєхота // Неперервна професійна освіта: проблеми, пошуки, перспективи : Монографія / За ред. І.А. Зязюна. – Київ: Віпол, 2000. – С. 274–297.
10. Сериков В.В. Личностно-ориентированное образование / В.В. Сериков // Педагогика. – 1994. – № 5. – С. 21–25.
11. Стефаненко П.В. Дистанційне навчання у вищій школі: Монографія. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – 392 с.
12. Талызина Н.Ф. Педагогическая психология / Н.Ф. Талызина. – М.: Академия, 1999. – 207 с.
13. Ушинский К.Д. Человек как предмет воспитания // Собр. соч. в 10 т. Т. 8. / К.Д. Ушинський. – М.: АПН РСФСР, 1950. – 774 с.
14. Ягупов В.В. Педагогіка: навч. посібник / В.В. Ягупов. – К.: Либідь, 2002. – 560 с.
15. Ясвин В.А. Образовательная среда: от моделирования к проектированию / В.А. Ясвин – М.: Просвещение, 2000. – 35 с.

Ye.N. Kushnirenko

PERSONALITY-ACTIVE APPROACH AS ONE OF THE PEDAGOGICAL CONDITIONS OF THE COMPUTER-BASED USE IN FUTURE MINER ENGINEERS PROFECCIONAL TRAINING

Donetsk National Technical University

Abstract

The article deals with personality-active approach, which is one of the pedagogical conditions of the computer-based use in future miner engineers professional training. Based on the conducted theoretical and methodological analysis of personality-active approach it has been concluded that it is an important component in the future miner engineers professional training, as it improves the development of future specialists' personal and professional skills and abilities.

Keywords: professional education, pedagogical conditions, personality-active approach, miner engineers.

REFERENCES

[1] Atanov G.A. Education and artificial intelligence, or the modern didactics foundations of the higher school / G.A. Atanov, I.N. Pustynnikova. Donetsk: DOW Publ., 2002. 504 p. (rus.)

[2] Galperin P.Y. The main results of research on «Formation of mental actions and concepts». P.Y Halperin. Moscow, MGU, 1965. 52 p. (rus.)
[3] Galperin P.Y. Psychology of thinking and teaching about the gradual formation of mental actions. P.Y. Galperin. Study thinking in Soviet psychology: scientific works. Moscow, Science, 1966. Pp. 236 – 278. (rus.)
[4] Zimnyaya I.A. Psychology of teaching foreign languages in school. Moscow, Education, 1991. 222 p. (rus.)
[5] Leontiev A.N. Activity, consciousness, personality. Moscow, Politizdat, 1975. 304 p. (rus.)
[6] Methodical instructions for discipline training content planning based specialist modelling (adapted to the requirements of credit–modular system of educational process). Authors: E.S. Klentsev, N.V. Miklashevych, I.A. Shkrobova. Makeyevka: DonNACEA, 2005. 20 p. (ukr.)
[7] Educational Technology: teaching methodical guidances. O.M. Piechota, A.Z. Kiktenko, O.N. Lyubarskaya. Edited by. O. Piechota. Kyiv. A.S.K., 2001. 256 p. (ukr.)
[8] Fundamentals of tutor activities for Distance Education: specialized training course. S.A. Shennikov, A.G. Teslinov, A.G. Chernjavskaja. Moscow, Bustard, 2006. 591 p. (rus.)
[9] Piechota O.M. Personality-oriented education and technology. O.M. Piechota. Continuing professional education: problems, searches, prospects: Monograph. Ed. I.A. Zyazyun. Kyiv: Vipol, 2000. Pp. 274–297. (ukr.)
[10] Serikov V.V. Personality-oriented education. Pedagogy. 1994. № 5. Pp. 21–25. (rus.)
[11] Stefanenko P.V. Distance Learning in high school: monograph. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2002. 392 p.
[12] Talyzina N.F. Educational Psychology. – M.: Academy, 1999. 207 p. (ukr.)
[13] Ushinsky K.D. Person as the subject of education. Coll. Op. 10 t. Vol. 8. Moscow. APS RSFSR, 1950. 774 p. (rus.)
[14] Yagupov V.V. Pedagogics: training manual. Kyiv. Lybid, 2002. 560 p. (ukr.)
[15] Yasvin V.A. Educational environment: from modeling to design. Moscow. Education, 2000. 35 p. (rus.)

УДК 621.431.75; DOI 10.1872/MMF-2016-127

В.С. Нагорный, И.Б. Войнов, Д.Ю. Колодяжный

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ТОПЛИВО

Владимир Степанович Нагорный, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-60-88, E-mail: nagorny.vladim@yandex.ru

Игорь Борисович Войнов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-77-88, E-mail: voinov@compmechlab.com

Дмитрий Юрьевич Колодяжный, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552- 76-64, E-mail:kolod@mail.ru

Аннотация

В работе уточнена инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в диэлектрической жидкости (авиационном топливе) в резко неоднородном электрическом поле между электродами типа «игла – плоскость с отверстием». В результате проведенных численных расчетов электрогидродинамических (ЭГД) процессов на базе уточненной инжекционной модели было показано хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: авиационное топливо, электрический заряд, электрогидродинамика, численное моделирование

В настоящее время ведутся активные исследования по созданию высокоскоростных транспортных средств, обеспечению экологии и высокой энергоэффективности авиационных двигателей путем улучшение качества распыла топлива и сгорания керосино-воздушной смеси в авиационных двигателях. Нормы по уровню вредных выбросов от

авиационных двигателей постоянно ужесточаются [1-2]. При этом в качестве топлива используется авиационный керосин ТС-1.

Предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси, использовать электрогидродинамические (ЭГД) воздействия с использованием в цепях подачи топлива к форсунке соответствующим образом организованных электрических полей [3].

За последние годы достигнут значительный прогресс в исследовании электрогидродинамических процессов [4-16]. С развитием вычислительной техники основное внимание стало уделяться вопросам численного моделирования ЭГД процессов, что помогает предсказать результат эксперимента, экономя время и средства.

Объектом численного исследования в настоящей статье является возникновения униполярного потока ионов в топливе, в качестве которого используется авиационный керосин ТС-1, в резко неоднородном электрическом поле.

Полная система уравнений электрогидродинамики имеет вид:

$$\gamma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \gamma(\vec{v}, \nabla)\vec{v} = -\nabla \mathrm{p} + \eta \Delta \vec{v} - \rho \nabla \phi \ ; \quad (1)$$

$$\nabla \vec{v} = 0 \ ; \quad (2)$$

$$\Delta \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_+}{\partial t} + div(-D\nabla c_+ - z_+ bFc_+ \nabla \phi) = \mathrm{R} - \vec{v}\,\nabla c_+ ; \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_-}{\partial t} + div(-D\nabla c_- - z_- bFc_- \nabla \phi) = \mathrm{R} - \vec{v}\,\nabla c_- ; \quad (5)$$

$$\rho = \mathrm{F}(z_+ c_+ + z_- c_-). \quad (6)$$

Здесь ρ - объемная плотность электрического заряда, γ - плотность рабочей жидкости, v - скорость течения рабочей жидкости, p - давление, η – динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости, φ- потенциал электрического поля, ε - относительная диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, D - коэффициент диффузии, F - число Фарадея, b– подвижность ионов, R - коэффициент рекомбинации ионов, c_+,c_- концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно, z_-,z_+ -зарядовые числа.

С целью уточнения инжекционной модели образования в рабочей жидкости объемного униполярного заряда проводится численное моделирование ЭГД воздействия на топливо электрического заряда, инжектируемого в топливо в резко неоднородном поле у острия тонкой иглы, расположенной в цилиндрическом канале, между потенциальным игольчатым электродом и нейтральным электродом в виде плоскости с центральным отверстием. Данный объект моделирования представляет собой, в частности, статический электрогидродинамический

преобразователь (ЭГП), для которого имеются экспериментальные данные [4 -6].

Исходная геометрическая модель приведена на рисунке 1.

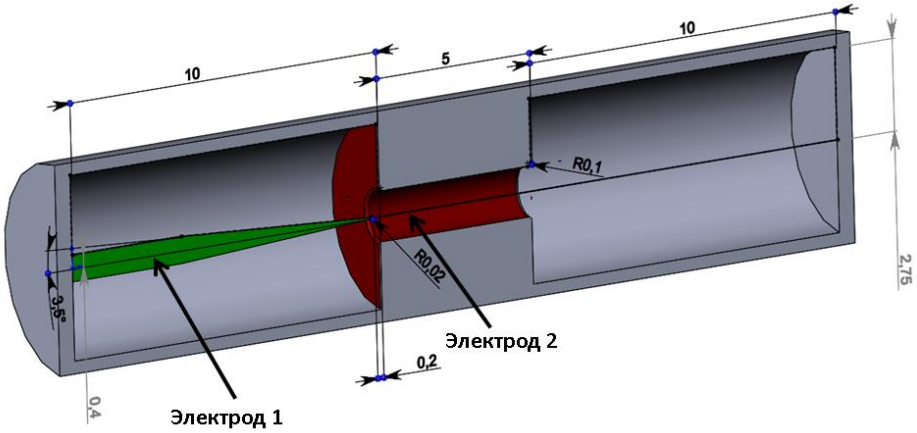


Рисунок 1 – К уточнению инжекционной модели образования униполярного электрического заряда в диэлектрической жидкости

Диаметр иглы d_u принимался равным 0.8 мм, диаметр отверстия в центральном электроде d = 1.5 мм. Канал полагается запертым с двух концов. На электрод *1* подается положительный потенциал U. Электрод *2* заземлен. В результате образования резко неоднородного электрического поля вблизи кончика иглы с большой электрической напряженностью у поверхности иглы возникают в жидкости положительно заряженные ионы (знака потенциала игольчатого электрода). Поток данных ионов под действием электрических сил движутся к противоположному электроду, приводя в движение окружающую диэлектрическую жидкость и создавая избыточное давление.

Для моделирования данного электрогидродинамического процесса была разработана расчетная численная модель. Для описания поведения диэлектрической жидкости использовались основные уравнения электрогидродинамики для описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в изотермической несжимаемой жидкости вида (1) – (6). В качестве инжекционной модели образования униполярных ионов у острия игольчатого электрода используется модель, в которой плотность потока ионов задаётся феноменологической функцией зависимости инжекции от локальной напряженности электрического поля, имеющая схожий вид с уравнением Фаулера-Нордгейма

$$\vec{j}_{inj} = A_0 \exp\left(-\frac{B_0}{E}\right) \qquad (7)$$

Однако, как показывают оценки, в рабочем диапазоне значений напряжённости электрического поля функция (7) практически линейна и может быть заменена следующим выражением:

$$\vec{j}_{inj} = max\left(AE - B, 0\right) \tag{8}$$

В формулах (7) и (8) A_0, B_0, A и B являются константами, которые необходимо определять из эксперимента.

Поскольку для рассматриваемой жидкости (керосин ТС-1) таких экспериментальных данных нет, параметры выбраны примерно соответствующие параметрам, где в качестве изучаемой диэлектрической жидкости рассматривалось трансформаторное масло.

Что касается граничного условия для зарядов на противоположном электроде типа «плоскость с отверстием», то считается, что все ионы, попадающие на плоский электрод, нейтрализуются, т.е. объемная плотность заряда равна нулю.

Свойства жидкости в расчетах соответствуют свойствам керосина типа ТС-1: плотность 780 кг/м^3, динамический коэффициент вязкости $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3}$ Па·с, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.2$. Подвижность ионов в жидкости бралась равной $b_i = 10^{-8}$ м^2/(В·с), ионный коэффициент диффузии $D = 2.5 \cdot 10^{-10}$ м^2/с.

Коэффициенты инжекции по формуле (8) принимались равными $A = 1.92 \cdot 10^{-9}$ Кл/(В·м·с), $B = 2.04 \cdot 10^{-4}$ Кл/(м^2·с). Данные коэффициенты получены в результате проведения многовариантных численных расчетов, позволившим определить характеристики, удовлетворяющие экспериментальным данным.

По всем границам, отвечающим непроницаемым стенкам ставится условие равенства нулю всех компонент вектора скорости жидкости.

Расчет проводился в пакете численного моделирования ANSYS/CFX на основе метода контрольных объемов. Расчеты проводились в квазиосесимметричной постановке.

Разработанная расчетная сетка для сечения канала приведена на рисунке 2.

Рисунок 2 – Расчетная сетка для уточнения инжекционной модели образования униполярного электрического заряда в диэлектрической жидкости

Для получения более корректного решения использовалась структурированная гексагональная сетка из ~100 000 ячеек в плоскости канала со сгущением в области кончика иглы. Задача решалась итерационным способом в нестационарной постановке. При этом течение предполагается ламинарным.

При моделировании исследовалось зависимость создаваемого избыточного давления в жидкости в правой части камеры от величины подаваемого напряжения на электроде *1*. Рассматривалось несколько значений *U*= 10 кВ, 15 кВ, 20 кВ и 25 кВ.

Результат полученных характеристик расчетных величин представлены в виде картин распределений объемного электрического заряда и давления в продольном сечении канала. Для наглядности распределения приведены с учетом отражения от горизонтальной плоскости.

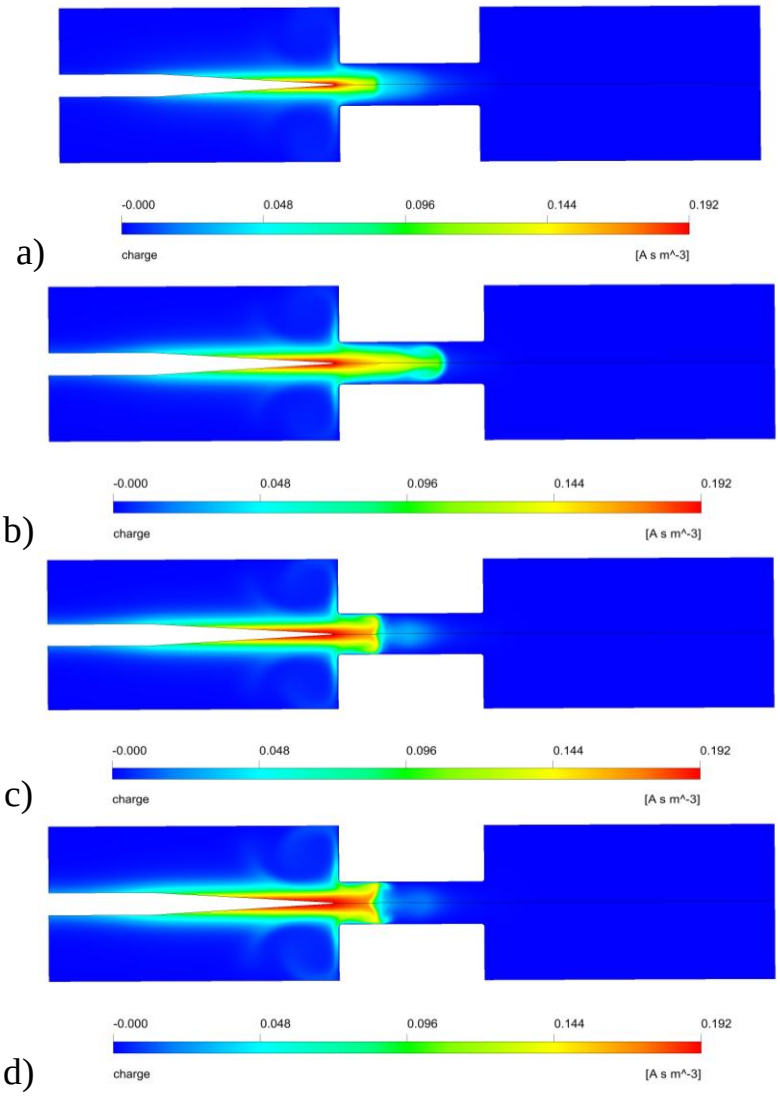


Рисунок 3 – Распределение объемного заряда в камере для различных подаваемых напряжений:

а) **U**=10 кВ, а) *U*=15 кВ, а) *U*=20 кВ, а) *U*=25 кВ,

Так, распределение объемного заряда в канале для нескольких значений напряжений представлено на рисунке 3 .

Распределение статического давления в канале для нескольких значений электрического напряжения на электродах представлены на рисунке 4.

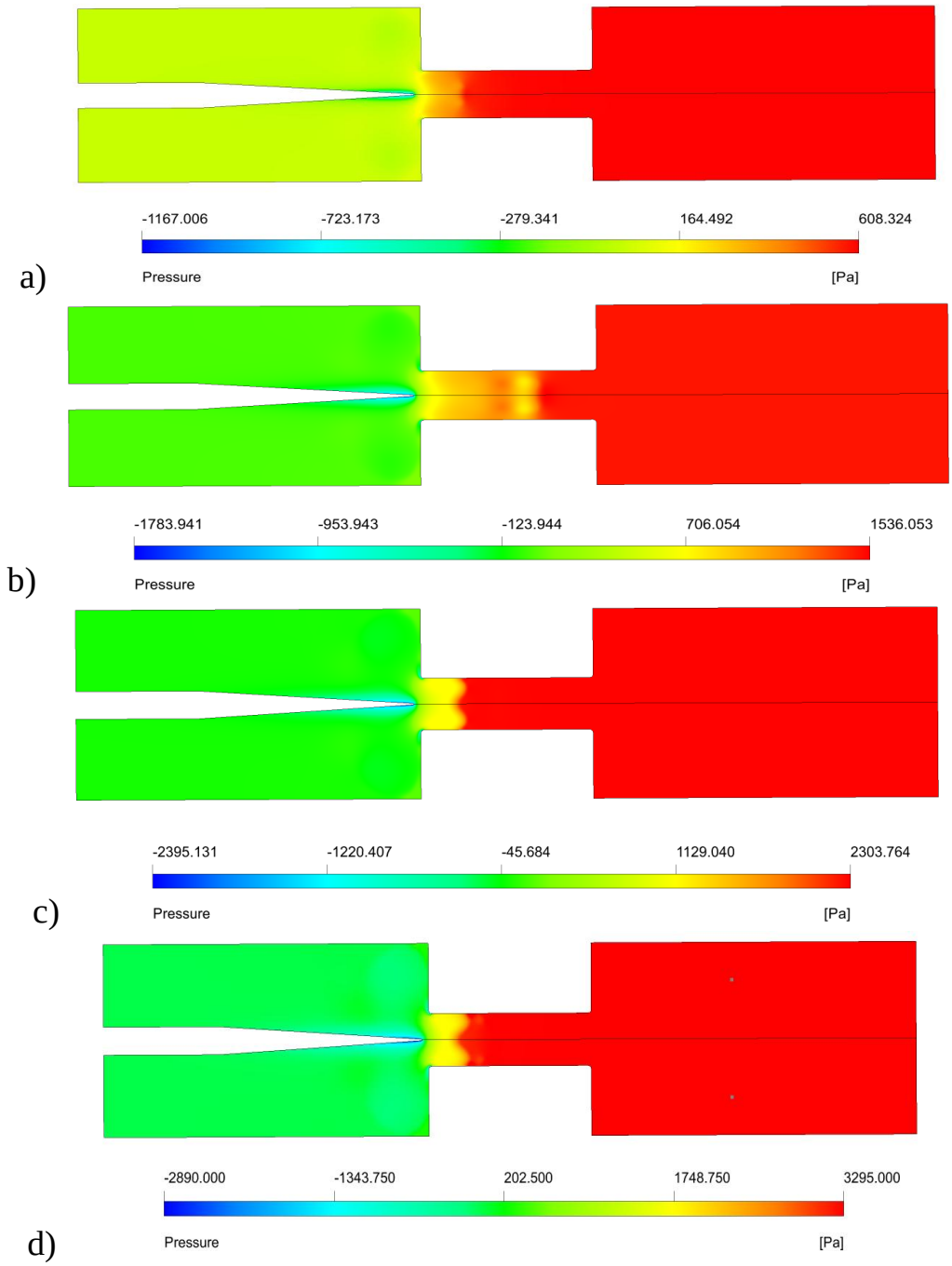


Рисунок 4 – Распределение давления в канале для различных подаваемых напряжений:
а) *U*=10 кВ, b) *U*=15 кВ, c) *U*=20 кВ, d) *U*=25 кВ.

Из представленных рисунков следует, что с увеличением подаваемого напряжения давление в камере увеличивается.

Экспериментально снятая зависимость создаваемого потоком униполярных ионов на выходе камеры давления от приложенного к электродам напряжения приведена на рисунке 5 (сплошная линия) [4,5].

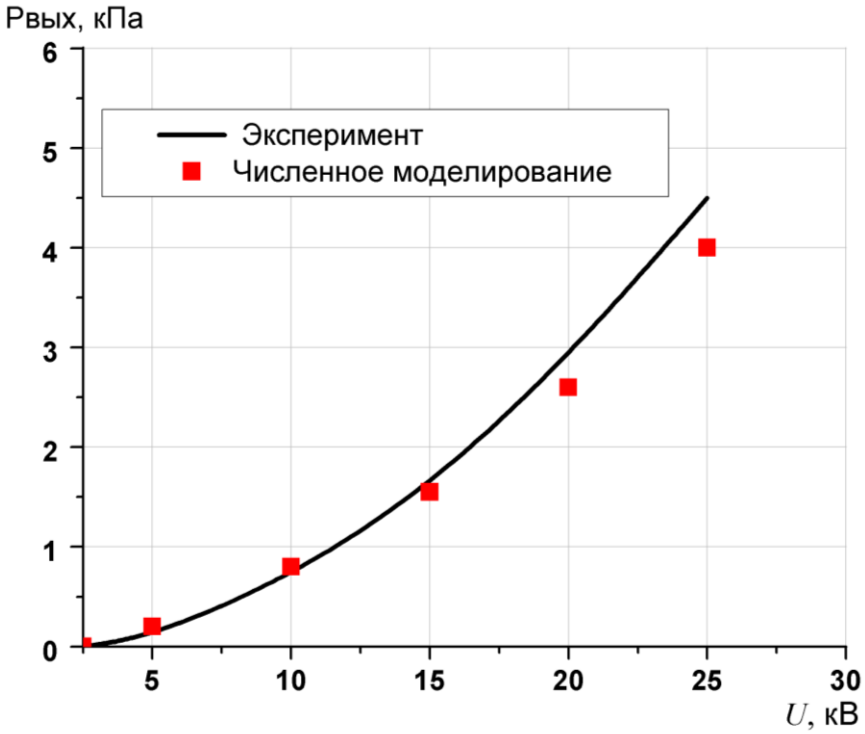


Рисунок 5 – Сравнительный анализ результатов эксперимента и численного расчета по уточненной инжекционной модели для создаваемого потоком униполярных ионов давления на выходе камеры

Как видно из рисунка 5 экспериментальная кривая и численный расчет по уточненной инжекционной модели имеют хорошее согласование.

Таким образом, можно говорить, что разработанная электрогидродинамическая модель, в том числе уточненная ижекционная модель образования униполярного электрического заряда в топливе у игольчатого электрода в резко неоднородном поде, дает положительные результаты и может быть принята для дальнейших исследований электрических устройств воздействия на топливо.

Данные прикладные научные исследования (ПНИ) проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор ПНИREMEFI57714X0087.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные правила, часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. – М.: ОАО «Авиаиздат» ,2003.– 84 с.
2. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к конвенции о Международной гражданской авиации. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. – Montreal, Quebec, Canada: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 118 с.
3. *Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный Экспериментальные исследования влияния электрического поля на параметры сгорания керосиновоздушной смеси* // Известия ВУЗов. Авиационная техника. – 2015. – № 4. – С. 73 – 76.
4. *Нагорный В.С.* Электрофлюидные преобразователи.– Л.: Судостроение, 1987. – 251 с.
5. *Нагорный В.С., Нагорный И.В.* Преобразователи малых давлений и перепадов давлений в электрический сигнал с электрогидродинамической компенсацией по давлению. СПб.: Изд–во Политехн. университета, 2011. – 223 с.
6. *Нагорный В.С.* Средства автоматики гидро – и пневмосистем.: СПб., М., Краснодар, Изд–во ЛАНЬ, 2014. – 448 с.
7. *V.S. Nagorniy. Engineering Principles of New Electrohydrodynamic Converters of Automatic Systems' Signals with Controlling of Space Charge's Value and Distribution in Dielectric Liquid Volumes, Flows and Jets* // 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5 - 9, 2005. Kitakyushu, Japan. – 2005. – P. 123 – 126.
8. *V.S. Nagorniy. Parameter of EHD-Interaction and efficiency Electrohydro(gas)dynamic Control of Flows and Jets of Dielectric Liquids and Gas* // International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 (ISEHD – 2014. June 23-26 2014. Japan, Okinawa. – 2014. – 5 p. Book of Abstracts. – P.49.
9. *В.А. Чирков, Ю.К. Стишков. Компьютерное моделирование ЭГД-течений в системе электродов игла-полость* // Журнал технической физики. – 2008. – Т.78. – №11.
10. *Ю.К. Стишков, И.А.Елагин. Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод-провод* // Журнал технической физики. –2005. –Т.75. – №.9.
11. *И.А. Ашихмин, Ю.К. Стишков. Влияние стенок из изолирующего материала на структуру электродинамических течений в канале* // Журнал технической физики. –2012. – Т.82. – №.9.
12. *N.C. Lima, M.A. d'Avila. Numerical simulation of electrohydrodynamic flows of Newtonian and viscoelastic droplets* // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.– 2014.
13. *G.Taylor. Disintegration of water drops in an electric field* // Proc. R. Soc. Lond.,Ser. A Math. Phys. Sci. – 1964.–№280. – P 383–397.
14. *G.Taylor. Disintegration of water drops in an electric field* // Proc. R. Soc. Lond.,Ser. A Math. Phys. Sci. – 1964.–№280. – P 383–397.

15. *Qingzhen Yang, Ben Q. Li, Yucheng Ding. 3D phase field modeling of electrohydrodynamic multiphase flows* // International Journal of Multiphase Flow. –2013. – №57.
16. *J.M. Lypez-Herrera, S. Popinet, M.A. Herrada. A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using volume-of-fluid* // Journal of computational Physics. – 2011. – №230.

V.S.Nagorniy, I.B.Vojnov, D.J.Kolodjazhnyj

NUMERICAL MODELLING OF ELECTROHYDRODYNAMICAL PROCESSES OF INFLUENCE OF SHARPLY NON-UNIFORM ELECTRIC FIELDS ON FUEL

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

In work the injection model of formation{education} of a unipolar electric charge in a dielectric liquid (aviation fuel) in sharply non-uniform electric field between electrodes such as « a needle - a plane with an aperture » is specified. As a result of the lead{carried out} numerical calculations electrohydrodynamical processes on the basis of the specified injection model good concurrence of results of calculation and experiment has been shown.

Key words: aviation fuel, an electric charge, electrohydrodynamics, numerical modelling

REFERENCES

[1] Авиационные правила, часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. – М.: ОАО «Авиаиздат» ,2003.– 84 с.
[2] Охрана окружающей среды. Приложение 16 к конвенции о Международной гражданской авиации. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. – Montreal, Quebec, Canada: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 118 с.
[3] *Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный Экспериментальные исследования влияния электрического поля на параметры сгорания керосиновоздушной смеси* // Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 73 – 76.
[4] *Нагорный В.С.* Электрофлюидные преобразователи.– Л.: Судостроение, 1987. – 251 с.
[5] *Нагорный В.С., Нагорный И.В.* Преобразователи малых давлений и перепадов давлений в электрический сигнал с электрогидродинамической

компенсацией по давлению. СПб.: Изд–во Политехн. университета, 2011. – 223 с.
[6] *Нагорный В.С.* Средства автоматики гидро – и пневмосистем.: СПб., М., Краснодар, Изд–во ЛАНЬ, 2014. – 448 с.
[7] *V.S. Nagorniy. Engineering Principles of New Electrohydrodynamic Converters of Automatic Systems' Signals with Controlling of Space Charge's Value and Distribution in Dielectric Liquid Volumes, Flows and Jets* // 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, June 5 - 9, 2005. Kitakyushu, Japan. – 2005. – P. 123 – 126.
[8] *V.S. Nagorniy. Parameter of EHD-Interaction and efficiency Electrohydro(gas)dynamic Control of Flows and Jets of Dielectric Liquids and Gas* // International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 (ISEHD – 2014. June 23-26 2014. Japan, Okinawa. – 2014. – 5 p. Book of Abstracts. – P.49.
[9] *В.А. Чирков, Ю.К. Стишков. Компьютерное моделирование ЭГД-течений в системе электродов игла-полость* // Журнал технической физики. – 2008. – Т.78. – №11.
[10] *Ю.К. Стишков, И.А.Елагин. Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод-провод* // Журнал технической физики. –2005. –Т.75. – №.9.
[11] *И.А. Ашихмин, Ю.К. Стишков. Влияние стенок из изолирующего материала на структуру электродинамических течений в канале* // Журнал технической физики. –2012. – Т.82. – №.9.
[12] *N.C. Lima, M.A. d'Avila. Numerical simulation of electrohydrodynamic flows of Newtonian and viscoelastic droplets* // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.– 2014.
[13] *G.Taylor. Disintegration of water drops in an electric field* // Proc. R. Soc. Lond.,Ser. A Math. Phys. Sci. – 1964.–№280. – P 383–397.
[14] *G.Taylor. Disintegration of water drops in an electric field* // Proc. R. Soc. Lond.,Ser. A Math. Phys. Sci. – 1964.–№280. – P 383–397.
[15] *Qingzhen Yang, Ben Q. Li, Yucheng Ding. 3D phase field modeling of electrohydrodynamic multiphase flows* // International Journal of Multiphase Flow. –2013. – №57.
[16] *J.M. Lypez-Herrera, S. Popinet, M.A. Herrada. A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using volume-of-fluid* // Journal of computational Physics. 2011. №230.

УДК 658.562.3; DOI 10.1872/MMF-2016-128

М. И. Седлер[1], Д. А. Носова[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТНЫХ БАЗ (ЭКБ) ПУТЕМ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

[1]Мария Ильинична Седлер,
старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru

[2]Дарья Андреевна Носова,
Студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: daria.no@bk.ru

Аннотация

Данная работа посвящена повышению качества регистрации результатов испытаний, проводимых в лаборатории предприятия ООО «ПетроИнТрейд». В результате произведенного анализа была поставлена задача автоматизировать процесс. В настоящее время создано многопользовательское автоматизированное приложение, внедрение которого обеспечит сокращение временных затрат и повысит качество регистрации результатов испытаний.

Ключевые слова: процесс регистрации результатов испытаний, карта регистрации результатов испытаний, автоматизированное приложение, база данных.

Введение

Работа выполнена для испытательной лаборатории предприятия ООО «ПетроИнТрейд», главным направлением деятельности которого являются высоконадежные комплексные поставки ЭКБ для нужд военной промышленности.

Испытательная лаборатория была создана в 2008 году. На сегодняшний день в лаборатории проводятся сертификационные испытания ЭКБ отечественного и иностранного производства на соответствие требованиям отечественных и международных стандартов [7].

Сертификационные испытания (СИ) – это этапы подтверждения качества и безопасности продукции, которые необходимы для проведения декларирования о соответствии, добровольной и обязательной сертификации [8].

В настоящее время процесс регистрации результатов испытаний ЭКБ в испытательной лаборатории осуществляется вручную, вследствие чего возникает необходимость несколько раз вводить одну и ту же информацию при заполнении документов. При существующей системе регистрации результатов возникают трудности учета брака.

Анализ существующего процесса регистрации результатов испытаний

Испытания ЭКБ проводятся в соответствии с договорами, заключаемыми между испытательной лабораторией и организацией-заявителем работ [2]. В договоре заказчик определяет количество ЭКБ из партии, которое необходимо испытать, и указывает, какие именно испытания следует провести.

Заместитель руководителя испытательной лаборатории назначает ответственного исполнителя, который разрабатывает шаблон карты регистрации результатов испытаний (КРРИ) для поступившей на испытание партии ЭКБ в случае его отсутствия. Ответственный исполнитель распределяет работу между исполнителями в соответствии с их квалификацией, требуемыми сроками выполнения работ и объемом испытаний, определенным в КРРИ. Данные о результатах испытаний заносятся в шаблон. Каждая КРРИ регистрируется в «Журнале регистрации карт» и ей присваивается индивидуальный порядковый номер. При заполнении КРРИ исполнитель ставит подпись, фамилию, дату окончания проверки. Результаты проведенных испытаний заносятся в таблицу MS Excel [1].

Схема выполнения заказа представлена на рис. 1.

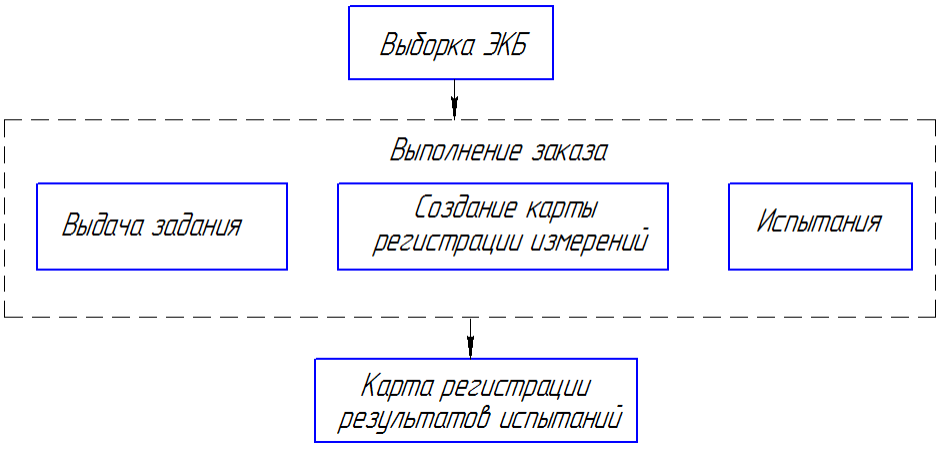


Рисунок 1 – Схема выполнения заказа

В качестве объекта исследования были выбраны ЭКБ - полупроводники, испытания которых проводятся в соответствии с методами, определенными ГОСТ РВ 20.57.416 [3]. Регистрация результатов проводимых испытаний осуществляется как вручную, так и автоматически в зависимости от контролируемых параметров. В лаборатории имеется тестер полупроводниковых приборов FORMULA TT (рис. 2), обеспечивающий проверку статических параметров полупроводниковых приборов и снятие вольт-амперных характеристик [9].

Рисунок 2 – Тестер FORMULA TT

Полное документирование и сбор данных по результатам и параметрам измерений осуществляется автоматически через USB-порт компьютера в документ MS Word (рис. 3). Данные включают сведения о заводском номере средства измерений, режимах проверки и результатах измерений по каждому тесту каждого объекта контроля.

Результат измерения параметров ЭРИ.

Дата измерения: 14.09.2015

Тип ЭРИ: bas21.215

№ теста	Код в сборке	Метод измерения	Ниж. предел	Верх. предел	Ед. изм.	Результат измерения	Брак Гр.годн.
1	0	Iобр npn	0	100	нА	7,233 нА	1
2	0	Iобр npn	0	100	нА	68,466 нА	1
3	0	Uпрям npn	0	1	В	0,713 В	1
4	0	Uпрям npn	0	1,250	В	1,178 В	1

Рисунок 3 – Результаты измерений в документе MS Word

После проведения измерений исполнитель вручную вносит результаты в файл «Карта регистрации результатов измерений.xlsx» (Табл. 1).

Таблица1. Фрагмент «Карты регистрации результатов измерений №102 »

Наименование	Результаты измерений СИ 4-12				
№ ЭКБ	1	2	3	4	5
Iобр npn	7,233 нА	68,466 нА			
Uпрям npn	0,713 В	1,178 В			
Годн/Брак (+/-)	+	+			

Для формирования документа «Карта регистрации результатов испытаний.docx» исполнителю необходимо ввести данные о годности ЭКБ (Табл. 2).

Таблица 2. Фрагмент «Карты регистрации результатов испытаний №102»

Шифр испыт	Наименование испытания	К-во ЭКБ		Дата оконч. испыт.	Исполнитель	
		Год.	Брак		Подпись	Ф.И.О.
СИ 1-6	Проведение параметрического и функционального контроля изделия в НКУ	2	0			
СИ 2-7	Электротермотренировка (метод 800-1 по ОСТ 11 073.013), 72 часа Т=+85ºС	2	0			

Схема существующего процесса регистрации результатов испытаний ЭКБ представлена на рисунке 4.

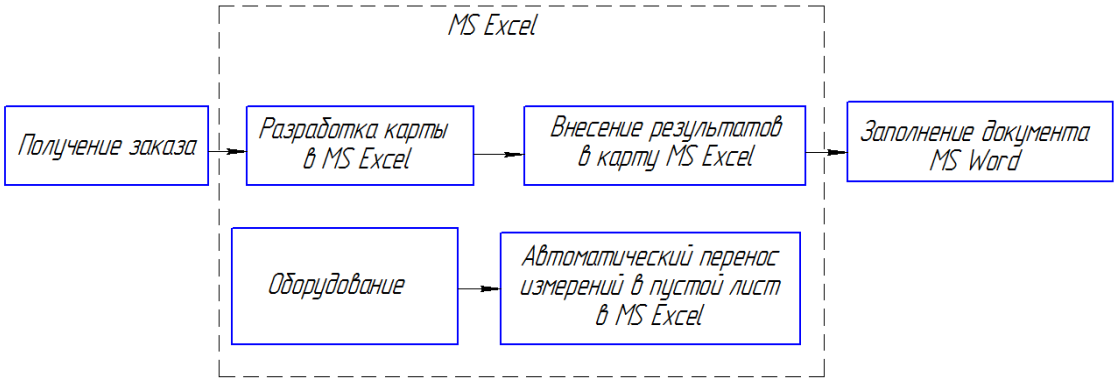


Рисунок 4 –Схема существующего процесса регистрации результатов испытаний

Создание базы данных

В начале работы была разработана база данных MS Access на основе datasheet каждого поступающего на испытания ЭКБ [5]. Datasheet –

это официальный документ производителя ЭКБ, в котором приводится описание, параметры и характеристики изделия [10], которая будет храниться на сервере. В базе данных созданы справочные таблицы:

– для каждой группы ЭКБ таблицы с характеристиками контролируемых параметров;

– перечень измерительного оборудования, необходимого для проведения испытаний;

– перечень испытательного оборудования, необходимого для проведения испытаний.

Для регистрации результатов измерений для каждой группы ЭКБ создана своя таблица. Например, для резисторов в таблицу заносятся результаты измерения сопротивлений (рис. 5).

Резисторы

Код	Номер испытания	Наименование ЭРИ	ФИО	R, Ом	Номер карты
734	СИ 1-6	Резисторы R1206 8,2 kOhm 5%	Носова Д.А.	7,55	121
735	СИ 1-6	Резисторы R1206 8,2 kOhm 5%	Носова Д.А.	7,88	121
736	СИ 1-6	Резисторы R1206 8,2 kOhm 5%	Носова Д.А.	7,99	121
737	СИ 1-6	Резисторы R1206 8,2 kOhm 5%	Носова Д.А.	7,6	121
738	СИ 1-6	Резисторы R1206 8,2 kOhm 5%	Носова Д.А.	8,97	121
727	СИ 1-6	Резисторы R2010 0 Ohm	Носова Д.А.	66	555

Рисунок 5 – Таблица базы данных «Резисторы»

Блок-схема автоматизированного приложения

Автоматизированное приложение представляет собой клиент-серверную систему, разработанную в среде программирования MS Visual Studio C# [6].

Процесс регистрации результатов испытаний осуществляется следующим образом:

- данные показаний приборов либо заносятся вручную в таблицу регистрации результатов измерений, либо поступают автоматически в USB порт компьютера и автоматически вносятся в документ MS Word, из которого переносятся в таблицу базы данных;

- осуществляется обработка введенных данных путем сравнения полученных результатов с заданными в справочных таблицах характеристиками;

- результаты измерений и обработки записываются в шаблоны КРРИ - файлы MS Excel и MS Word.

Блок-схема автоматизированного приложения представлена на рисунке 6.

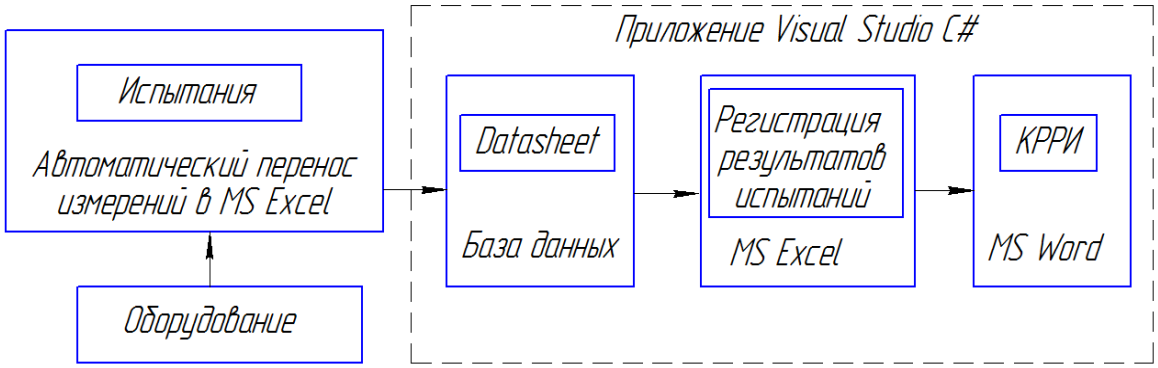


Рисунок 6 – Блок-схема автоматизированного приложения

Создание программного модуля автоматизированного приложения

Программный модуль автоматизированного приложения состоит из пяти форм: «Авторизация», «Компоненты», «Регистрация результатов испытаний», «Регистрация результатов испытаний - Formula TT», «Добавление в БД».

Схема работы автоматизированного приложения приведена на рисунке 7.

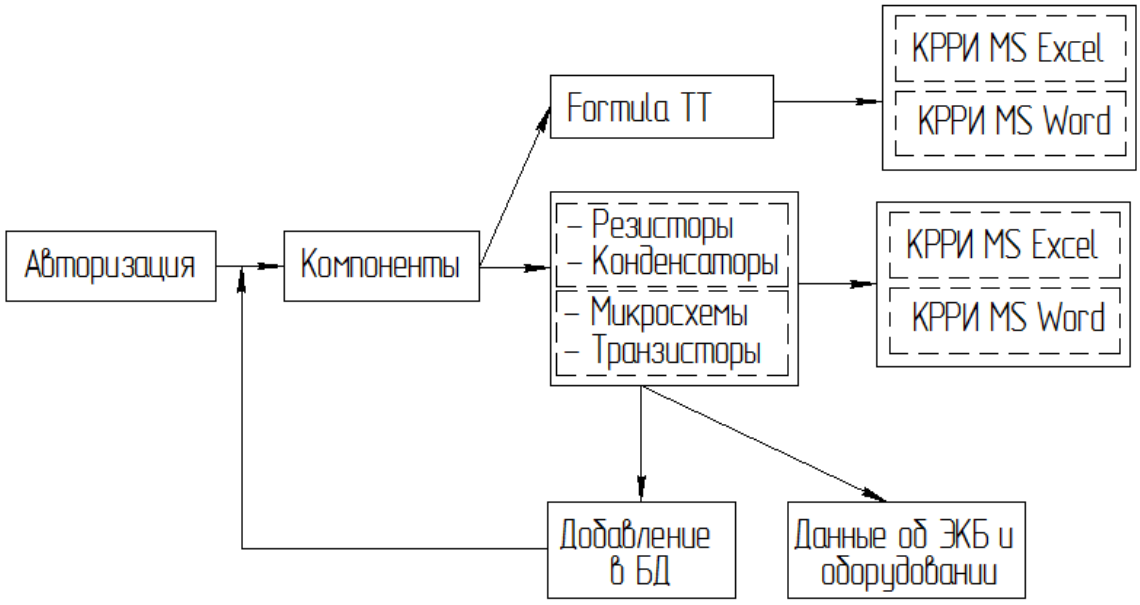


Рисунок 7 – Схема работы автоматизированного приложения

Доступ к приложению осуществляется по паролю. При входе в систему исполнители, в зависимости от введенного пароля, попадают на доступные для них формы, предназначенные для просмотра справочников и ввода результатов испытаний. Форма авторизации представлена на рисунке 8.

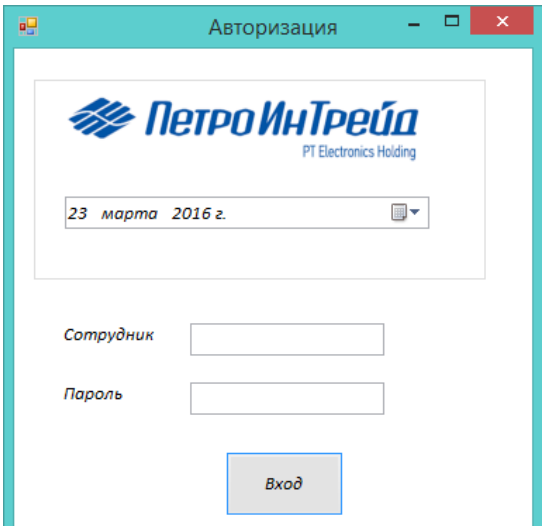


Рисунок 8 – Форма для авторизации пользователей

На следующей форме «Компоненты» исполнитель должен выбрать, будет ли в процессе испытаний применяться тестер FORMULA TT, группу испытываемых компонентов и испытание (рис.9).

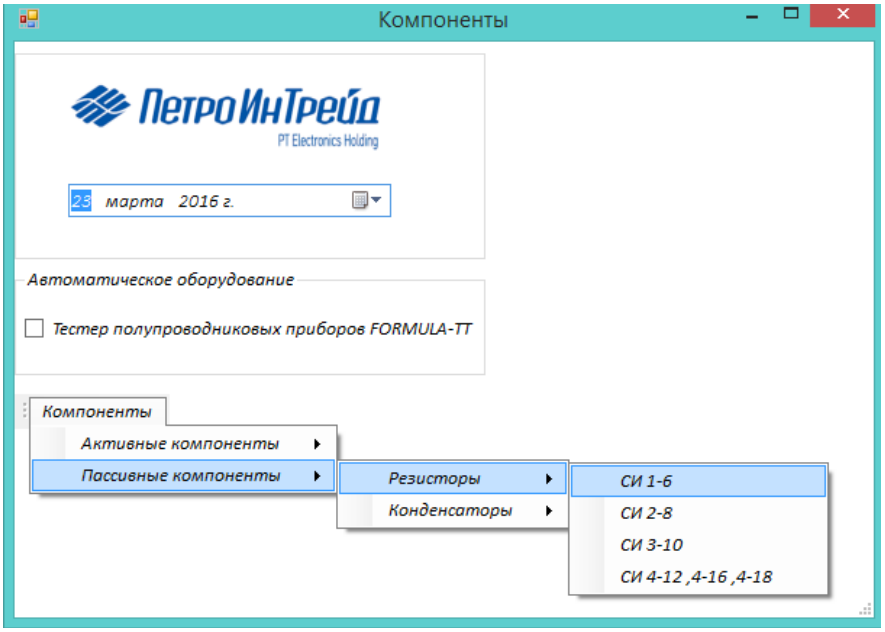


Рисунок 9 – Форма «Компоненты»

Далее осуществляется переход на форму регистрации результатов испытаний. Исполнитель выбирает из раскрывающегося списка ЭКБ и, в случае его отсутствия в таблице базы данных, по кнопке «Добавить в БД» переходит на форму ввода характеристик контролируемых параметров ЭКБ (рис. 10).

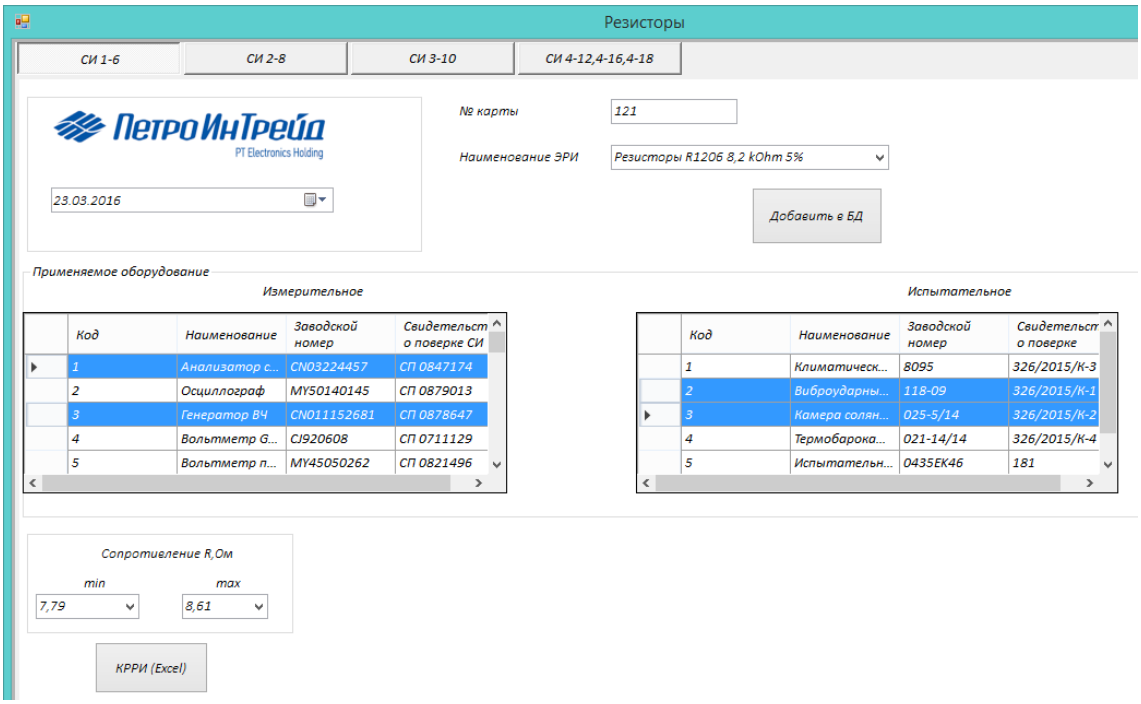


Рисунок 10 – Форма «Резисторы»

После этого исполнитель выбирает измерительное и испытательное оборудование и нажимает на кнопку «КРРИ Excel» для записи выбранных данных в шаблон КРРИ (рис. 11).

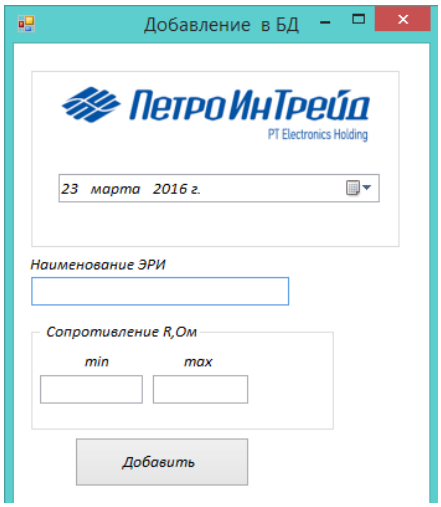


Рисунок 10 – Форма «Добавление в БД»

Далее исполнитель заносит результаты измерений в поля, после чего осуществляет перенос и обработку введенных данных в КРРИ - MS Excel и MS Word путем нажатия на соответствующую кнопку (рис. 12).

Пример заполнения документов MS Excel и MS Word представлен на рисунках 13 и 14 соответственно.

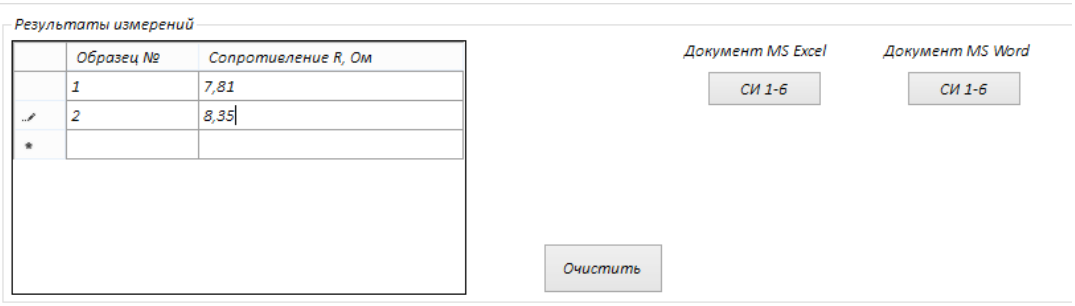


Рисунок 12 – Регистрация результатов измерений

Наименование	Результаты измерений					
№ ЭРИ	1	2	3	4	5	6
R,Ом	7,81	8,35				
Годн/Брак (+/-)	+	+				

Рисунок 13 – Фрагмент документа MS Excel

СИ 1-6	Проведение параметрического и функционального контроля изделия в НКУ	2	0	23.03.16		Носова Д.А.
СИ 2-7	Электротермотренировка (метод 800-1 по ОСТ 11 073.013), 72 часа Т=+85°С					
СИ 2-8	Проведение параметрического и функционального контроля в НКУ					

Рисунок 14 – Фрагмент документа MS Word

Если регистрация результатов испытаний осуществляется с помощью тестера FORMULA TT, исполнитель переходит на форму автоматического ввода и обработки результатов испытаний, на которой для заполнения всех необходимых документов КРРИ в MS Excel и MS Word лишь требуется ввести номер карты и нажать на соответствующие кнопки (рис. 15).

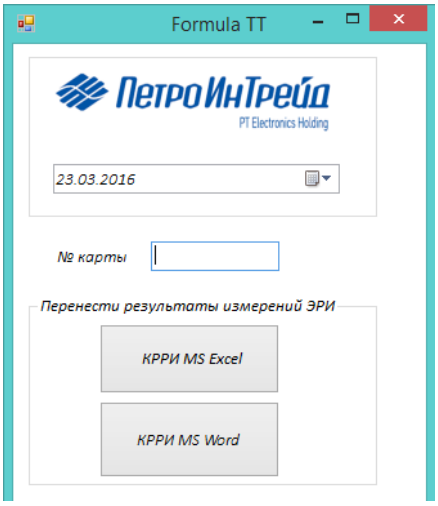


Рисунок 15 – Форма для автоматической регистрации результатов испытаний

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение автоматизированного приложения повысит качество регистрации результатов испытаний и сократит время работы сотрудников лаборатории.
2. Инженер по качеству сможет проводить статистический анализ результатов испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИН ПИТ.90.11.01.2012 Инструкция о порядке проведения испытаний электронной компонентной базы отечественного производства
2. ГОСТ Р 56648-2015 «База электронная компонентная для ракетно-космической техники. Входной контроль и дополнительные испытания. Общие положения»
3. ГОСТ РВ 20.57.416-98 «Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний»
4. М.И.Седлер, Е.И.Поплевина. Улучшение процесса управления внешней нормативной документацией корпорации “тира”. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – с 1003-1012.
5. Кошелев В.Е. Access 2003.: практическое руководство – М.: ООО «Бином-Пресс», 2005. – 464 с.
6. Эндрю Троелсен, « C# 4 и платформа .NET для профессионалов» - 2010. – 346 с.
7. Д.А. Носова, М.И. Седлер. Повышение качества регистрации результатов испытаний полупроводников путем создания автоматизированного приложения. Неделя науки СПбГПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Часть 1.-СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015.-с. 30-33.
8. [Электронный ресурс] // Проведение сертификационных испытаний URL: http://megregiontest.ru//provedeniya-sertifikatsionnh-isptaniy/(дата обращения 04.03.16)
9. [Электронный ресурс] // Автоматизированные средства измерений электронных компонентов URL: http://www.form.ru/index.php/ftt.html (дата обращения 05.04.16)
10. [Электронный ресурс] // Словарь терминов URL: http://monitorlab.ru/gloss.shtml (дата обращения 10.04.16)

M. I. Sedler, D. A. Nosova

IMPROVING THE QUALITY OF TEST RESULTS REGISTRATION OF THE ELECTRONIC COMPONENT BASES (ECB) BY CREATING THE AUTOMATED APPLICATION

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This work is devoted to improving the quality of test results registration, carried out in the laboratory of "PetroInTrade" LLC (OOO "PetroInTrade"). As a result of the analysis was a task to automate the process. At the moment automated multiuser application is created, which will be able to reduce wastes time and to increase the quality of test results registration.

Key words: the process of recording of the test results, automated application, database, the card of recording of the test results.

REFERENCES

[1] IN PIT.90.11.01.2012 «Instruction on the Procedures testing of electronic components of domestic production». (rus.)
[2] GOST R 56648-2015 «Base electronic components for rocket and space technology. Incoming inspection of and additional tests. General provisions» . (rus.)
[3] GOST RV 20.57.416-98 « Complex quality control system. Electronic products, quantum electronics and electrical engineering for military purposes. Test methods» . (rus.)
[4] M. I. Sadler, E. I. Poplevina. Improving the quality of the management process of normative documents of the corporation “TV and Radio”. Modern mechanical engineering. Science and education: materials of 4th International scientific-practical conference. / under the editorship of M. M. Radkevich And A. N. Evgrafova. – SPb.: Publishing house of the Polytechnical Institute. University press, 2014. Pp. 1003-1012.
[5] Koshelev V.E. Access 2003 . practical manual. Moscow. OOO "Binom-Press", 2005. 464 p. (rus.)
[6] Andrew Troelsen, "C # and the .NET 4 platform for professionals" 2010. 346 p. (rus.)
[7] D. A. Nosova, M. I. Sedler Improving the quality of test the results registration of the semiconductors by creating the automated application. Science Week SPbSPU: Materials Science Forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. Part 1 SPb .: Publishing house of the Polytechnic. Univ 2015. Pp. 30-33. (rus.)

[8] [Electronic resource] //Certification tests URL: http://megregiontest.ru//provedeniya-sertifikatsionnh-isptaniy/ (date of reference 04.03.16) . (rus.)
[9] [Electronic resource] // Automated means of measuring electronic components URL: http://www.form.ru/index.php/ftt.html (date of reference 05.04.16) . (rus.)
[10] [Electronic resource] // Glossary of terms URL: http://monitorlab.ru/gloss.shtml (date of reference 10.04.16) . (rus.)

УДК: 658.562.42; DOI 10.1872/MMF-2016-129

М.И. Седлер[1], С.В. Пичкарь[2]

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТНЫХ БАЗ (ЭКБ)

[1]Мария Ильинична Седлер,
старший преподаватель Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru

[2]Светлана Викторовна Пичкарь,
студент бакалавр Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: s_pichkar@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена повышению качества регистрации результатов входного контроля электронных компонентных баз, осуществляемого в испытательной лаборатории компании ООО «ПетроИнТрейд». В процессе выполнения работы изучен существующий процесс входного контроля, создана схема процедуры входного контроля, сформирована структура таблиц базы данных, разработано клиент-серверное приложение, обеспечивающее формирование карт результатов контроля.

Ключевые слова: процесс входного контроля, автоматизированное приложение, база данных, клиент-серверная система, модель процесса.

Введение

Работа посвящена проблеме повышения качества процесса входного контроля (ВК) и усовершенствованию документооборота испытательной лаборатории компании ООО «ПетроИнТрейд». Испытательная лаборатория (ИЛ) создана в 2008 г. для обеспечения качества поставок ЭКБ.

С момента образования в ИЛ проводятся испытания электрорадиоизделий (ЭРИ) импортного и отечественного производства на соответствие требованиям ГОСТов и ОСТов (отраслевых стандартов) и международных стандартов (MIL). ИЛ оснащена новейшим испытательным и контрольно-измерительным оборудованием [10]. Тема

работы является актуальной, поскольку на данный момент в ИЛ система регистрации результатов ВК и заполнение карт результатов контроля осуществляется вручную.

Анализ существующего процесса входного контроля

Для решения поставленной проблемы был произведен анализ существующего процесса ВК.

В ИЛ все поступающие заказы проходят через Службу ВК, сотрудники которой регистрируют их в программе 1С-склад, вручную заполняют шаблон карт входного контроля – файлы MS Word и сохраняют файлы в общей папке. В ИЛ существует инструкция [1], описывающая организацию проведения ВК ЭРИ.

Процесс ВК осуществляется следующим образом. Сотрудники Службы ВК получают партию ЭКБ с сопроводительной документацией, проверяют ее комплектность. Далее осуществляют отбор образцов в соответствии с указанным в договоре количеством. При этом выборка формируется на основании требований ГОСТ (ГОСТ 18321-73, ПР 50.3002-95) [3]. Затем данные о поступлениях заносятся в систему 1С-склад, в которой назначаются номера ячеек склада для хранения поступивших партий и номера ячеек склада для отдельного хранения выборок.

Далее сотрудники ВК проверяют ЭКБ выборки на соответствие сопроводительной документации: проводят сравнение маркировки. После этого проводится визуальный осмотр упаковок ЭКБ. Если при осмотре находят повреждения, их фотографируют и сохраняют файлы для отчета перед заказчиком. Полученные результаты вручную фиксируются в специальном документе MS Word - акте отбора.

Следующий этап ВК состоит из проверки внешнего вида ЭКБ (микроскоп), измерения массы (электронные весы), измерения габаритных, присоединительных и установочных размеров ЭКБ (штангенциркуль). Все полученные результаты записываются в документы MS Word - «Карту регистрации результатов ВК», и «Карту регистрации результатов испытаний ЭРИ». «Карта регистрации результатов испытаний ЭРИ» вместе с выборкой в специальных контейнерах передается ответственному по ИЛ. Факт передачи фиксируется в журнале, который ведется вручную [6].

В соответствии с процедурой ВК была разработана модель существующего процесса ВК, представленная на рис. 1.

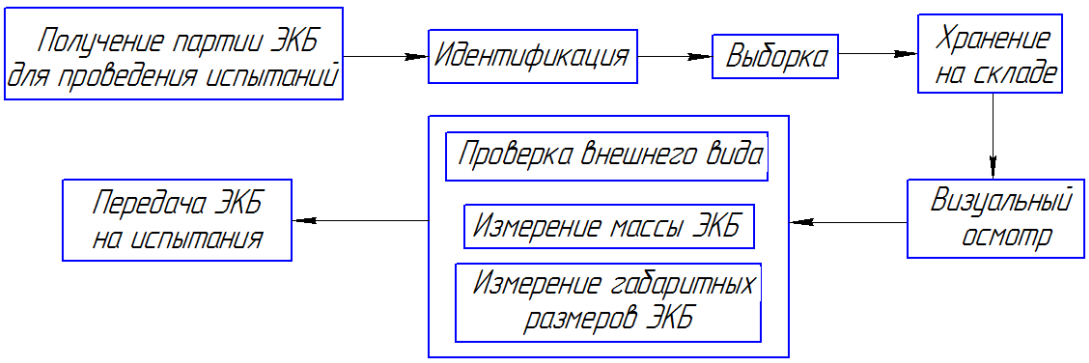


Рисунок 1 – Этапы входного контроля

Из-за ручного заполнения всех требуемых в процессе ВК документов возникает необходимость по нескольку раз вводить одну и ту же информацию, что существенно удлиняет процесс. Также при сложившейся системе ведения документации и регистрации результатов ВК возникают сложности, связанные с поиском необходимой информации.

Создание базы данных

На первом этапе работы в соответствии с процедурой ВК была создана таблица базы данных на основе datasheet каждого поступающего ЭКБ.

Datasheet – официальный документ производителя ЭКБ, в котором приводится описание, параметры, характеристики изделия и т.д.[11].

В таблице базы данных «Входной контроль» есть поля для обязательного заполнения: «Наименование ТС», «Наименование ЭРИ», «Производитель», «Потребитель», а также столбцы для ввода характеристик ЭКБ из Datasheet.

Далее была создана таблица базы данных для регистрации результатов испытаний ВК. Таблица «Регистрация результатов» включает следующие поля: «Код», «Номер испытания», «Наименование ЭРИ» и далее столбцы с измеряемыми параметрами.

Структура автоматизированного приложения

Автоматизированное приложение представляет собой клиент-серверную систему, разработанную в среде программирования MS Visual Studio C#, обеспечивающую выполнение следующих процессов:

- ввод данных ВК и регистрацию полученных в ходе испытаний измерений;
- возможность добавления новых ЭКБ и их характеристик в таблицу базы данных «Входной контроль»;
- автоматическое формирование документов MS Word: «Акт отбора», «Карта регистрации результатов ВК» и «Карта регистрации результатов

испытаний ЭРИ» и документа в MS Excel – «Карта регистрации результатов измерений».

Блок-схема приложения приведена на рис. 2.

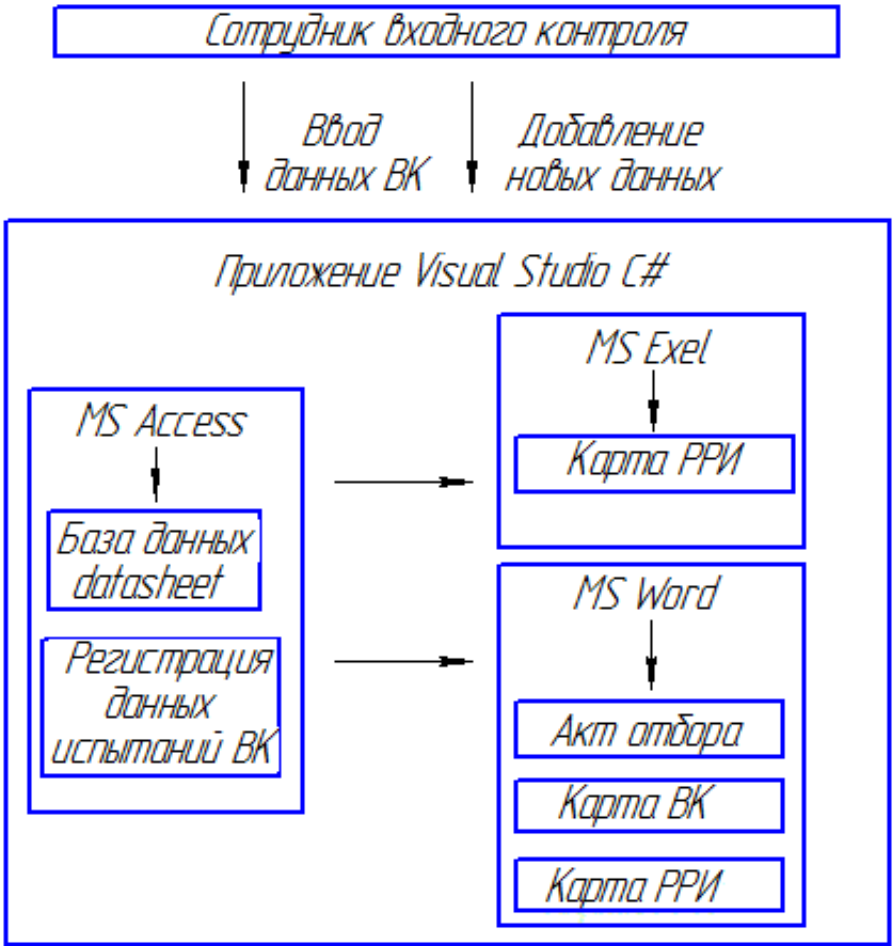


Рисунок 2 – Блок – схема автоматизированного приложения

Разработка программного модуля

В клиент-серверное приложение входят 4 формы: «Авторизация пользователя», «Выбор компонента», «Реализация процесса контроля», «Регистрация нового компонента в datasheet». Схема работы приложения изображена на рис. 3.

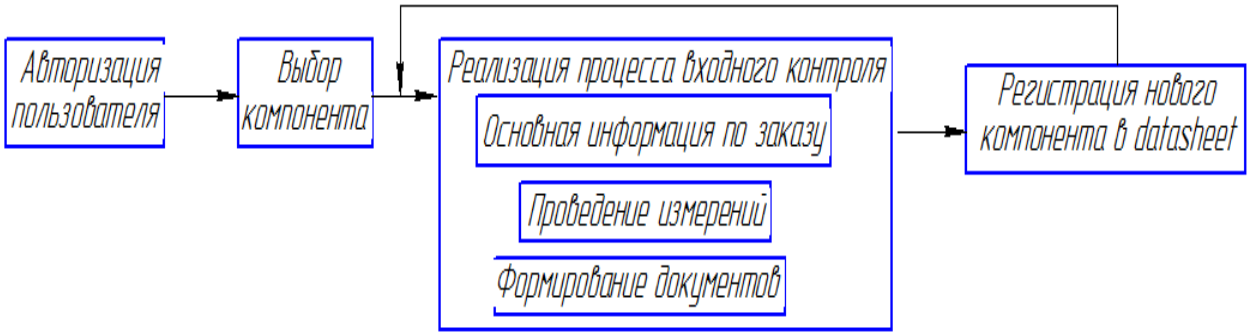


Рисунок 3 – Схема работы автоматизированного приложения

Поскольку в службе ВК работают несколько сотрудников, доступ к приложению осуществляется по паролю. Это необходимо для автоматического ввода личных данных сотрудника в карты регистрации (рис. 4).

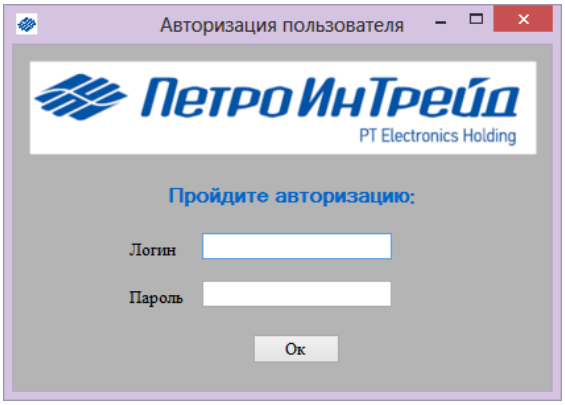


Рисунок 4 – Форма для авторизации пользователей

После нажатия на кнопку «Ок» открывается форма «Выбор компонента» (рис. 5).

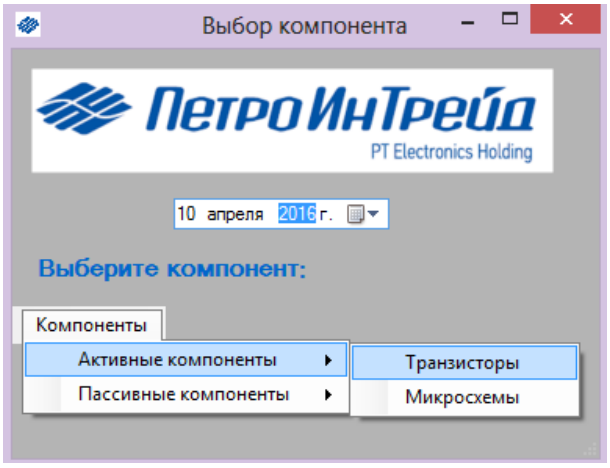


Рисунок 5 – Форма выбора компонента

На форме необходимо выбрать вкладку с названием компонента, который указан в договоре заказчика. Сотрудник выбирает необходимый компонент, чтобы указать директорию, в которой автоматически создается папка с именем номера договора, предназначенная для сохранения формируемых в процессе входного контроля документов.

После выбора соответствующей вкладки открывается главная форма приложения - «Реализация процесса входного контроля», которую условно можно разделить на три блока: «Основная информация по заказу», «Проведение измерений» и «Формирование документов» (рис. 6).

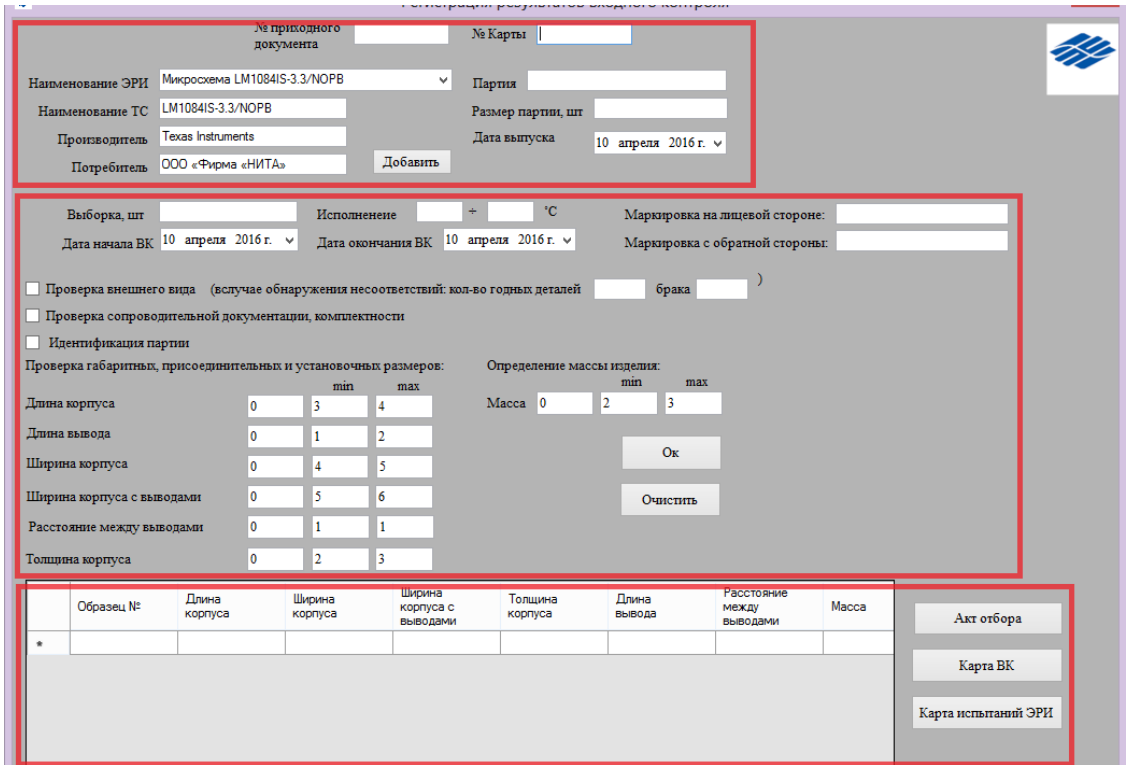


Рисунок 6 – Форма реализации процесса входного контроля

В первом блоке необходимо внести «№ приходного документа», указанный в договоре, и выданный по списку «№ карты».

После этого из раскрывающегося списка нужно выбрать наименование ЭРИ компонента, где в соответствии с его характеристиками автоматически заполнятся ячейки «Наименование ТС», «Производитель», «Потребитель», а также ячейки минимальных и максимальных значений (рис. 7).

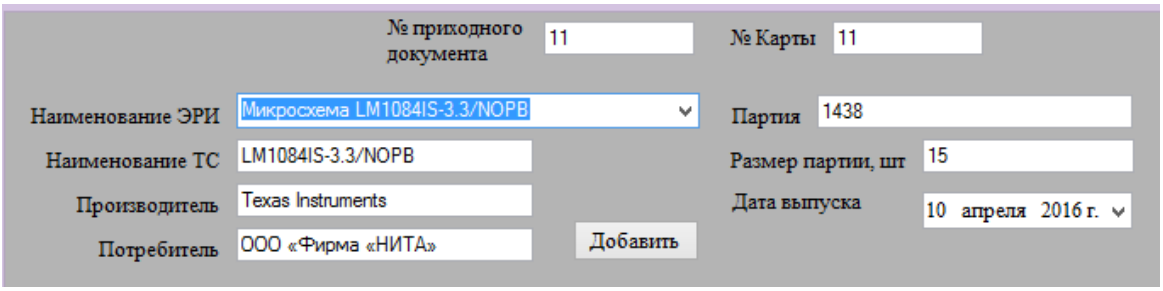


Рисунок 7– Первый блок главной формы

Если указанного в договоре ЭКБ нет в списке приложения, его можно добавить в запись таблицы базы данных самостоятельно с помощью кнопки «Добавить». После нажатия на кнопку появится форма «Добавление в базу данных datasheet» (рис. 8).

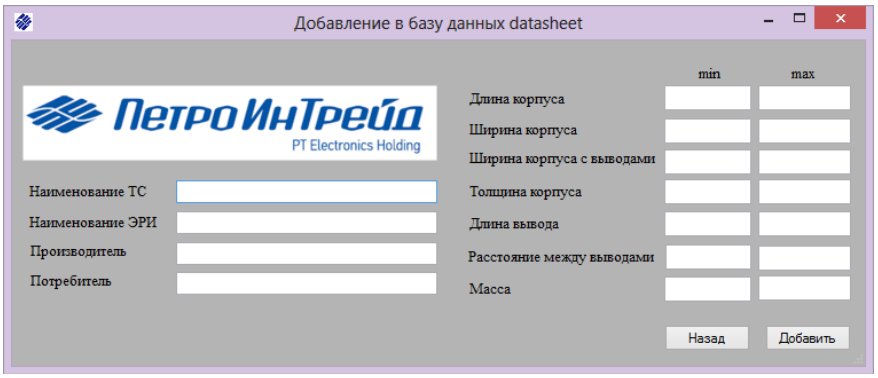


Рисунок 8 – Форма для добавления компонента в базу данных

После выбора компонента из раскрывающегося списка можно переходить к заполнению второго блока главной формы - «Проведение измерений» (рис. 9).

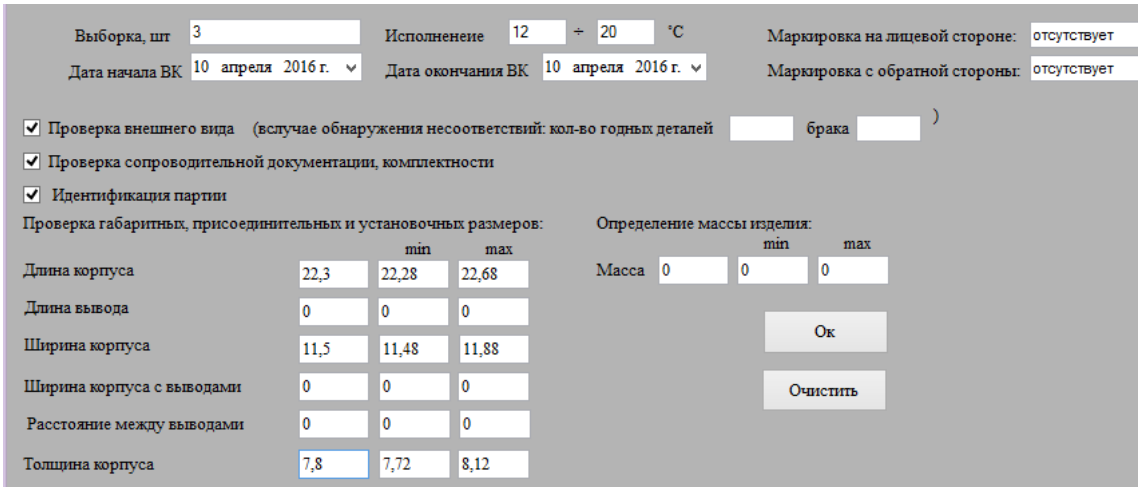


Рисунок 9 – Второй блок главной формы

Сначала необходимо записать размер партии и указать даты проведения испытаний ВК. Далее сотрудник выбирает, годен или не годен компонент по трем характеристикам.

Затем заполняются поля результатов измерений. После заполнения всех полей нужно нажать на кнопку «Ок», в результате чего записанные данные автоматически сохранятся в таблице базы данных «Регистрация результатов испытаний ВК». При нажатии на кнопку «Очистить» введенная в поля информация удаляется. Поля результатов измерений заполняются столько раз, каков объем выборки.

В третьем блоке «Формирование документов» автоматически отображаются результаты измерений (рис. 10).

Рисунок 10 – Третий блок главной формы

При нажатии на кнопку «Акт отбора» формируется документ «Акт отбора.docx» и сохраняется в созданной папке.

При нажатии на кнопку «Карта ВК» осуществляется сравнение полученных результатов измерений с допустимыми характеристиками минимума и максимума, формируется документ «Карта регистрации результатов ВК.docx» и сохраняется в созданной папке.

При нажатии на кнопку «Карта испытаний ЭРИ» формируются документы «Карта регистрации результатов испытаний ЭРИ.docx» и «Карта регистрации результатов измерений.xlsx».

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение автоматизированного приложения повысит качество регистрации результатов и управления документацией процесса ВК, сократит временные затраты на поиск необходимой информации, а, следовательно, снизит себестоимость процесса.

2. Инженер по качеству сможет проводить необходимый заказчику анализ результатов входного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИН ПИТ 90.11.01.2012 «Инструкция о порядке проведения испытаний электронной компонентной базы отечественного производства».
2. ГОСТ Р 56648-2015 «База электронная компонентная для ракетно-
3. космической техники. Входной контроль и дополнительные испытания. Общие положения».
4. ГОСТ 18321-73, ПР 50.3002-95 «Статистический контроль качества.
5. Методы случайного отбора выборок штучной продукции».
6. М.И.Седлер, Е.И.Поплевина. Улучшение процесса управления внешней нормативной документацией корпорации “тира”. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции. / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – с 1003-1012.
7. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования.
8. С.В. Пичкарь, М.И. Седлер. Повышение качества регистрации результатов в процессе входного контроля электронных компонентный баз (ЭКБ) путем

создания автоматизированного приложения. Неделя науки СПбГПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт металлургии машиностроения и транспорта. Часть 1.-СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015.-с. 33-35.
9. С.В. Пичкарь, М.И. Седлер. Повышение качества процессов входного контроля электронных компонентных баз (ЭКБ) путем создания автоматизированного приложения. Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016.-с. 88-93.
10. Кошелев В.Е. Access 2003.: практическое руководство – М.: ООО
11. «Бином-Пресс», 2005. – 464 с.
12. [Электронный ресурс]// Информационный портал – «VisualStudio 2010: примеры для C#» URL: http://www.Visual-Studio-2010-Samples.by. (дата обращения 15.03.2016).
13. [Электронный ресурс]// PT Electronics - Дистрибьюция электронный компонентов URL: http://www.ptelectronics/.com (дата обращения 05.04.2016).
14. [Электронный ресурс]// Словарь терминов и сленгов URL: http://www.monitorlab.ru/gloss.shtml (дата обращения 20.03.2016).

M. I. Sedler, S. V. Pichkar

AUTOMATING THE PROCESS OF INCOMING INSPECTION RESULTS REGISTRATION OF THE ELECTRONIC COMPONENT BASES (ECB)

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnicl University, Russia

Abstract

This work is dedicated to improving the quality of incoming inspection results registration of the electronic component bases (ECB), carried out in the laboratory of "PetroInTrade" LLC (OOO "PetroInTrade"). Currently the existing incoming inspection process was studied, the input control procedure's scheme was created, database's structure was formed, the client-server application that provides the creation of card testing results was developed.

Key words: the process of incoming inspection, automated application, database, client-server system, the process model.

REFERENCES

[1] IN PIT.90.11.01.2012 «Instruction on the Procedures testing of electronic components of domestic production». (rus.)
[2] GOST R 56648-2015 «Base electronic components for rocket and space technology. Incoming inspection of and additional tests. General provisions» . (rus.)

[3] GOST 18320-73, PR 50.3002-95 «Statistical Quality Control. Randomly selected sample piece production». (rus.)
[4] M. I. Sadler, E. I. Poplevina. Improving the quality of the management process of normative documents of the corporation “TV and Radio”. Modern mechanical engineering. Science and education: materials of 4th International scientific-practical conference. / under the editorship of M. M. Radkevich And A. N. Evgrafova. – SPb.: Publishing house of the Polytechnical Institute. University press, 2014. – p. 1003-1012.
[5] GOST ISO 9001 - 2011. «Quality management systems. Requirements». (rus.)
[6] S.V. Pichkar, M.I. Sedler. Improving the quality of incoming inspection results registration of the electronic component bases (ecb) by creating the automated application. Science Week SPbSPU: Materials Science Forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. Part 1 SPb .: Publishing house of the Polytechnic. Univ 2015.-s. 33-35. (rus.)
[7] S.V. Pichkar, M.I. Sedler. Improving the quality of incoming inspection results registration of the electronic component bases (ecb) by creating the automated application. Science Week SPbSPU: Materials Science Forum with international participation. The best reports. SPb .: Publishing house of the Polytechnic. Univ 2016.-s. 88-93. (rus.)
[8] Koshelev V.E. Access 2003 .: practical manual - M .: OOO "Binom-Press", 2005. – 464 p. (rus.)
[9] [Electronic resource] // Information portal - «Visual Studio 2010: The examples for C #" URL: http://www.Visual-Studio-2010-Samples.by. (Reference date 15/03/2016). (rus.)
[10] [Electronic resource] // PT Electronics - Electronic Components Distribution URL: http://www. ptelectronics.ru/.com. (reference date 04/05/2016). (rus.)
[11] [Electronic resource] // Dictionary of terms and slang URL: http://monitorlab.ru/gloss.shtml. (reference date 20/03/2016). (rus.)

УДК 658.562.3; DOI 10.1872/MMF-2016-130

Ю.В. Бочкарева[1] М. И. Седлер[2],

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗОВ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО АРХИВА И АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Юлия Валерьевна Бочкарева,
Магистр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: yulyab11@mail.ru

[1]Мария Ильинична Седлер,
Старший преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-0764, E-mail: msedler@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена проблема повышения качества выполнения заказов научно-технического центра, занимающегося проектированием и изготовлением нестандартного оборудования для различных отраслей промышленностей. Для этого создана автоматизированная система, включающая модули управления конструкторской документацией заказов, учета состояния склада, материального обеспечения сборочных операций и построения сетевых графиков их выполнения.

Ключевые слова: управление спецификациями заказов, учет состояния склада, материально-техническое обеспечение, сетевое планирование сборочных операций, электронный архив конструкторской документации.

Введение

Для повышения качества выполнения заказов научно-технического центра создана автоматизированная система, включающая модули управления конструкторской документацией заказов, учета состояния склада, материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций.

Модуль управления конструкторской документацией представляет собой электронный архив спецификаций заказов с возможностью просмотра чертежей, в результате создания которого сотрудники смогут

быстро получать информацию о составе разработанного оборудования и входящих в него узлов и, в случае необходимости, заимствовать детали и узлы при выполнении новых разработок [2].

Процесс изготовления оборудования заказов организован следующим образом: сборка конечного изделия и входящих узлов осуществляется на сборочном производстве, входящие в состав узлов детали изготавливаются по МЗК, стандартные детали и покупные комплектующие изделия, такие как двигатели, датчики, процессоры и др. закупаются.

Информация модуля управления конструкторской документацией используется для формирования «полной потребности» в деталях МЗК, стандартных деталях и покупных комплектующих изделиях заказов [3].

Модуль учета состояния склада предназначен для определения «чистой потребности» в деталях МЗК, стандартных деталях и покупных комплектующих изделиях заказов. В результате обработки спецификаций в модуле учета состояния склада формируется список требующих изготовления деталей МЗК и ведомость закупок стандартных и покупных деталей заказа [4].

Модуль материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций обеспечивает планирование загрузки сборочного производства: формирование списка деталей, стандартных и покупных комплектующих и автоматическое построение сетевого графика выполнения сборочных операций с учетом заданного срока выполнения заказа, последовательностью и продолжительностью операций сборки. В результате построения сетевого графика будут определены даты начала операций сборки каждого «уровня входимости» до окончательной сборки оборудования заказа [5].

Автоматизированная система управления заказами

Автоматизированная система управления заказами предназначена для управления конструкторской документацией, учета состояния склада, материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций. На рисунке 1 представлена диаграмма сценариев, на которой представлены функции автоматизированной системы [10].

Автоматизированная система имеет следующие модули:

– модуль управления конструкторской документацией;

– модуль учета состояния склада;

– модуль материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций.

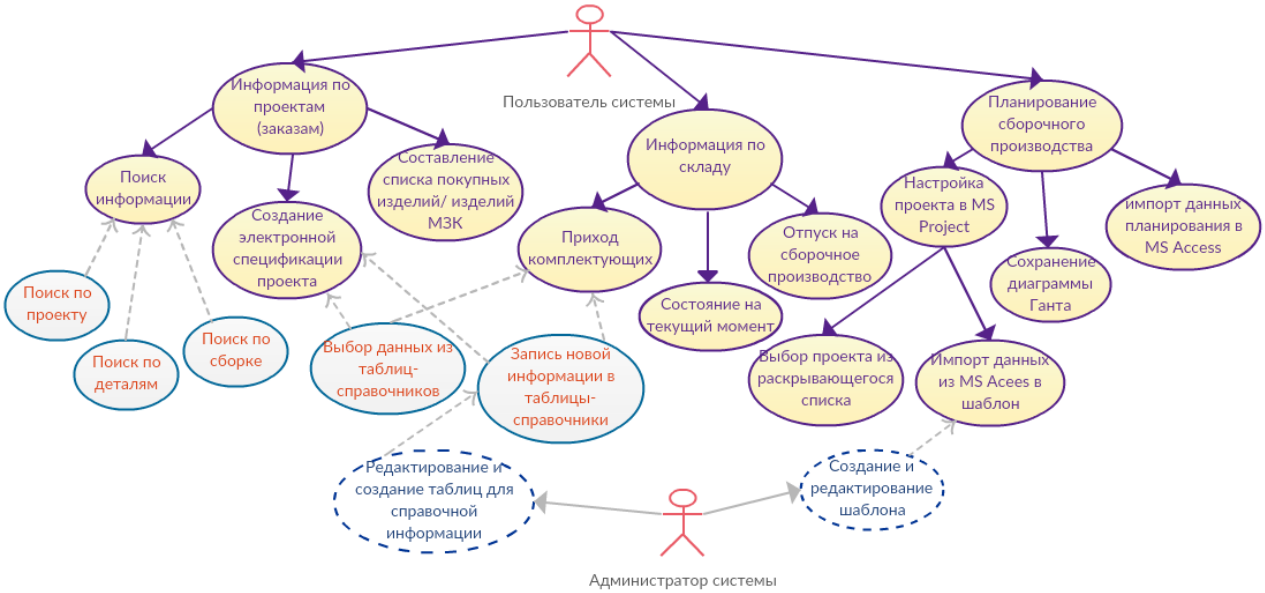


Рисунок 1 – Диаграмма сценариев

Для обеспечения работы модулей автоматизированной системы создан электронный архив - база данных MS Access, пополняемая информацией спецификаций выполняемых заказов.

Автоматизированная система разработана в среде программирования Visual Basic 6.0. Подключение информации таблиц и запросов MS Access осуществляется по технологии ADO. Автоматическое построение сетевых графиков происходит в программе MS Project. Для этого к проекту подключена необходимая библиотека. На рисунке 2 представлена блок-схема автоматизированной системы [9].

Рисунок 2 – Блок-схема автоматизированной системы

Для удобства ввода информации спецификаций заказов созданы таблицы-справочники крепежных и покупных изделий MS Access.

Для записи информации в таблицы-справочники разработаны пользовательские формы, обеспечивающие возможность выбора информации из раскрывающихся списков, что позволит сократить временные затраты и избежать ошибок записи, связанных с человеческим фактором. Пример формы записи крепежного изделия представлен на рисунке 3.

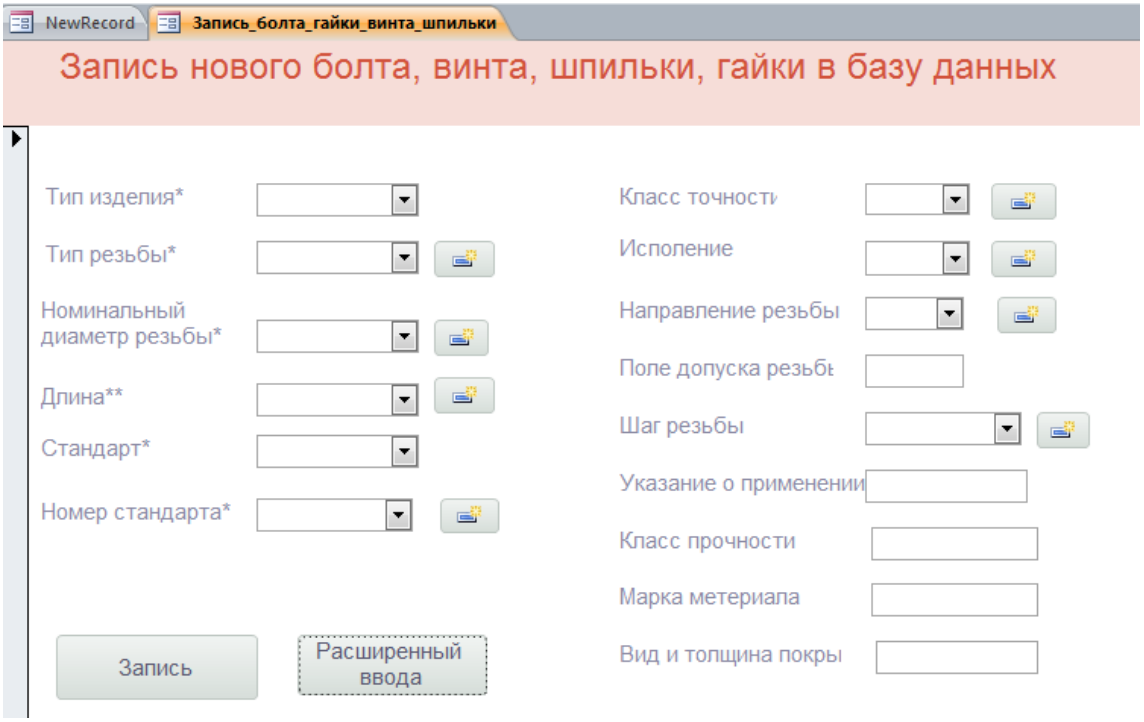


Рисунок 3 – Форма для записи крепежного изделия

Алгоритм записи стандартных изделий в таблицы-справочники представлен на рисунке 4.

При записи в таблицы-справочники программный модуль осуществляет следующие действия:

- контроль ввода необходимых значений;
- проверку уникальности вводимой записи;
- формирует запись в виде, требуемом для ввода в поле «Обозначение» спецификации. Такое решение позволит автоматизировать процесс заполнения спецификаций новых заказов [1].

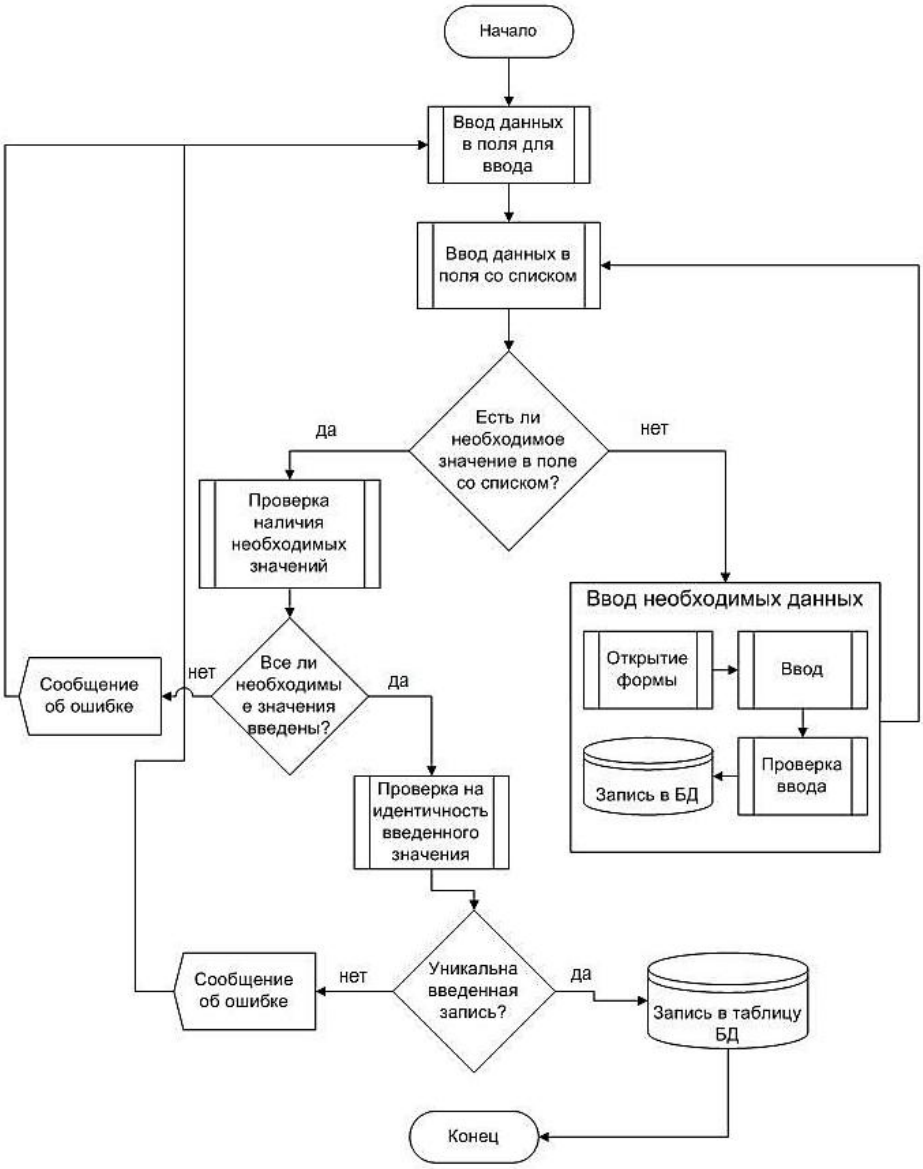


Рисунок 4 – Алгоритм записи стандартных изделий

Для ввода спецификаций заказов предусмотрены таблицы, в которых содержится следующая информация:

- обозначение узлов проектов с указанием обозначений узлов верхнего уровня, в которые они входят, и их количества в узле верхнего уровня;

- обозначение деталей с указанием обозначений узлов, в которые они входят, и их количества в узле;

- информация о входящих в состав узлов крепежных деталях и покупных изделиях выбирается из таблиц-справочников.

Алгоритм записи информации спецификаций в таблицы базы данных представлен на рисунке 5.

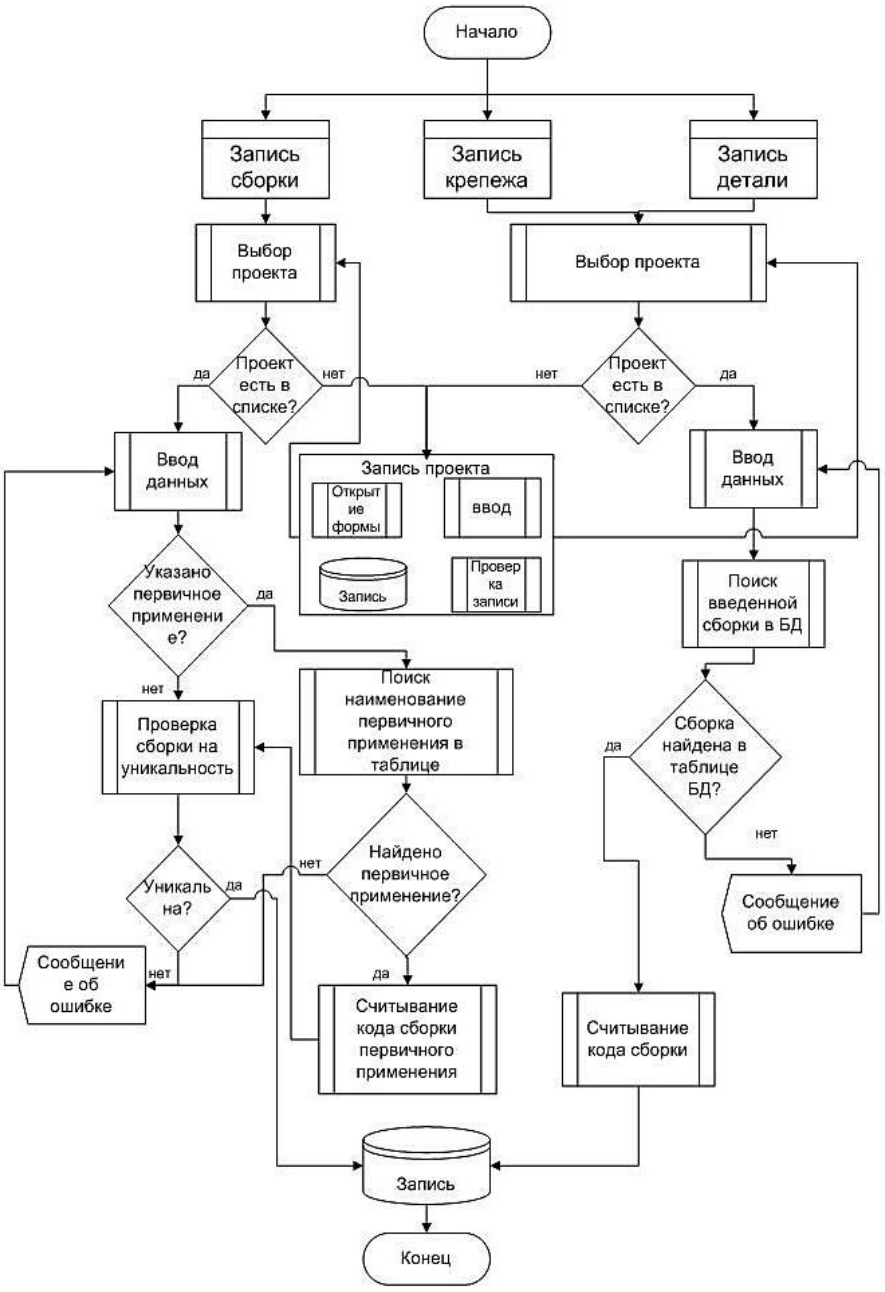


Рисунок 5 - Алгоритм записи информации спецификаций

Алгоритм записи реализует систему «входимости» сборочных единиц: при записи сборочной единицы вводится обозначение как сборочной единицы предыдущего «уровня входимости», так и цифры, соответствующей уровню «входимости» [6].

Модуль учета состояния склада

Модуль учета состояния склада представляет таблицу базы данных MS Access с информацией о поступающих партиях и отпуске деталей МЗК, стандартных деталей и покупных изделий в сборочное производство.

Для записи в базу данных информации о поступлении на склад предусмотрена форма «Поступление на склад» (рис. 6).

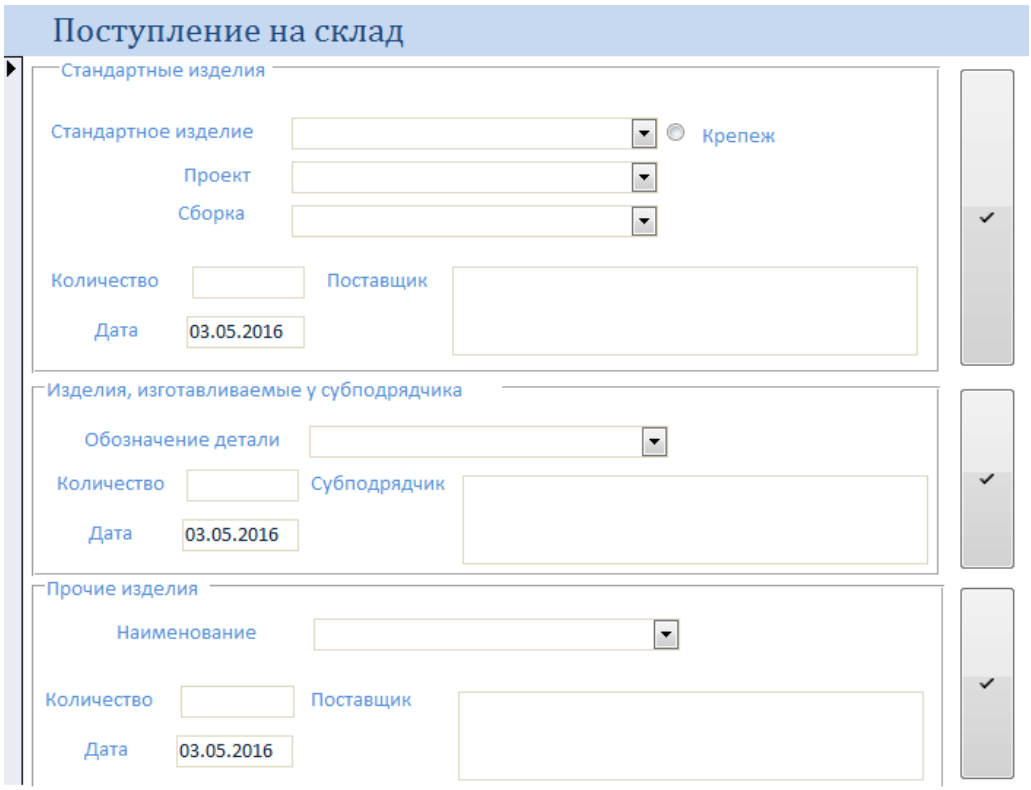


Рисунок 6 – Форма «Поступление на склад»

Решение о разграничении деталей на категории является удобным инструментом для поиска информации. Аналогичные формы созданы для внесения информации об отпуске со склада и для просмотра актуальных остатков.

Модуль материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций

Модуль материального обеспечения и сетевого планирования сборочных операций предназначен для планирования загрузки сборочного производства. Формирование списка деталей, стандартных и покупных комплектующих операций сборки осуществляется в результате запроса к таблицам узлов и деталей модуля управления конструкторской документацией. Для построения сетевого графика выполнения заказов в базе данных создана таблица норм времени операций сборки [7].

Схема связей таблиц представлена на рисунке 7.

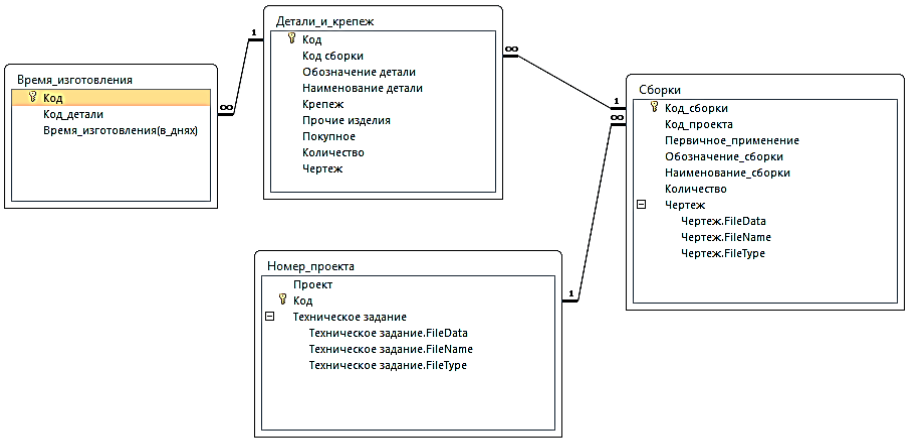


Рисунок 7 – Связи таблиц базы данных для управления информацией об изделиях

Построение сетевого графика планирования сборочных операций заказа осуществляется в программе MS Project путем импорта результатов запроса к таблицам базы данных MS Access. Для этого создан шаблон – файл .mpp, в который осуществляется загрузка списка деталей, стандартных и покупных комплектующих операций сборки с указанием уровня «входимости» и длительности выполнения сборочных операций. После этого происходит автоматическое построение сетевого графика, на котором можно увидеть даты начала сборочных операций и перечень деталей МЗК, стандартных и деталей покупных комплектующих изделий каждой операции сборки (рис. 8) [8].

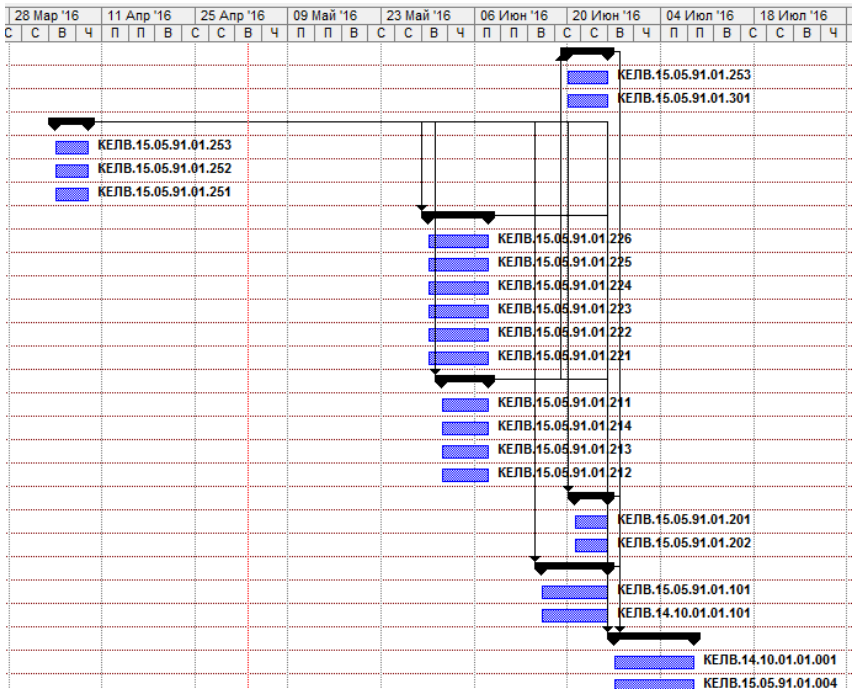


Рисунок 8 - Диаграмма Ганта

Эта информация необходима для осуществления закупок стандартных деталей и покупных комплектующих изделий и заключения договоров МЗК с субподрядчиками.

Основные планируемые результаты

Внедрение автоматизированной системы существенно повысит качество и эффективность выполнения заказов за счет:

-минимизации временных издержек, связанных с поиском требуемой информации и составлением спецификаций заказов;

- управления запасами стандартных деталей и комплектующих изделий;

- управления процессом МЗК;

- реализации концепции «точно в срок» при заключении договоров МЗК и закупке стандартных деталей и покупных комплектующих изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.316-68 Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц.
2. В.Г. Самойлович. Организация производства и менеджмент: учебник для вузов — Москва: Академия, 2008 .— 325.
3. Найджел Слак, Стюарт Чеймберс, Роберт Джонстон. Организация, планирование и проектирование производства. Операционный менеджмент: пер. с 5-го англ. изд./.— Москва : ИНФРА-М, 2011 .— 789 с.
4. В. А. Козловский, В. В. Кобзев, В. М. Макаров. Организация производства на предприятиях машиностроения : стратегия процесса: учеб. пособие по спец. 060800 "Экономика и управление на предприятии машиностроения"; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; под общ. ред. В. А. Козловского .— СПб.: Изд-во Политехн. ин-та, 2006 .— 75 с.
5. В.Е.Власов, Р.Б. Калмыков, М.И. Седлер. Разработка системы оперативно-календарного планирования для НПП "Буревестник". —Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Межвузовская научно-техническая конференция, Неделя науки. Ч.4 – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2004.-143-146 с.
6. В.С. Горностаев, М.И. Седлер. Повышение эффективности работы электронного архива и автоматизации документообработа при проектировании путем создания автоматизированной системы управления данными о проектах. —XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.4 – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2011.-271-272 с.
7. М.В. Серова, М.И. Седлер. Создание системы для управления запасами материалов производственного предприятия. —XXXIV неделя науки СПбГПУ : материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов Ч.4 – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та,

2006.-257-259 с.
8. Цодиков, Ю. М. Оптимальное календарное планирование для непрерывного производства с ограничением на структуру графика / Ю. М. Цодиков // Автоматика и телемеханика / Российская академия наук .— М., 2008 .— №1 .— С. 171-179
9. Седлер М.И., Егорова Н.П. Разработка автоматизированного клиент-серверного приложения управления заказами для фабрик ортопедической обуви // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конференции. / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 530 – 538.
10. М.И. Седлер, Л.Н. Шуткевич. Управление процессами [Электронный ресурс] : методические указания к выполнению курсовой работы. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, Кафедра конструкторско-технологических инноваций.— Электрон. текстовые дан. (1 файл : 3,75 Мб) .— Санкт-Петербург, 2013.

I. V. Bochkareva, M. I. Sedler

IMPROVING THE QUALITY OF PROJECTS EXECUTION BY CREATING ELECTRONIC ARCHIVE AND THE AUTOMATION PLANNING ASSEMBLY PRODUCTION

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This paper deals with the problem of improving the quality of projects execution at scientific and technological center dedicated to the design and manufacture non-standard equipment for various industries. The automated projects management systems created in order to improve the quality of projects execution that includes the design document management module, accounting module status of stocks record and the module of material supply and planning of assembly operations.

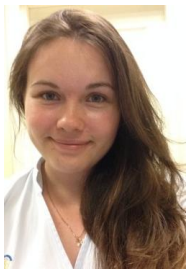
Key words: bill of materials management, status of stocks record, material supply, planning of assembly operations, electronic archive of design documentation.

УДК 658.562.4; DOI 10.1872/MMF-2016-131

М.И. Седлер[1], И.В. Копосова[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ ПРОГРАММ ИСПЫТАНИЙ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

[1]Седлер Мария Ильинична, старший преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: msedler@mail.ru.



[2]Копосова Ирина Витальевна, студент магистр
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: irina.koposova.93@mail.ru.

Аннотация

Работа посвящена повышению качества процесса построения программ испытаний (Процесса). В работе рассмотрены существующий на предприятии Процесс, нормативная документация (НД), регламенты и стандарты предприятия (СТП), разработана блок-схема работы и автоматизированное приложение построения программ испытаний. Автоматизация Процесса позволит сократить время на составление план-графиков проведения испытаний и формирование отчетов.

Ключевые слова: программа испытаний, виды испытаний, оценка результатов испытаний, серийное производство, автоматизированное приложение.

АО «ГОЗ Обуховский завод» является одним из ведущих предприятий промышленного комплекса страны. В настоящее время на предприятии осуществляется масштабное техническое перевооружение, приобретение современного оборудования и внедрение прогрессивных технологий (бережливое производство).

Сегодня завод – предприятие, обладающее профессиональными кадрами, всеми видами технологий и оборудования, необходимыми для изготовления сложных, высокотехнологичных и наукоемких изделий [11].

Предприятие работает по контрактам государственного оборонного заказа (ГОЗ), поэтому система менеджмента качества (СМК) предприятия представлена большим количеством стандартов и осуществляет свою работу согласно ГОСТ ИСО 9001-2011 и ГОСТ РВ 15.002-2002 [1, 2]. Контроль качества (КК) изготовления продукции осуществляет отделом технического контроля (ОТК) и военным представительством (ВП) согласно ГОСТ РВ 15.307 [3].

ВП создано для КК и приемки военной продукции на предприятиях, осуществляющих в интересах обороны разработку, испытания, производство, поставку и утилизацию военной продукции в соответствии с условиями ГОЗ. ВП занимается составлением программ испытаний ДСЕ и программ аттестации испытательного оборудования, работой с рекламациями, проверкой всех видов документации и утверждение ее с ОКБ, ОКСП, ОГТ, проведение всех видов контроля комплектующих изделий. Программы испытаний (ПИ)содержат объекты, подверженные испытаниям, объем, последовательность и сроки испытаний.

Цель работы – разработка автоматизированного приложения Процесса. Работа является актуальной в связи с тем, что существующий процесс управления НД является трудоёмким, требует заполнения большого количества форм и велика вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором [8]. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: построена модель существующего Процесса, создана блок-схема приложения, разработан интерфейс и автоматизированное приложение разработки ПИ. Автоматизация Процесса позволит сократить время на составление ПИ, расширить оценку ПИ и исключить ошибки, связанные с человеческим фактором составления ПИ.

На первом этапе работы был изучен стандарт предприятия (СТП) по испытаниям, согласно которому построена модель существующего Процесса:

1) Специалист группы ВП получает от опытно-конструкторского бюро (ОКБ) комплект документов, состоящий из конструкторской документации (КД), нормативной документации (НД), эксплуатационной документации (ЭД), технологического паспорта на изделие.

2) Далее ВП внимательно изучает документацию и составляет таблицу со списком объектов для проведения испытаний (деталей и сборочных единиц (ДСЕ)) (таблица 1).

Таблица 1 – Существующая программа испытаний

№	Обозначение	Объект предъявления	Наименование	Испытания	Периодичность
1	120.000.15.00	120.000.15.302	Шток	Периодические	Каждый 1-ый месяц квартала

3) После рассмотрения специалистом ВП список объектов подписывается начальником группы ВП, отвечающей за изделие. Подписанный документ остается в производственной группе ВП, а копии передают в ОТК, в цех и на участки, участвующие в изготовлении изделия.

По результатам анализа существующего Процесса было принято решение о необходимости его автоматизации и создано автоматизированное приложение, с помощью которого:

- модернизирована таблица ПИ путем добавления дополнительных столбцов, необходимых для учета и анализа;
- для хранения информации создана База Данных;
- обеспечивается автоматическое формирование и сохранение в компьютерах участников процесса документов с результатами испытаний;
- обеспечивается автоматическое построение сетевых графиков, что позволит избежать ошибок планирования.

Пользователями приложения являются сотрудники ВП, а именно производственные группы, которые занимаются составлением программ испытаний, контролем качества военной продукции и приемкой изделий. На данный момент составление ПИ осуществляется вручную и занимает очень много времени. Автоматизация Процесса позволит рационализировать время составления программ, избежать человеческих ошибок при их составлении и организовать статистический анализ по проведенным испытаниям.

На первом этапе разработки приложения создана блок-схема его работы (рисунок 1).

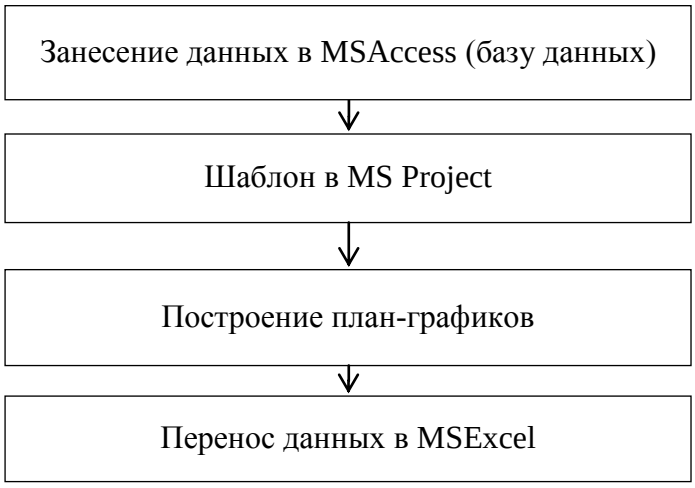


Рисунок 1 – Блок-схема работы приложения

Все данные о предъявляемых на испытания изделиях вносятся в базу данных. Планирование ПИ осуществляется путем построения сетевого графика в программе MSProject [4]. Для автоматического переноса необходимой информации из таблицы базы данных в программе MSProject создан шаблон – файл «Шаблон.mpp». Построение план-графиков загрузки

участков, участвующих в изготовлении изделия осуществляется автоматически.

Для удобства пользования и сохранения результатов построения необходимо обеспечить перенос данных из файла шаблона в файл MSExcel, который будет автоматически сохранен под именем, в котором присутствует текущая дата. После построения плана-графика и его автоматического сохранения в процессе испытаний осуществляется ввод фактических дат и отслеживание хода процесса. Для этого в шаблоне предусмотрены необходимые поля и индикаторы.

Далее был разработан интерфейс приложения (рисунок 2).

Вход в приложение осуществляется путем ввода пароля, что необходимо для защиты информации. Если введен верный пароль, открывается форма «Меню», по кнопкам которой можно перейти на формы:

1) «ДСЕ из базы» содержит информацию из базы данных о ранее производимых изделиях. На форме можно просмотреть список необходимых испытаний/ПИ, требования по которым оцениваются результаты испытаний, результаты испытаний с замечаниями, а также создать ПИ для дальнейших испытаний.

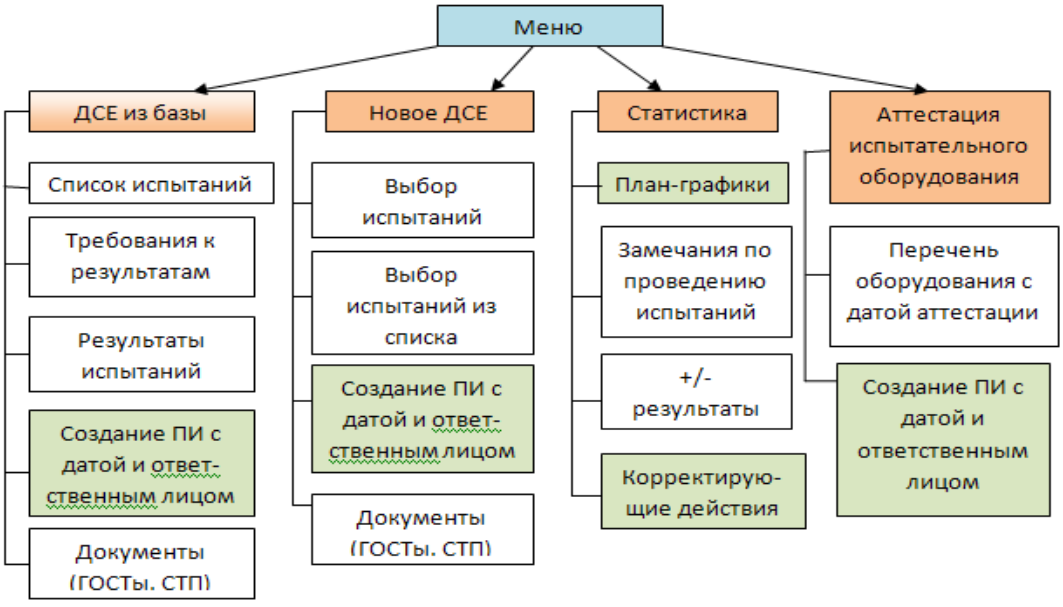


Рисунок 2 – Разработка интерфейса приложения

2) «Новое ДСЕ». Эта форма необходима для внесения в базу данных новых изделий, еще не освоенных в производстве. С помощью этой формы создается ПИ для изделия: формируется список и выбирается тип испытаний по каждому изделию.

3) Форма «Статистика» позволяет вывести на экран результаты испытаний. С помощью этих результатов можно регулировать состав испытаний путем оценки их эффективности.

4) Форма «Аттестация испытательного оборудования» содержит перечень аттестационного оборудования с типом аттестации (первичная/периодическая/повторная), а также с датами их проведения. С помощью информации о перечне оборудования, типа и периодичности аттестации формируется ПИ.

На каждой форме присутствует кнопка «Документы», открывающая доступ к нормативной базе (ГОСТы, ОСТы, СТП и т.д.).

Приложение разработано в среде MSVisualBasic [7]. Для обеспечения выполнения всех заявленных требований, к приложению подключаются библиотеки MSWord, MSExcel, MSProject и библиотеки, обеспечивающие связь с таблицами и запросами MSAccess.

Необходимая для работы приложения информация хранится в следующих таблицах созданной Базы Данных MSAccess [9].

Главная таблица – «Изделия» – содержит поля: обозначение сборки, предъявляемое изделие, наименование, цех, № договора. Поле «Обозначение сборки» указывает сборку, в которое входит изделие, поле «Предъявляемое изделие» содержит изделие из сборки согласно его номеру в конструкторской документации, поле «Цех» содержит информацию о нахождении изделия на предприятии.

Таблица «Изделия» представлена на рисунке 3.

Изделия

Код	Обозначение сборк	Предъявляемое изде	Наименова	Цех	№ договора
1	000.120.05	000.120.05.01	Втулка	a1	123456
2	000.120.06	000.120.06.17	Шток	a1	123455
3	000.120.07	000.120.07.02	Подшипник	a2	123444
4	000.120.11	000.120.11.07	Дроссель	a2	123465

Рисунок 3 – Таблица «Изделия»

Также для создания запросов созданы таблицы:

- «Испытания», котораясодержит информацию и периодичности проведения испытаний для указанных изделий в поле «Предъявляемое изделие», а также вид испытаний;
- «Ответственный» содержит ответственных по проведению испытаний по каждой сборке;
- «Дата проведения» содержит дату проведения испытания и дату последующего проведения испытания для определенного изделия из сборки;
- «Замечания» содержит обозначение предъявляемого изделия и поле с замечаниями, которые возникли при проведении испытаний.

Для работы приложения созданы следующие запросы к таблицам Базы Данных.

1) Запрос «Программа испытаний» к таблицам «Изделия», «Ответственный», «Испытаний», «Дата проведения».

Схема связей таблиц запроса представлена на рисунке 4, результат запроса – на рисунке 5.

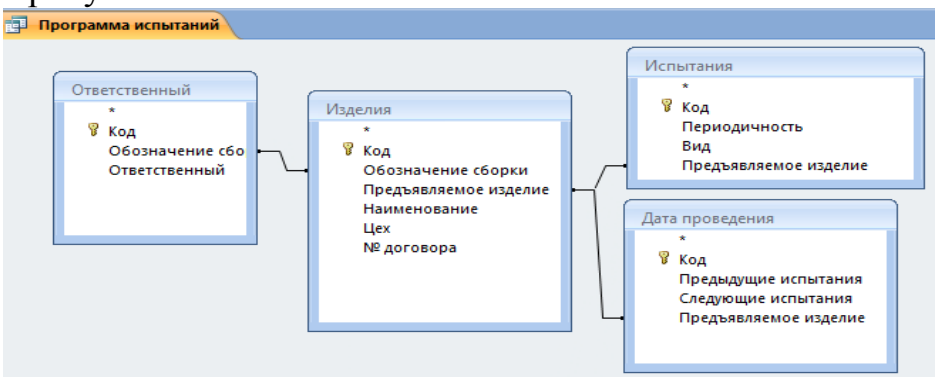


Рисунок 4 – Схема связей таблиц запроса «Программа испытаний»

Программа испытаний

Обозначение сб	Предъявляемое	Наименова	Периодичность	Вид	Ответственный	Предыдущие и
000.120.05	000.120.05.01	Втулка	1я неделя квартала	периодически	Иванов И.К.	01.12.2015
000.120.06	000.120.06.17	Шток	-	летучий контр	Иванов И.К.	02.12.2015
000.120.07	000.120.07.02	Подшипник	1 раз в неделю	периодически	Петров К.В.	01.12.2015

Рисунок 5 – Запрос «Программа испытаний»

Полученная выборка используется для построения сетевых графиков в MSProject [5, 6].

2) Запрос «Замечания по испытаниям» к таблицам «Изделие», «Испытания» и «Замечания». Схема связей таблиц запроса представлена на рисунке 6, результат запроса – на рисунке 7.

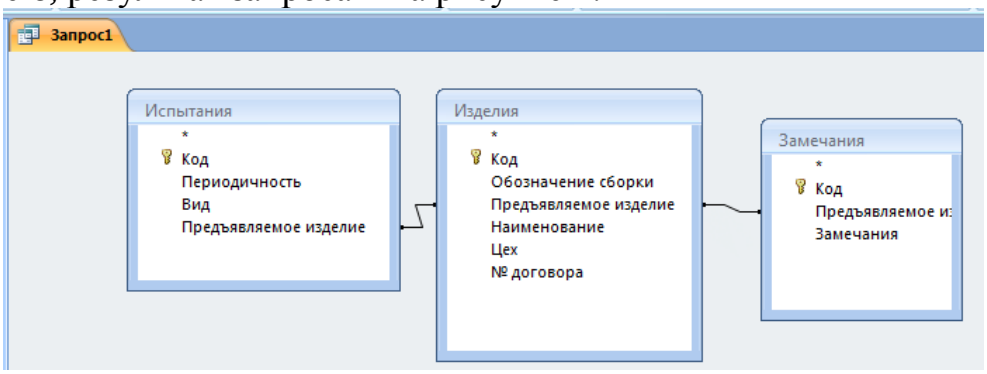


Рисунок 6 – Схема связи запроса «Замечания по испытаниям»

Замечания по испытаниям

Обозначе	Предъявляемс	Наименова	Вид	Периодичность
000.120.05	000.120.05.01	Втулка	периодические	1я неделя квартала
000.120.06	000.120.06.17	Шток	летучий контроль	-
000.120.07	000.120.07.02	Подшипник	периодические	1 раз в неделю

Замечания
не подготовлены инструменты для проведения испытаний, отдаление №5563 от 1.12.1
-
оборудование не по ТП, отдаление №4141 от 5.12.15

Рисунок 7 – Запросы «Замечания по испытаниям»

Приложение состоит из формы «Меню», при нажатии на кнопки которой можно перейти в нужный раздел (рисунок 8).

Рисунок 8 – Форма «Меню»

При нажатии на кнопку «Создание ПИ» открывается форма создания программы испытаний, где необходимо выбрать из списков данные по изделию и виду испытаний (рисунок 9).

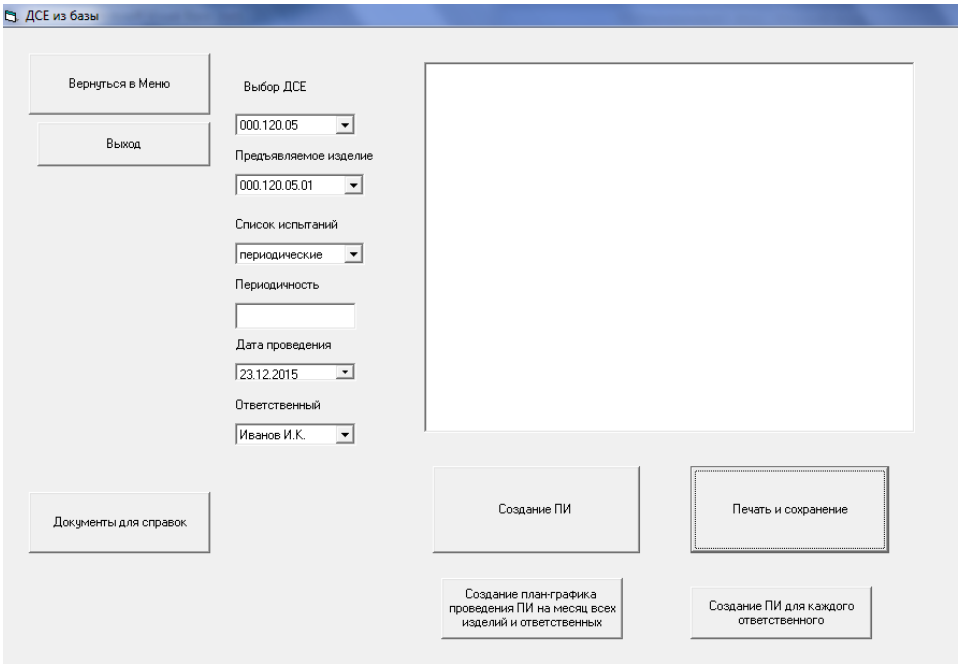


Рисунок 9 – Форма «Создание ПИ»

Если нажать на кнопку «Создание ПИ», все выбранные данные будут перенесены в документ MSWord и сохранены в папке «Программы испытаний». Если нажать на кнопку «Печать и сохранение», документ будет распечатан и сохранен в папке «Программы испытаний». При нажатии на кнопку «Создать план-график на месяц» данные существующих программ испытаний будут загружены в шаблон

MSProject, построен сетевой график и сохранен в папке «План-графики» с названием, в имени которого присутствует обозначение изделия и текущая дата.

Форма «Добавление ДСЕ в базу» используется для добавления новых деталей и сборочных единиц (ДСЕ) в базу данных. На форме используются поля из списка и текстовые поля для самостоятельного заполнения, а также таблица «Изделия», в которую вносятся новые ДСЕ.

В результате работы приложения обеспечивается формирование следующих документов:

1) Общая программа испытаний на месяц - сетевой график MSProject и файл MSWord [10]. Построенный сетевой график (рисунок 10) будет использоваться работниками ВП для отслеживания и своевременного проведения испытаний. Файл MSWord будет использоваться на участках во время проведения испытаний.

	Обозначение сборки	Предъявляемое изделие	Наименование	Периодичность	Вид испытаний	Дата проведения испытаний	Длительность испытаний	Названия ресурсов
1	000.120.05	000.120.05.01	Втулка	1я неделя квартала	периодические	Пн 21.09.15	Ср 07.10.15	Иванов И.К.
2	000.120.06	000.120.06.17	Шток	1 раз в неделю	летучий контроль	Чт 08.10.15	Пн 19.10.15	Иванов И.К.
3	000.120.07	000.120.07.02	Подшипник	-	приемо-сдаточные	Пн 21.09.15	Пт 25.09.15	Петров К.В.
4	000.120.11	000.120.11.07	Дроссель	2 раза в месяц (начало-конец)	типовые	Пн 21.09.15	Пн 28.09.15	Сидоров Г.И.

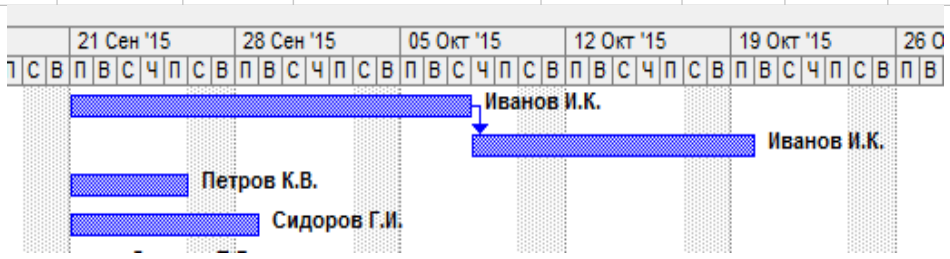


Рисунок 10 - Сетевой график проведения программ испытаний

2) Программа испытаний для сотрудника. Она будет использоваться в качестве задания на проведение испытаний для каждого сотрудника.

3) Программа испытаний по изделию. Для того чтобы не нарушать условия договора по срокам поставки, на каждое изделие и его сборочные единицы будет составляться ПИ с точными датами их проведения.

Таким образом, в ходе работы был рассмотрен процесс построения программ испытаний для изделий сборочного производства, создана база данных и автоматизированное приложение, обеспечивающее формирование и управление ПИ.

Внедрение автоматизированного приложения сократит затраты времени на составление ПИ, повысит качество управления процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ ИСО 9001-2011 «Система менеджмента качества предприятия. Руководство».
2. ГОСТ РВ 15.002-2003 «Система менеджмента качества. Система разработки и постановки на производство военной техники».
3. ГОСТ РВ 15.307-2002«Испытания и приемка серийной продукции».
4. А.И. Балашов, Е.М. Рогова, М.В. Тихонова, Е.А. Ткаченко «Управление проектами». Под ред. доктора эк.наук Е.М. Роговой - Учебник для бакалавров. – Москва: Юрайт, 2013. – 383 с.
5. В.В. Богданов. Управление проектами в MicrosoftProject 2002:Учебный курс. — СПб.: Питер, 2003. —640 с.: ил.
6. Е.М. Кудрявцев. «Методы сетевого планирования и управления проектом (MSProjectStandart): - Москва: ДМК Пресс, 2005 – 204 с.
7. Никита Культин «VisualBasic. Освой на примерах» – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 284 с.
8. М.И. Седлер, Е.И. Поплевина «Улучшение процесса управления внешней нормативной документацией корпорации «Тира»//Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно—практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2014. – С. 1003-1011.
9. Андрей Сеннов «Access 2010 – учебный курс» - СПб.: Питер, 2010. – 288 с.
10. Tapping D., Lnyster T., Shuker T. Value Stream Management: Eight Steps to Planning, Mapping and Sustaining Lean Improvements. – N.Y.: Productivity Press, 2002. – p. 165.
11. АО «ГОЗ «Обуховский завод» Электронный ресурс [http://www.goz.ru/istoriya-obuhovskogo-zavoda-xxi-vek/]

M.I.Sedler, I.V.Koposova

IMPROVING THE QUALITY OF THE TESTING PROGRAMS BUILD PROCESS BY CREATING THE AUTOMATED APPLICATION

all: Peter the Great St.Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper deals with issues of improving the quality of the testing programs build (Process). At this moment the existing at the enterprise Process, factory regulations and standards (STF) were studied, the flow chart and structure of the automated application was developed. The process's automatization is going to be able to reduce time to prepare the schedules for testing and report generation.

Keywords: program trials, forms trials, result estimation trials, series manufacturing, automated application.

REFERENCES

[1] GOST ISO 9001-2011 «The system of quality management. Manual» (rus.)
[2] Standard GOST RV 15.002-2003 «Quality Management System. (rus.) System of development and staging for the production of military equipment» (rus.)
[3] GOST RV 15.307-2002 «Trials and acceptance of serial manufacturing» (rus.)
[4] A. Balashov, E. Rogov, M. Tikhonov, E. Tkachenko, "Project Management". Ed. Dr. economical science E. Rogova. A Textbook for bachelors. Moscow: Yurayt, 2013. 383 p. (rus.)
[5] V. Bogdanov. Project Management in Microsoft Project 2002: Training course. - SPb .: Peter, 2003. 640 p. (rus.)
[6] E. Kudryavtsev. "Methods of network planning and project management (MS Project Standart): - Moscow: DMK Press, 2005 - 204 p. (rus.)
[7] Nikita Kul'tin «Visual Basic. Teach by example " SPb .: BHV-Petersburg, 2004. 284 p. (rus.)
[8] M. Sedler, E. Poplevina «Improving management process external documentation of the corporation «Tira»//Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference. - SPb .: Publishing house Politehn.un Press, 2014. Pp. 1003-1011. (rus.)
[9] Andrew Sennov «Access 2010 - Training Course" - SPb .: Peter, 2010. - 288 p. (rus.)
[10] Tapping D., Lnyster T., Shuker T. Value Stream Management: Eight Steps to Planning, Mapping and Sustaining Lean Improvements. – N.Y.: Productivity Press, 2002. – p. 165.
[11] JSC "SDO "Obukhovsky Plant" Electronic resource [http://www.goz.ru/istoriya-obuhovskogo-zavoda-xxi-vek/]

УДК 378.14.04:316.61; DOI 10.1872/MMF-2016-132

М.Н. Фунтиков

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕБНО-ВОСПИТАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МЕТАБОЛИЗМА

Максим Николаевич Фунтиков, ассистент
Институт гражданской защиты Донбасса
Донецкий национальный технический университет
ДНР, Донецк
E-mail: fountikov@gmail.com

Аннотация

Представлена суть теории информационного метаболизма (ТИМ); на основе классификации типов личности К.Г. Юнга раскрыты основные понятия науки соционики, приведены методы и технологии практического использования соционики в педагогической работе; показана значимость внедрения ТИМ в образовательный процесс.

Ключевые слова: интертипные отношения, особенности восприятия, психические процессы, соционические квадры, социотип, теория информационного метаболизма, учебно-воспитательная работа.

1. Постановка задачи и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями

На современном этапе необходимость модернизации и обновления сферы профессионального образования обусловлена тенденциями экономического и общественного развития.

Проблема выбора форм и методов обучения, обеспечивающих процесс совершенствования системы высшего профессионального образования, очень актуальна. Перед педагогами высшей школы ставится важная стратегическая задача внедрять в педагогическую практику соответствующие образовательным целям современные методы и технологии обучения.

Одним из направлений успешного формирования компетенций у студентов является применение методов практической психологии в образовательном процессе. Данный подход предусматривает изучение теории информационного метаболизма (ТИМ).

«Роль преподавателя становится многоуровневой, требует компетентности не только в своей дисциплине, но и в умении оперировать многообразием материальных и идеальных средств обучения, использовании инновационных педагогических технологий для организации учебного процесса. Преподавателям необходимо проявлять

новаторство в научно-педагогической деятельности как неисчерпаемый источник роста культурно-технического уровня и ускорения научного прогресса для всех участников образовательного процесса» [10, с. 59-65].

2. Анализ научных и практических методов исследования

Для создания эффективной среды взаимодействия участников образовательного процесса необходимо учитывать психологические особенности личностного развития студентов. Понимание глубинных психических процессов, которые формируют качества личности и познавательные акты: ощущение, восприятие, представление, мышление, память, являющиеся каналами нашего общения с миром.

Вопрос о необходимости внедрения психологических знаний во все структуры системы высшего образования неоднократно поднимался на конференциях, дискуссиях, семинарах как зарубежными, так и отечественными учеными в области педагогики.

Проблематикой изучения этих вопросов занимались А. Аугустинавичюте [1], А.В. Букалов [2], В.В. Гуленко [4], В.Д. Ермак [6] и ряд других деятелей.

Таким образом, появилась необходимость и возможность изучения созданных теоретических разработок и дальнейшего поиска путей и средств психологического обеспечения педагогического процесса. Одним из перспективных направлений повышения эффективности педагогической работы стала концепция соционики, разработанная на основе ТИМ.

Сущность теории информационного метаболизма основывается на базовом понятии метаболизма – (от греч. «превращение, изменение») обмен веществ или химические превращения с момента поступления веществ в организм. Известный в мировом научном сообществе классик польской психиатрии А. Кемпинский проводит аналогию между энергетическим метаболизмом и информационным. Концепция ТИМ заключается в следующем: получение информации как сигнала из окружающей среды и реакция организма, последующие поступки, поведение равным образом становятся сигналом для окружающих. Психика человека, получая потоки информации из окружающего мира, дифференцирует ее на определенные составные части или аспекты. Информация воспринимается определенными каналами человеческой психики, усваивается, накапливается, хранится, преобразуется и частично выводится на внешний уровень для взаимодействия с окружающим миром [7, с. 32-40, 190-195].

С развитием общества процесс обмена сигналами с окружением постепенно усложнялся. Психика современного человека осуществляет селекцию или дифференциацию полученной информации и создает свою личностную модель восприятия окружающего мира.

На современном этапе развития формируется утверждение, что для деятельности личности информационный метаболизм играет такую же важную роль, как и энергетический метаболизм.

В 60-х годах прошлого века литовский экономист, а впоследствии одна из первых советских социологов А. Аугустинавичюте с группой единомышленников разработала концепцию теории соционики.

Данное направление в науке возникло на базе ТИМ А. Кемпинского, также в основу соционики положена система типологии личности К.Г. Юнга, работы по психоанализу З. Фрейда, литературный труд Б. Шнейдермана «Психология программирования: Человеческие факторы в вычислительных и информационных системах» [11] и другие научные работы в области психологии, педагогики и социологии.

Соционика как раздел науки представляет собой классификацию типов личности связанных с процессами информационного обмена в обществе.

Ряд докладов на научных Всесоюзных конференциях, где А. Аугустинавичюте раскрывает концепцию и методы соционики, приводят к появлению учеников и последователей не только людей гуманитарного образования – педагогов и психологов, но и специалистов в области кибернетики, бионики, программирования, теории систем, моделирования искусственного интеллекта.

Опишем суть концепции соционики на примере выражения «гуманитарий». Слово «гуманитарий» употребляется в качестве универсального термина для обозначения человека, у которого сильно выражена иррациональная функция информационного метаболизма, т.е. сенсорная либо интуитивная. В этом случае рациональная функция выражена менее и является дополнительной. На основании этого принципа также можно рассматривать известное выражение «Физики и Лирики».

Подобное отношение вытекает из психологических особенностей восприятия информационных сигналов индивидом. Определенные аспекты информации дифференцируются и хорошо осознаются, а другие аспекты не дифференцируются, поступают в сжатом виде. Процессы обработки головным мозгом информации, поступающей из внешней среды, затрагивают органы чувств и связаны с познавательными процессами. Так возникла теория психологических типов – классификация людей по способу восприятия [12].

Разработанная на основе вышерассмотренных теорий концепция соционики содержит 16 типов информационного метаболизма (рис. 1, 2).

Система типологии личности строится на преобладании той или иной психической функции – мышления, чувства, ощущения и интуиции. В дополнение к доминирующей функции может быть развита вспомогательная функция, смежная с основной. Эта типология была разработана швейцарским психиатром К.Г. Юнгом в работе

«Психологические типы» [12]. Он считал, что индивидуумы склонны к определенному типу установки и поделил их на группы:

- экстравертная (направленная на восприятие внешнего мира). Для экстравертных социотипов характерной особенностью является концентрация интересов на внешних объектах;
- интровертная (восприятие направленно преимущественно «внутрь себя», фокус на внутреннюю психическую активность).

Рис. 1. Экстравертные социотипы

Описание признаков соционических типов было предложено А. Аугустинавичюте, которая также указывала на необходимость разработки методик определения социотипов [1, с. 37-43].

Разработкой соционических тестов для диагностики типа информационного метаболизма и подробным описанием социотипов занимались известные последователи соционики В.В. Гуленко [5], И.Д. Вайсбанд [3], А.Л. Панченко, Т.Г. Панченко [8] и др.

Для педагогов практическая ценность соционики заключается в понимании того, как строятся отношения между социотипами. Тесты по соционике следует рассматривать как метод и технологию, позволяющие определять психологические типы личности, прогнозировать результат их взаимодействия, оптимально кооперировать рабочие группы в коллективе.

Соционика раскрывает природу совместимости / несовместимости различных типов людей. Есть противоположности, дающие постоянную напряженную конфликтность или погашение активности другого, а есть

дополняющие противоположности, ведущие к уравновешиванию психики человека, к активации его жизни [1, с. 105-106].

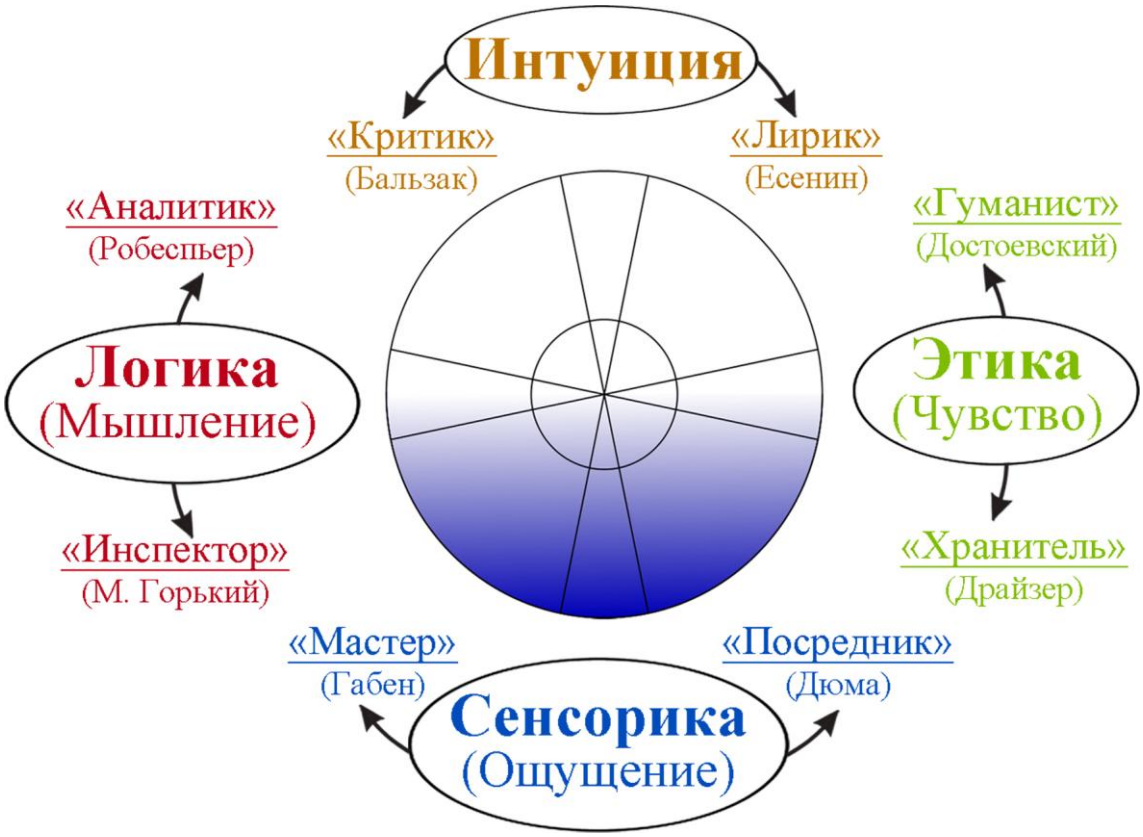


Рис. 2. Интровертные социотипы

Как сложатся взаимоотношения в партнерстве зависит от того, насколько социотипы дополняют друг друга. Рассмотрим интертипные отношения на примере пар с дуальным типом взаимоотношений.

Дуальные отношения – это отношения полного психологического дополнения, являющиеся наиболее эффективными и длительными из всех возможных типов построения партнерских отношений.

Эту особенность дуальной природы человека необходимо учитывать при организации учебно-воспитательного процесса.

В группе студентов формирование дуальных пар является оптимальным для создания положительного психологического фона взаимодействия.

Сообщество совместно действующих людей работает эффективнее, более решительно, целенаправленно и результативно, когда его члены имеют психологическую опору в людях с другим складом восприятия и стилем поведения.

Для создания в большом коллективе саморазвивающейся, эффективно действующей «рабочей группы» необходимым условием является построение квадры.

Согласно классификации В.В. Гуленко, 16 социотипов разделены на 4 квадры [5]:

- *Квадра Альфа* («Искатель» + «Посредник», «Энтузиаст» + «Аналитик»). Представителей этой квадры можно характеризовать словом «Фантазеры». Характерной особенностью является умение мыслить творчески. Такая группа является генератором идей;
- *Квадра Бета* («Маршал» + «Лирик», «Наставник» + «Инспектор») – группа «Воинов». Характеризуется наличием сильной воли и разумностью действий, энтузиазмом и способностью противостоять большей силе;
- *Квадра Гамма* («Предприниматель» + «Хранитель», «Политик» + «Критик») – «Результатёры». Девиз группы: «Сотрудничать и приобретать». Представители этой квадры обладают способностью реализовать задуманное немедленно и умением видеть перспективы;
- *Квадра Дельта* («Администратор» + «Гуманист», «Советчик» + «Мастер») – «Практики». Такая группа способна реализовать продуктивные идеи в полном объеме, до исчерпания их возможностей.

3. Результаты

Применение знаний классификации социотипов рассматривается как инструмент, позволяющий выбирать наиболее эффективные методы взаимодействия с окружающими и получать разнообразный опыт работы в области психологии, педагогики и социологии.

Ряд исследователей отмечают эффективность внедрения методов соционики в образовательный процесс (рис. 3).

Использование методов и технологий соционики в различных направлениях учебно-воспитательной работы способствует повышению эффективности выполнения образовательных задач.

Рациональное применение ТИМ в педагогической практике:

- позволяет моделировать процесс формирования компетенций, как общих, так и профессиональных;
- содействует развитию определенных качеств личности: воли, самоорганизации, ответственности и т.д.;
- повышает осознанность восприятия, мотивирует раскрытие личностного потенциала, задатков, способностей, интересов и склонностей;
- повышает эффективность индивидуальной, групповой формы и самостоятельной работы студентов, позволяет снизить конфликтность в группе;
- обеспечивает качественное выполнение функциональных обязанностей, способствует решению ряда проблемных аспектов.

Указанные формы работы организации обучения играют важную роль в образовательном процессе.

Как отмечает профессор П.В. Стефаненко, «в интересах подготовки высококвалифицированных инженеров самостоятельная работа студентов под руководством преподавателей приобретает значение доминирующего метода обучения в вузе» [9, с. 120-121].

Рис. 3. Использование методов соционики в педагогической практике

Все это, несомненно, приводит к повышению успешности в выполнении учебных задач. Однако необходимо отметить, что эффективность результатов напрямую зависит от уровня профессиональной подготовки и качества деятельности педагогов.

4. Обсуждение результатов

Рассмотрим принцип построения квадры на примере архитектоники квадры Альфа. Под соционической квадрой понимается группа из 4 человек с различными социотипами, но связанными схожими жизненными

ценностями и взглядами на мир. Аспектами, определяющими ценности именно такого союза, являются новые возможности и теории, интеллектуальное творчество. Партнерскую деятельность квадры Альфа следует рассматривать как эпицентр генерации идей.

Входными данными при построении любой квадры являются типы личности. Определить приоритетный способ фильтрации информации, т.е. социотип личности или типировать группу людей, можно, используя различные методики, например: анкетирование, тестирование, или проективное типирование (метод проекции) и многие другие.

Принцип построения квадры предполагает взаимодействие 4 человек с различной доминирующей функцией в одной рабочей группе.

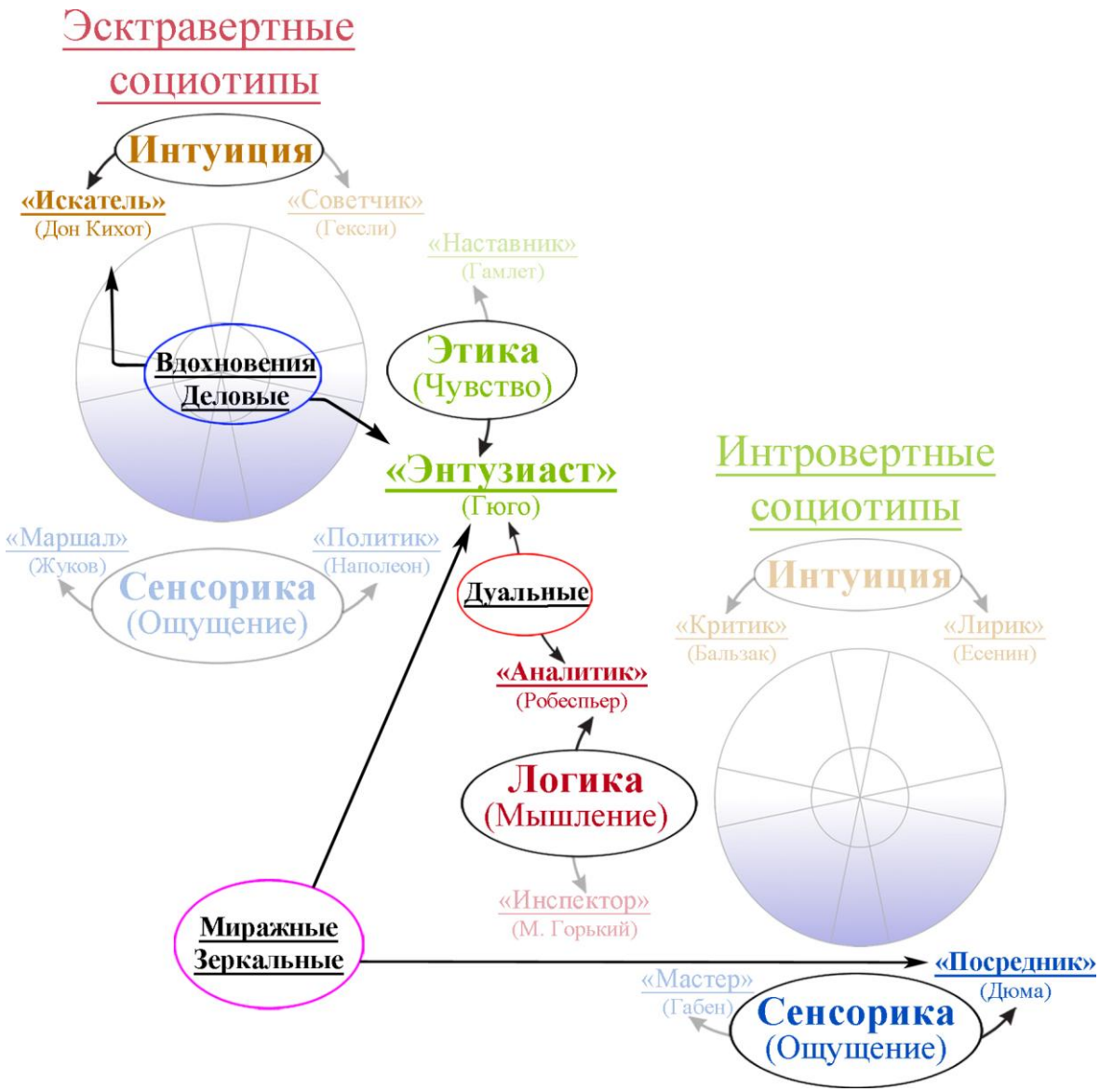


Рис. 4. Архитектоника квадры Альфа и взаимоотношений в ней

Группы следует строить таким образом, чтобы к каждому из участников относилось 3 типа взаимоотношений в квадре:

- дуальные – полное психологическое дополнение;
- активации / деловые – отношения вдохновения, стимуляции активности / делового партнерства;
- зеркальные / миражные – отношения конструктивной критики / психологической разрядки (рис. 4).

Если разбить весь социон на четыре квадры – альфа, бета, гамма, дельта, то в каждой квадре получится по четыре типа. Важное понятие в соционике – это понимание «духа квадры», квадральных ценностей, которые в полной мере раскрывают взаимопонимание между ее представителями [4].

5. Заключение

Для повышения эффективности учебно-воспитательной деятельности необходимо учитывать психологические особенности личности, продумывать многие психологические аспекты – от комфортности общения до эффективного взаимодействия. Использование соционических методов позволяет предвидеть степень информационно-психологической и деловой совместимости людей.

Прикладное значение соционических методов заключается в правильной оценке личностного потенциала, в объективном восприятии возможностей и способностей, нахождении путей самореализации и многое другое.

В связи с этим актуален переход педагогических кадров на новый формат взаимодействия. Это обуславливает необходимость формировать новое поколение педагогов, которые глубоко владеют психолого-педагогическими знаниями и понимают психологические особенности развития личности, способны воздействовать на изменяющуюся социальную ситуацию, правильно оценивать и моделировать ход ее развития. Такой компетентный психолого-педагогический подход поможет студентам найти себя в будущей профессии, стать самостоятельными, творческими и уверенными в себе людьми, достичь высоких жизненных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аугустинавичюте А. Соционика: Введение / Сост. Л. Филиппов. – М.: Фирма «Издательство АСТ»; СПб.: Terra Fantastica, 1998. – 448 с.
2. Букалов А.В. Соционика – новый подход к пониманию человека и общества // Соционика, ментология и психология личности, 1996. – №1, С. 2–5.
3. Вайсбанд И.Д. 5000 лет информатики. – М.: Черная белка, 2009 – 352 с.

4. Гуленко В.В. Квадры и их социально-психологические особенности // Соционика, ментология и психология личности, 1995. – № 1. – С. 25–30.
5. Гуленко В.В. Менеджмент слаженной команды: Соционика и социоанализ для руководителей. – М.: Астрель, 2003. – 282 с.
6. Ермак В. Д. Как научиться понимать людей. – М.: Астрель, 2003. – 523 с.
7. Кемпинский А. Экзистенциальная психиатрия. М.-СПб.: Совершенство; Унив. книга, 1998. – 318 с.
8. Панченко А.Л., Панченко Т.Т., Красноперова Н.Л. Введение в соционику. – Барнаул: ИПКиММ, 1993. – 171 с.
9. Стефаненко П.В. Пути активизации самостоятельной работы студентов. Образование и наука в современных условиях // матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 09 окт. 2015г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 4(5). – С. 120–121.
10. Фунтиков М.Н. Анализ использования средств информационно-коммуникационных технологий в формировании современной доктрины инженерного образования // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4(4). – С. 59–65.
11. Шнейдерман Б. Психология программирования: человеческие факторы в вычислительных и информационных системах. – М.: «Радио и связь», 1984. – 304 с.
12. Jung C.G. Psychological Types, Collected Works of C.G. Jung, Vol.6. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1971. – 608 p.

M.N. Funtikov

IMPROVING THE EDUCATIONAL WORK BASED ON THE THEORY OF INFORMATION METABOLISM

Donetsk National Technical University, Donetsk People's Republic

Abstract

The article provides the essence of the theory of information metabolism (TIM); the basic concepts of psychological types which are based on the classification of personality types of C. Jung are revealed; methods and technologies of practical use of socionics in pedagogical work are given; the importance of TIM implementation in the educational process is shown.

Key words: educational psychology, intertype relationships, features of perception, mental processes, socionic quadra, sociotype, the theory of information metabolism.

REFERENCES

[1] Augustinavichyute A. Socionics: Introduction. Ed. by L. Filippov. Moscow: ACT publ.; Saint-Petersburg: Terra Fantastica, 1998. 448 p. (rus.)

[2] Bukalov A.V. Socionics – is a new approach to the understanding of the individual and society. Socionics, Mentology and Personality Psychology, no. 1 (1996): 2–5. (rus.)

[3] Vaysband I.D. 5000 years of Informatics. Moscow: Black Squirrel, 2009. 352 p. (rus.)

[4] Gulenko V.V. Quadras and their socio-psychological features. Socionics, Mentology and Personality Psychology, no. 1 (1995): 25–30. (rus.)

[5] Gulenko V.V. Management of coordinated team: Socionics and socioanalysis for managers. Moscow: Astrel, 2003. 282 p. (rus.)

[6] Ermak V.D. How to learn to understand people. Moscow: Astrel, 2003. – 523 p. (rus.)

[7] Kempinskiy A. Existential psychiatry. Moscow: Perfection, Saint-Petersburg: University book, 1998. 318 p. (rus.)

[8] Panchenko A.L., Panchenko T.T., Krasnoperova N.L., Introduction to socionics. Barnaul: IPKMM, 1993. 171 p. (rus.)

[9] Stefanenko P.V. Ways of enhancing students' independent work. Education and science in modern conditions. Mater. V International scientific-practical conf. (October 9, 2015), Cheboksary: Scientific Cooperation Center «Interactive plus», no. 5 (2015): 120–121. (rus.)

[10] Funtikov M.N. Assessing Results of Information and Communication Technologies Used in Modern Engineering Education System // // Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management: Scientific Journal. – Donetsk, 2015. Issue 4 (4). Pp. 59–65. (rus.)

[11] Shneiderman B. Software Psychology. Moscow: Radio & Communication, 1984. – 304 p. (rus.)

[12] Jung C.G. Psychological Types, Collected Works of C.G. Jung, Vol. 6. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1971. 608 p.

УДК 378:004.056 ; DOI 10.1872/MMF-2016-133

И.Л. Щербов

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В СФЕРЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ ВООРУЖЕННОГО КОНФЛИКТА В РЕГИОНЕ

Игорь Леонидович Щербов, декан факультета пожарной безопасности, радиотехники и защиты информации
Донецкий национальный технический университет
Донецк
E-mail: schil@pb.dgtu.donetsk.ua

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы организации учебного процесса студентов образовательного учреждения высшего профессионального образования в условиях активных боевых действий в регионе. Сформулированы цели и задачи административного управления в особых условиях и порядок их выполнения. Рассмотрен вклад профессорско-преподавательского состава и студенческого коллектива в процесс организации учебно-воспитательного процесса. Представлен электронный учебно-методический комплекс, применявшийся для обучения студентов в дистанционном режиме. Проведен анализ эффективности его использования.

Ключевые слова: организация учебного процесса, электронный учебно-методический комплекс, дистанционное обучение.

В июле-августе 2014 года на Донбассе развернулись активные боевые действия. В результате одного из артиллерийских обстрелов пострадал главный корпус Донецкого национального технического университета. По этим причинам учебный год был начат только в октябре, когда обстрелы частично прекратились, и коллектив факультета радиотехники и специальной подготовки (так он назывался до ноября 2014 года) сразу же столкнулся с трудностями в организации учебного процесса, основными из которых были: утрата учебного корпуса и как следствие утрата почти всей учебно-материальной базы (три компьютерных класса, радиотехническое оборудование и измерительные приборы, лабораторные стенды и др.); утрата факультетской библиотеки (более 4 тысяч изданий) и учебно-методического обеспечения; постоянные перебои с подачей электроэнергии и доступом в сеть Интернет и др.

Как следствие этого перед руководством университета появились первоочередные задачи: организация дистанционного обучения студентов,

не имеющих возможности прибыть на аудиторные занятия в университет из-за систематически возобновляющихся артиллерийских обстрелов, и восстановление аудиторного фонда, учебно-материальной базы, учебно-методического и информационного обеспечения учебного процесса.

В связи с тем, что учебный корпус, в котором до начала боевых действий, располагался факультет, в силу сложившихся обстоятельств не мог быть использован в учебном процессе, ректоратом университета было принято решение о предоставлении в распоряжение факультета одного из учебных корпусов, который ранее практически не использовался. Студенты и преподаватели, не считаясь с личным временем, работают на восстановлении учебно-материальной базы университета, принимают активное участие в волонтерском движении.

Переломным моментом в решении многих вопросов, связанных с организацией учебного процесса стало 24 октября 2014 года. В этот день на базе факультета радиотехники и специальной подготовки по инициативе декана данного факультета профессора П.В. Стефаненко был создан Институт гражданской защиты Донбасса. Перед коллективом встала новая задача – не только восстановить учебный процесс по имеющимся направлениям подготовки, но и открыть новое направление «Техносферная безопасность» (профиль подготовки «Защита в чрезвычайных ситуациях»), а также новую специальность «Пожарная безопасность». Создание Института гражданской защиты Донбасса позволило не только сохранить рабочие места для профессорско-преподавательского составы и учебно-вспомогательного персонала, но и открыть новые.

В результате проведенной работы в 2015 году план приема по новому направлению и специальность на первый курс обучения очной и заочной формы был выполнен на 100 % и в Институте, как и в университете в целом, возникла острая необходимость в организации дистанционного обучения студентов.

Необходимо отметить, что на кафедрах университета уже довольно широко применялись автоматизированные обучающие системы, которые позволяют значительно повысить качество обучения студентов, активность и эффективность учебного процесса, в полном объеме развернуть потенциал дидактического моделирования [6, с. 149].

На сегодняшний день существует достаточное количество автоматизированных систем дистанционного обучения, таких как Blackboard, EdX, Udacity, Moodle, Canvas, Udemy. Достоинства и недостатки данных систем, их возможности детально рассмотрены в работе [2, с. 42].

Методические проблемы создания и использования автоматизированных обучающих систем в учебном процессе технического вуза освещены в работах С.И. Архангельского, В.П. Беспалько,

П.В. Стефаненко, А.В. Хуторского, П. Юцявичене и др., однако в 2014-2015 учебном году, из-за непрекращающихся обстрелов, применение подобных систем не представлялось возможным ввиду перебоев с подачей электроэнергии, прерыванием связи и отсутствием сети Интернет. В этих условиях существенная роль в организации учебного процесса была отведена применению электронных учебных пособий и учебников.

При подготовке специалистов в сфере информационной безопасности было использовано электронное учебное пособие «Системы технической защиты информации», которое является составной часть учебно-методического комплекса дисциплины (рабочее окно программы представлено на рис. 1). Создание электронных учебно-методических комплексов позволяет преподавателю оперативно формировать и редактировать содержание того или иного курса, создавать новые курсы программно-инструментальными средствами [3, с. 50].

Учитывая указанные преимущества электронных учебно-методических комплексов, преподаватели кафедры радиотехники и защиты информации смогли не только сформировать необходимый уровень профессиональных знаний у студентов, в столь сложных условиях, но и выявить и устранить имеющиеся недостатки в разработанных электронных учебно-методических комплексах.

Рис. 1. Рабочее окно электронного учебного пособия по дисциплине «Система технической защиты информации»

При создании учебно-методических комплексов авторы руководствовались тем, что добывать знания, и овладевать ими студенты должны главным образом самостоятельно, но под руководством преподавателя. Таким образом, в интересах подготовки высококвалифицированных инженеров самостоятельная работа студентов под руководством преподавателей приобретает значение доминирующего метода обучения [7, с. 120].

Именно поэтому рассматриваемый электронный учебно-методический комплекс содержит в себе все необходимые составляющие, позволяющие студенту самостоятельно изучать учебный материал.

В его состав входят разделы, включающие общую информацию о целях и задачах дисциплины, ее взаимосвязь с другими дисциплинами читаемого курса, объем часов отводимых на аудиторные занятия и самостоятельную подготовку, а также предусмотренные межсессионные аттестации и критерии оценки знаний.

Основная часть представляет собой конспект лекций, рекомендации по выполнению лабораторных, практических занятий, курсового проекта и самостоятельной работы.

Справочная составляющая учебного пособия представлена разделами содержащими термины и определения, списком рекомендованной литературы и вопросами для осуществления самоконтроля.

Раздел «Проверка знаний» позволяет студенту в виде теста провести проверку и оценку знаний по изученному материалу.

При создании электронного учебно-методического комплекса, авторы придерживались концепции, которая направленна на формирование у студентов профессиональной компетентности, связанной с его будущей профессиональной деятельностью.

Компетентность – это совокупность компетенций; наличие знаний и опыта, необходимых для эффективной деятельности в заданной предметной области [1].

Для формирования компетентности будущего специалиста, в процессе обучения необходимо сформировать у него определенные государственным стандартом компетенции, которые подразумевают умение применять знания, умения, навыки и личные качества для успешного решения возникающих проблем в ходе выполнения профессиональных задач и в жизненных ситуациях [5, с. 81].

Формирование этих компетенций осуществляется при изучении дисциплин профессиональной и практической подготовки, таких как: делопроизводство и организация защиты конфиденциальной информации; методы и средства защиты информации; проектирование систем защиты информации; организационное обеспечение технической защиты информации; технические средства охраны объектов; безопасность информационных и телекоммуникационных систем; криптография и стеганография; управление информационной безопасностью и др. [10, с. 161]. Учитывая, что формирование вышеуказанных компетенций невозможно без междисциплинарной взаимосвязи, в предлагаемом электронном учебно-методическом комплексе студентам предоставляется возможность моделировать построение системы защиты информации на объекте информационной деятельности, основываясь на знаниях, полученных в различных курсах специальных дисциплин.

Например, вопросы оценки уязвимости активов и принятия риска более детально рассматриваются при изучении дисциплины «Управление информационной безопасностью». При этом решение по оценке

уязвимости активов лежит в основе принятия решения на построение системы защиты информации на объекте информационной деятельности, вопросы построения которой рассматриваются в курсе дисциплины «Системы технической защиты информации». На рис. 2 представлено окно программы, входящей в электронный учебно-методический комплекс, которая позволяет студентам провести оценку уязвимости активов информационно-телекоммуникационной системы от вероятных угроз [9, с. 17], чтобы сформулировать решение на организацию защиты информации.

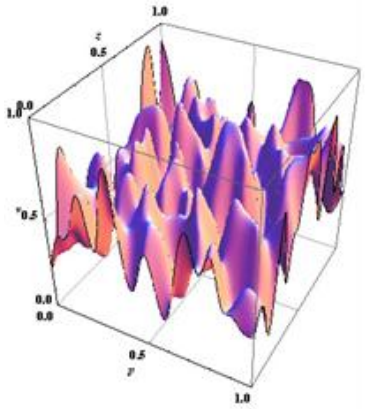


Рис. 2. Поверхность уязвимости активов от вероятных угроз

Необходимо отметить, что в использование в учебном процессе электронных учебно-методических комплексов способствует развитию самостоятельности мышления у студентов и влияет на формирование у них положительной мотивационной установки на решение, в том числе, и творческих задач [8, стр. 254].

Подводя итоги особенности подготовки специалистов в сфере информационной безопасности в условиях вооруженного конфликта в регионе можно сделать вывод, что коллектив Института гражданской защиты Донбасса в целом справился с возникшими трудностями организации учебного процесса. Этому способствовали сплоченность коллектива сотрудников и студентов, стремление всех не только сохранить систему высшего профессионального образования в регионе, но и приумножить, открывая новые специальности и направления подготовки специалистов в соответствии с вновь возникшими потребностями в высококвалифицированных кадрах.

Благодаря применению электронных учебно-методических комплексов в процессе вынужденного дистанционного обучения, обеспечить достаточный уровень знаний у студентов, который позволил им при возвращении в аудитории успешно осваивать программу подготовки в соответствии с планом учебного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Академик: словари и энциклопедии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1526590 (Дата обращения: 04.04.2016 г.).
2. Бочков А.Л. Использование LMS-систем для дистанционного обучения / А.Л. Бочков // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 1308 с.
3. Голдобина Л.А. Использование электронных учебно-методических комплексов при изучении графических дисциплин / Л.А. Голдобина, А.Л. Бочков// Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 1308 с.
4. Последствия обстрела Донецкого национального технического университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=dlFbvsEbkbg&list=TLaedddFYMgwk&index=8 (Дата обращения: 04.04.2016 г.).
5. Стефаненко П.В Методичний підхід до формування компетентнісної моделі військових фахівців // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Педагогіка, психологія і соціологія. Вип. 2 (14). – Донецьк, ДонНТУ, 2013. С. 79–84.
6. Стефаненко П.В. Методические проблемы использования автоматизированных обучающих систем в учебном процессе технического ВУЗа / П.В. Стефаненко // История и перспективы развития транспорта на севере России: сборник научных статей / Под ред. проф. О.М. Епархина, Ярославль: изд-во «Министерство печати», 2015. – С. 145–149.
7. Стефаненко П.В. Пути активизации самостоятельной работы студентов / П.В. Стефаненко // Образование и наука в современных условиях : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 09 окт. 2015 г.) / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 4 (5). – С. 120–121.
8. Стефаненко П.В. Стимулирование познавательной самостоятельности студентов технических вузов как средство активизации их учебной деятельности / П.В. Стефаненко // Инновационные тенденции развития системы образования: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 5 февр. 2016 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – С. 253–255.
9. Щербов И.Л. Методика определения экспертных оценок уязвимостей активов информационно-телекоммуникационных систем от вероятных угроз / И.Л. Щербов // International Academy of Science and Higher Education «Target and procedural aspects of scientific and technical progress at the beginning of the XXI century». – London: Published by IASHE, 2015. – P. 16–19.
10. Щербов И. Л. Методические основы разработки дидактического комплекса информационного обеспечения учебных дисциплин для подготовки в вузе будущих специалистов информационной безопасности / И. Л. Щербов //

История и перспективы развития транспорта на севере России. Сборник научных статей / Под ред. проф. О.М. Епархина, Ярославль: изд-во «Министерство печати», 2015. – С. 160–164.

I.L. Scherbov

SPECIAL ASPECTS OF SPECIALISTS TRAINING IN INFORMATION SECURITY IN CONDITIONS OF ARMED CONFLICT IN REGION

Donetsk National Technical University, Donetsk

Abstract

Issues of educational process organization for students of higher educational institute in conditions of active situation in region are considered. Objectives and tasks of administrative management in special conditions and order of its execution are stated. Consideration is given to input of higher-education teaching personnel and students into organization of education/bringing-up process. Electronic teaching materials used for students' online training are provided. Analysis of its efficiency is performed.

Keyworlds: Organization of educational process, electronic teaching materials, online training.

REFERENCES

[1] Academic: dictionaries and encyclopedias. [Digital resource]. Access mode: http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1526590 (date: 04.04.2016 г.) (rus.)

[2] Bochkov, A.L.. Usage of LMS-systems for online training / A.L. Bochkov // Modern Mechanical Engineering: Science and Education: materials of 4th International research and practice conference / under the editorship of M. Radkevich and A. Evgraphov. St. Petersburg: Polytechnic University edition, 2014. 1308 p. (rus.)

[3] Goldobina, L.A. Use of electronic training complex in studying graphic disciplines / Goldobina L.A., Bochkov A.L. // Science and Education: materials of 4th International research and practice conference / under the editorship of M. Radkevich and A. Evgraphov. – St. Petersburg: Polytechnic University edition, 2014. 1308 p. (rus.)

[4] Consequences of artillery attack of Donetsk National Technical University [Digital resource]. – Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=dlFbvsEbkbg&list=TLaedddFYMgwk&index=8 (date 04.04.2016 г.) (rus.)

[5] Model of Military Experts // Donetsk National Technical University scientific works.: Series: Education, psychology and sociology. Edition 2 (14). Donetsk, Donetsk National Technical University, 2013. Pp. 79–84. (ukr.)

[6] Stefanenko, P. Methodological problems of automated educational systems usage in teaching and learning activities in technical university / Stefanenko P. // History and development prospects of transport in the North of Russia: collection of scientific articles / under the editorship of Professor O. Eparhin, Yaroslavl: publishing office «Ministry of press», 2015. Pp. 145–149. (rus.)
[7] Stefanenko, P. Methods of activation of students self-development / Stefanenko P.// Education and science under modern conditions: materials of V International research and practice conference. (Cheboksary 09 of October 2015 г.) / ed.: O. Schirokov [and others]. – Cheboksary: Science cooperation center «Interactive-plus», 2015. № 4 (5). Pp. 120–121. (rus.)
[8] Stefanenko, P. Encouragement of educational self-support of the students of technical university as a means of activation of their learning activity / Stefanenko P.// Innovation trends of educational system development : materials of V International research and practice conference. (Cheboksary, 5 of February 2016) / ed.: O. Schirokov [and others]. – Cheboksary: Science cooperation center «Interactive-plus», 2016. Pp. 253–255. (rus.)
[9] Shcherbov, I. Methodology of expert estimation determination of telecommunication systems assets exposure from possible treats / Shcherbov I. // International Academy of Science and Higher Education «Target and procedural aspects of scientific and technical progress at the beginning of the XXI century». London: Published by IASHE, 2015. Pp. 16–19. (eng.)
[10] Shcherbov, I. Basic requirements for organization of the educational process aimed at enhancing the level of professional training of future specialists in information security / Shcherbov I. // History and development prospects of transport in the North of Russia: collection of scientific articles / under the editorship of Professor O. Eparhin, Yaroslavl: publishing office «Ministry of press», 2015. Pp. 160–164. (rus.)

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А
Абдыкеров Ж.С. 1188
Аксенов Л.Б. 2, 1062
Александров С.Е. 486
Александрова О.Ю. 1201
Алтапова А.Е. 1298
Аман Е.Э. 368
Амельченко Н.А. 990
Андриенко П.А. 172
Аракчеев Е.Н. 598
Артёмова А. Ю. 1308
Атанасова С.И. 12
Афанасьева И.Б. 19, 33
Ашейчик А.А. 318

Б
Бабичев Д.Т. 328
Батуев В.В. 1211
Башкарев А.Я. 340, 857
Белова С.Б. 1040
Белогур В.П. 350
Белоусов К.И. 1329
Блинов Л.Н. 43
Бойко Н.И. 54
Бойцев А.В. 785
Болобов В.И. 1018
Борина А.П. 182
Боталов А.С. 1237
Бочкарева Ю.В. 1389
Бочков В.С. 1018
Бреки А.Д. 486
Брунман В.Е. 611
Брунман М.В. 598, 1320
Брюс Ф.О. 1320
Букреев В.В. 340
Буляница А.Л. 64, 1329
Бундур М.С. 1028
Бурлуцкий В.С. 795
Буханченко С.Е. 1219, 1228

В
Валеева Р.М. 1277
Варгасов Н.Р. 1075, 1088
Васильев А.К. 733
Васильев В.Е. 72
Васильев М.Н. 43
Ватаев А.С. 611
Видинеева Н.Ю. 1000
Винокуров Н.В. 1237
Войнов И.Б. 1357
Волков А.Н. 611
Воробьев Н.С. 634
Воробьева Г.А. 1097
Востров В.Н. 1106
Вульфсон И. И. 191

Г
Гайдарь О.Г. 848
Галиуллин И.А. 287
Галышев Ю.В. 583
Гедько П.Ю. 619
Годлевский В.А. 359
Голованов В.В. 402
Головкин А.В. 1111
Голубков В.А. 368
Гомера В.П. 376
Григорьев И.И.250
Гукасян С.Г. 402

Д
Давыденко Л.В. 1040
Давыдова Д.М. 1337
Девяткин В.А. 1251
Демидов Н.Н. 898
Добрецов Р.Ю. 898
Долгая Н. А. 98
Дорофеев В. Л. 390, 402
Дорофеев Д.В. 402
Дьяченко В.А. 598, 1320
Дьячкова И.В. 1211
Дяшкин-Титов В.В. 634

Е
Евграфов А.Н. 203
Евсиков А.А. 946
Евстрапов А.А. 1329

Егоров Е.Н. 1040
Егорова О.В. 250
Егорова Ю.Б. 1040
Ежова Н.В. 72
Елисеев В.В. 413, 421
Елисеев К.В. 810
Елкина С. 770
Ермолаев М. М. 464
Ермолаев М.М. 453

Ж
Жавнер В.Л. 645, 723
Жавнер М.В. 499
Жога В.В. 654
Жуков В.А. 431
Жуков И.А. 540
Жуков Э.Л. 924
Журавлев А.А. 521

З
Заморёнов М.В. 820
Замятина О.М. 1188
Здор Г.Н. 1150
Зиеп Хоанг Фи 665, 677
Зиновьева Т. В. 442

И
Иванов А. С. 453, 464, 476
Иванова Е.В. 1120
Иванова Н.С. 81
Ивановский Д.К. 583
Исянов И. Р. 297

К
Кадулин Р.В. 1237
Казаков Н. 770
Калашникова О. А. 1130
Каразин В.И. 172, 216
Карманов В.В. 1237
Катаев Я.А. 1251
Князева Е. В. 19
Ковалев Д.Н. 376
Козарь И.И. 936
Козин М. 866
Козликин Д.П. 216
Коковин В.А. 946
Кокорин М.С. 33
Колодяжный Д.Ю. 936, 1357
Кольцова М.С. 971
Кондратьева Г. А. 107
Коняшин А.В. 598
Копосова И.В. 1399
Копп В.Я. 820
Косова В. А. 1337
Красильникова Г. А. 81, 90
Крыжановская И.М. 81
Крылов Н.А. 486, 530
Крюков А.Ю. 1287
Крюков В. А. 230
Кудрявцев В.Н. 1160
Кузнецов Р.В. 1142
Кузьменко Д.Н. 687
Кузьмичев И.С. 1178
Кукаленко Б.Д. 568
Кулеш А.А. 350
Кункин С.Н. 1062
Купряшкин В. Ф. 107
Куц М.С. 476
Кушниренко Е.Н. 1347
Кущенко А.В. 340

Л
Лагунова М.В. 72
Лазарев Е.А. 687
Ларин М.Ю. 820
Ларионов Е.О. 936
Ларионова Т.А. 924
Лобачев А.А. 831
Лозин А.В. 898
Лопатина Е.А. 733
Лоськов К.О. 1106
Лукьяненко И.Н. 368
Любомудров С. А. 954

М
Макарова Т. А. 954
Макеев А.Б. 1261
Максютина Е.В. 1111
Маленков М.И. 687
Мамутов В.С. 1150
Манжула К. П. 841
Марков В.В. 359

Маркова Т. В. 90, 98
Масленников Д.А. 848
Мацко О.Н. 645
Медведев Е.Л. 1120
Медведева В.В. 486
Мозгалева А.И. 1188
Мордвин М.А. 1201
Москалец А.А. 413
Мудров А.П. 297
Мусияко Д.В. 857

Н
Нагорный В.С. 1357
Наумкин Н.И. 107, 115
Наумов А.В. 841
Несмиянов И.А. 715
Нефедьев Е.Ю. 376
Никитина К.В. 723
Никитина Т.А. 98, 125
Николов А. 770
Никонова А.М. 1261
Новиков В.И. 1160
Новикова Е. В. 134
Носова Д.А. 1367
Нургалин Р.Р. 1287
Нуртдинов А.С. 1269
Нуянзин Е. А. 115

О
Осипович Д.А. 1261

П
Паневин С. С. 954
Папина Ю.В. 1188
Пашнёв В.А. 971
Пелевин Н.А. 1028
Пелупесси Д. С. 499
Петжак 866
Петкова А.П. 598, 611
Петров А.В. 981
Петров Г.Н. 203
Пешков В.С. 857
Пивкин Д. В. 107
Пименов Д.Ю. 971
Пичкарь С.В. 1379
Плавник С.Л. 924
Позынич Е.К. 795
Позынич К.П. 795
Полищук М.Н. 665
Полищук М.Н. 677, 744
Полонский В. Л. 318, 559
Попов А.И. 1160
Попов А.Н. 733, 744
Посмитная Я.С. 1329
Прозорова М.А. 1120
Прокопенко В.А. 1028
Пугачёва А.Е. 1219
Пуленец Н.Е. 73 3
Пухлий В.А. 510, 521

Р
Радкевич М.М. 1075, 1088, 1142, 1160, 1170
Райчик И. 878
Райчик М. 866
Райчик П. 878
Раменская Е.В. 990
Руднев С.К. 453

С
Самойлова М.В. 250
Сачков М.Ю. 550
Седлер М.И. 1298, 1367, 1379, 1389, 1399
Семашко Н.А. 350
Семенов Ю.А. 1052
Семенова Н.С. 1052
Сидоров А.А. 583
Симонов М.Ю. 1237
Синицына Ю. В. 464
Скакунов В.Н. 654
Складнова Е.Е. 1097
Скотникова М.А. 530
Смирнов А.Б. 665, 677
Смирнов А.Д. 376
Смирнова И.С. 81, 125
Снегирева А.В. 1201
Соколов И.А. 43, 157
Соколов С.А. 888
Сотников А. Л. 242
Степанов С.Н. 1000, 1008
Степанов С.С. 1008

Стефаненко П. В. 144
Стукач А.В. 340
Суханов А.А. 216, 756
Сырейщикова Н.В. 971

Т
Танцура Н.П. 157
Тарасов С.Б. 981
Терехов С.Е. 634, 654
Терешин В.А. 182, 216
Тимофеев А.Н. 744
Тимофеев Б.П. 550
Тимофеев Г.А. 250
Тимофеев Е.Г. 540
Третьяков В.М. 264
Трофимов В.Н. 1269
Туктамышев В.Р. 1251, 1287
Тюрин А.П. 559
Тюхтяев М.И. 1160

У
Ушомирская Л.А. 1178

Ф
Федоров В.В. 1228
Филиппенко Г.В. 276
Филиппов А.Н. 898
Филиппов Ю.А. 990
Фомин Д.Ю. 1170
Фунтиков М.Н. 1409

Х
Хабибуллин Р. А. 857
Хабибуллин Ф.Ф. 306
Хлебосолов И.О. 172
Хлебосолов И.О. 216

Ч
Чеканин А.В. 913
Чеканин В.А. 913
Чиркин А. В. 464
Чулкин С.Г. 568
Чупин С.А. 1018

Ш
Шабанов А.Ю. 583
Шаламов П.В. 1277
Шарипова К.Р. 1287
Швалев А.С. 1120
Шевченко Е.Б.54
Шестопалов А.А. 785
Ширяев А.А. 1269

Щ
Щербанский А.П. 1228
Щербов И.Л. 1420

Я
Яруллин М. Г. 287, 297, 306