ISSN 2223-0807

Министерство образования и науки РФ
Союз машиностроителей России
Межрегиональный союз научных, инженерных общественных объединений
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

Материалы 4-й Международной научно-практической конференции

19 – 20 июня 2014 года

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2014

УДК 378.1: 621.01

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. – 1306 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.

© М.М. Радкевич, А.Н. Евграфов, 2014

Научные редакторы

Михаил Михайлович Радкевич
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: radmich@mail.ru

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

Программный комитет

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

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

Проф. Л.Б.Аксенов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. T.Březina, University of Technology, Brno, Czech Republic,

Проф. С.Н.Бъчваров, Технический университет, София, Болгария,

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

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

Проф. Д.В.Волошинов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. В.А.Дуболазов, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. К.А.Зиборов, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина,

Проф. В.Д.Златанов, Университет пищевых технологий, Пловдив, Болгария,

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

Проф. М.И.Куколев, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

Проф. С.А.Любомудров, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия,

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

Проф. M.Ceccarelli, University of Cassino and South Latium, Italy,

Проф. V.Singule, University of Technology, Brno, Czech Republic,

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

Проф. M.Piska, University of Technology, Brno, Czech Republic,

Проф. Н.Н.Шабров, СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

Л.Б. Аксенов
Клиповое мышление: гениальность или деменция 3

Е.Л. Альшакова
Модельно-ориентированное проектирование в инженерном образовании на примере учебного процесса дисциплины «инженерная графика» 10

И.Б. Афанасьева, Е.В. Князева
Организация самостоятельной работы студентов 20

И.Б. Афанасьева, М.С. Кокорин
Формирование интеллектуальных умений учащихся в практике преподавания курса геометрического моделирования 30

А.Л. Бочков
Использование LMS-систем для дистанционного обучения 42

Л.А. Голдобина, А.Л. Бочков
Использование электронных учебно-методических комплексов при изучении графических дисциплин 49

А.Д. Касатиков, А.М. Лейбов, О.М. Осокина
Современные информационные технологии в педагогическом процессе технологических факультетов педагогических вузов 60

М.В. Лагунова, Н.В. Ежова
Интерактивный подход в дистанционном преподавании курса математики студентам механико-машиностроительного направления 67

Н. И. Лобкова, Ю.Д. Максимов, Ю.А.Хватов
Учебное пособие по математике для студентов технических направлений подготовки 72

О.В. Мкртычев
Введение факультативных курсов для базовых фундаментальных дисциплин 78

Н.И. Наумкин, Е.А.Нуязин
Формирование у бакалавров национальных исследовательских университетов профессиональной компетенции и ее оценка с применением БРС 85

Т.А. Никитина, И.С. Смирнова
Особенности разработки контрольно-измерительных материалов по дисциплине «Инженерная графика» 92

М.М. Радкевич, Е.Н. Крупкина
Особенности подготовки бакалавров по программе непрерывного обучения "КОЛЛЕДЖ - ВУЗ" 101

Ю.А. Семенов, Н.С. Семенова
Статический анализ плоских рычажных механизмов 107

МЕХАНИКА МАШИН

П.А. Андриенко, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов
О комплексном подходе к лабораторным испытаниям навигационных систем 121

А.П. Борина, В.А. Терешин
Возможности управления двуногим шагающим аппаратом с помощью уравнений перевернутого маятника 131

В. П. Верховод
Кинематическая геометрия и синтез прямолинейно-направляющих механизмов в системе GEOGEBRA 141

В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов
Силовой анализ статических режимов работы манипулятора-трипода 154

В. Л. Дорофеев
Инвариантное преобразование параметров исходного контура, как основа прямого синтеза зубчатых передач 163

В.Л Дорофеев, В.В. Голованов, С. Г. Гукасян
Модификация авиационных зубчатых передач с целью уменьшения износа контактной поверхности 173

А. Н. Евграфов, Г.Н. Петров
Выбор приводов многоподвижного механизма с избыточными входами 184

В. Д. Златанов
Стационарные колебания в двухмассовом машинном агрегате с карданной передачей 192

В.И. Каразин, Д.П. Козликин, А.А.Суханов, И.О.Хлебосолов
Об одной схеме устойчивого динамического разгружения центробежных сил 203

М.Д. Ковалёв
Шарнирные конструкции невосстановимые по внутренним напряжениям 217

П. А. Коновалова, В.А. Терешин
Фильтр Винера для активной виброзащиты двухмассовой упруго-диссипативной системы 227

Ф.Р. Нигматуллина, В.А. Терешин
Кинематическое исследование телескопа 237

Г.В. Филиппенко
Колебания резервуаров и цилиндрических опор гидротехнических сооружений, частично погруженных в жидкость 247

М.Г. Яруллин, И.А. Галиуллин
Исследование кинематики звеньев модификаций механизма Брикарда 260

М.Г. Яруллин, М.Р. Мингазов
Синтез структурных модификаций механизма Беннетта 271

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

А.А. Ашейчик, В. Л. Полонский
Определение энергии активации эластомеров экспериментально-теоретическим методом 283

M.R.Bahrami
A novel design of electrical transmission line inspection machine 292

Е.В. Березина, В.А. Годлевский, А.Г. Железнов, Д.С. Фомичев
О различии механизмов смазочного действия металлополимерных комплексов и гетероциклических соединений, применяемых в качестве трибоактичных присадок 299

А. Д. Бреки
Закономерности обобщённого треугольника паскаля, связанные с фрикционным взаимодействием материалов 309

А. Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков
Общие свойства и особенности взаимодействия дисперсных компонентов смазочного материала 319

А. Д. Бреки, О.В. Толочко, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков
Влияние антифрикционных дисперсных материалов на относительную опорную длину профиля поверхностей трения деталей 327

В. В. Елисеев, А. И. Авксентьев
Модели упругих стержней в динамике гибких роторов 335

В.В.Елисеев, А.А. Москалец
Колебания турбинных лопаток как естественно закрученных стержней 344

В.В. Елисеев, Е.А. Оборин
Моделирование и расчет противотаранного шлагбаума 351

М.М. Ермолаев, А.С. Иванов
Соединение с натягом, нагруженное осевой и радиальными силами, крутящим и изгибающими моментами 358

В.А. Жуков
Коррозионное растрескивание под напряжением и электрохимические параметры титановых сплавов 370

А.С. Иванов, М.М. Ермолаев, С.В. Муркин
К расчёту и конструированию современных мотор-редукторов 377

А.С. Иванов, С.В. Муркин
Методика расчета резьбового соединения, нагруженного произвольной системой сил и моментов 389

В.М.Медунецкий, Е.В.Шалобаев, Р.Р.Магдиев, К.Н.Заикин, Д.Г.Суриков
Упрочнение функциональных поверхностей для повышения надёжности и работоспособности малогабаритных зубчатых передач 400

Е.Ю. Нефедьев, А.Д. Смирнов, В.П. Гомера
Разработка методических приемов для повышения эффективности АЭ контроля теплообменников 408

В. А. Пискунов
О прочности конструктивных элементов пневматического линемета 419

С.К.Руднев, А.С. Иванов, М.М. Ермолаев
Исследование и расчет собственных частот колебаний резьбовых соединений 425

M.A. Skotnikova, A.A. Lanina, N.A. Krylov, G.V. Tsvetkova, N.V. Bezenkin
Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect 433

В.М. Третьяков
Применение узлов сопряжения при проектировании изделий 443

А.П.Тюрин, В.Л.Полонский
Прогнозирование изменения технического состояния изделий с помощью нелинейных математических моделей 454

А.В. Чиркин, А.С. Иванов, М.М. Ермолаев
Планетарно-цевочные передачи на основе эпициклоидального и гипоциклоидального зацеплений 462

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

А.В. Борисевич, Д.В. Глебко
Бездатчиковое векторное управление шаговым двигателем на основе расширенного фильтра Калмана 473

В. В. Ваганов, К. П. Колтышев
Исследование особенностей реализации информационной технологии “Web to print” 485

В. В. Ваганов, К.А. Котов
Поиск оптимального технологического пути на полиграфическом производстве с использованием автоматизированных систем управления 494

В.А.Дьяченко, М.И.Маленков, Д.В.Сидоров
Поисковые дизайн-проекты планетоходов и интерьеров космических станций 501

В.Л.Жавнер, О.Н.Мацко
Рекуперативные приводы для цикловых перемещений с пневматическими компенсаторами диссипативных сил 513

П. В. Маков
Тенденции развития автономных систем управления автомобилем без участия водителя 522

С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец
Исследование точности центробежного стенда в динамических режимах работы 532

М.Н. Полищук, А.Н. Попов, А.Н. Тимофеев
Оценка диапазонов воспроизведения параметров движения на центробежном стенде 544

А.Н. Попов, С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, А.Н. Тимофеев
Специальный привод центробежного стенда 556

А.В. Шайтанов
Задачи и пути создания активной системы амортизации при угловой стабилизации устройства воздушного базирования 566

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

А.М. Зайцев, П.А. Кузнецов, М.А. Кузнецова
Анализ технологических возможностей процесса комбинированной радиально-торцевой раскатки при изготовлении осесимметричных деталей из спеченных материалов 577

П. В. Кононов
Исследование напряженного и деформированного состояния детали методом атомно-силовой микроскопии 587

П. В. Кононов, В.Н.Востров
Моделирование формоизменения трубчатых заготовок в процессе холодной угловой раскатки 593

П.А. Кузнецов, А.В. Гоцiридзе, М.А. Кузнецова
Комбинированное прессование и локальная обработка давлением высокоплотных биметаллических спеченных изделий 600

С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов
Управление течением металла в процессах холодной торцевой раскатки 608

В.С. Мамутов, А.В. Мамутов
Компьютерный расчет механического концентратора давления для магнитно-эластоимпульсной штамповки 615

Б.Н. Поляков
К 50-летию создания первого и самого высокопроизводительного в мире автоматизированного блюминга 1300 625

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

А.В. Ащеулов, А.А. Лобачев, А.Е. Хорошанский, А.А. Шестопалов
Пути совершенствования отечественных машин № 1 637

А.Я.Башкарев, Н.Н.Беспалова
Изменение прочностных и адгезионных свойств битума под воздействием температурно-временного фактора 650

В.С. Бурлуцкий, К.П. Позынич, Е.К. Позынич
Оценка степени деградации телескопических крановых стрел с пластическими деформациями по параметрам твёрдости при прогнозировании ресурса 660

А. С. Князьков, В. Ф. Купряшкин, Н. И. Наумкин
Анализ изменения угла резания рабочих органов малогабаритных почвообрабатывающих фрез 671

Н. А. Кондрашов, Д. Ю.Таиров, А. А. Шестопалов
Конструкция и обоснование параметров универсального дорожного катка 680

А.В. Кущенко, А.Я. Башкарев, В.Ф. Корелин
Возможность применения полиамидных покрытий при восстановлении прессовых посадок**.** 689

К.П. Манжула
О параметрах краевой трещины при действии внешней нагрузки и остаточных напряжений 699

Э.И. Мансырев, О.М. Мельников
Оценка длины трещины в защемленном SENT-образце методом податливости 707

С. В. Никитин
Динамическая модель ленточного конвейера 722

Ю. А. Ноздрачёва, С. Ф. Пилипчук, А. Е. Радаев
Оптимизационная модель обоснования характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования 732

Н.Н. Панасенко, А.В. Синельщиков,В. В. Рабей, Л.С. Синельщикова
Конечно-элементные компьютерные модели подъемных сооружений 743

В. В. Рабей
Математическая модель взаимодействия грузоподъемных кранов с тупиковыми упорами 757

M. Rajczyk, J. Rajczyk, M. Kosiń
Assessment of the mechanical tool for the surface treatment of granite 768

А.В. Стукач
Использование строительных машин для очистки территорий от снега 779

В.А. Чеканин
Библиотека классов для решения задач упаковки на основе эволюционных алгоритмов 789

В.А. Чеканин, А.В. Чеканин
Эффективная структура данных для оптимизационной задачи ортогональной упаковки объектов 797

СТАНКОСТРОЕНИЕ

М.А. Адмакин, О.Н. Адмакина
Проектирование фасонных фрез для обработки сложнопрофильных плоскостей 809

М.С. Бундур, Н.А. Пелевин, В.А. Прокопенко
Возможности и особенности пакета MATLAB SIMULINK при моделировании систем управления гидростатическими несущими узлами 815

П.Ю. Пискарев, В.А. Шмаков
Методологические и технические проблемы диагностики металлорежущих станков 826

Е.Н. Сенькин, А.А. Окунев
Определение числа эффективных режущих инструментов 837

Е.Н. Сенькин, А.А. Окунев
Сплайн-аппроксимация зависимостей теплофизических характеристик материала от температуры при резании 847

Е.Н. Сенькин, А.А. Окунев
Электрическое моделирование процесса резания инструментом с композитом 855

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

К.В. Елисеев
Современные методы определения сил в контакте колесной пары и рельсов 867

В.А. Клевцов, В.В. Максаров
Об основах развития «компьютерных технологий» в машиностроении 877

ИННОВАЦИОННОЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Д.А. Гаранин, А.А. Клавдиев
Стохастическое подобие инновационных проектов в инвестиционном проектировании 889

С.Ю. Грибов
Выбор метода расчета синергетического эффекта в холдинге с применением метода анализа иерархий Т. Саати 901

В. А. Дуболазов, Н.В.Неелова
О подготовке специалистов в области инновационного предпринимательства 911

А. М. Ефимов, С.В. Салкуцан
Поддержка малого инновационного бизнеса в машиностроительной отрасли 922

Ю.Ю. Кочинев, О.И. Виноградова
Идентификация непреднамеренности искажений, выявленных в бухгалтерской отчетности машиностроительных организаций 934

Н.В. Неелова
Представление информации об инновационной деятельности организаций в бухгалтерской и статистической отчетности 943

Н. А. Николаев
Роль государства в развитии корпоративной социальной отчетности промышленных предприятий 953

О.А. Пономарева, О.В. Попова
Статистика малого предпринимательства и инновационной деятельности 963

Е.А.Светлова, В. Д. Хижняк
Исследование возможности создания инновационной структуры обеспечения экспортно-импортных операций промышленных предприятий 978

М.Х. Седлер, Е.А. Карабасов
Повышение качества контроля труб путем разработки установки автоматизированного ультразвукового контроля 988

М.Х. Седлер, А.В. Мосалова
Повышение качества работы конструкторского бюро на предприятиях, занимающихся созданием нестандартного оборудования 995

М.И. Седлер, Е.И. Поплевина
Улучшение процесса управления внешней нормативной документацией корпорации «тира» 1003

М.И. Седлер, В.А. Степанова
Повышение качества изготовления деталей путем организации статистического контроля их производства 1012

В.С. Силинский
Факторы повышения эффективности маркетинговых исследований на промышленном высокотехнологичном рынке 1019
Д. И. Троицкий
Модульная подготовка студентов в области знаний «Автоматизированное проектирование» 1027
Д. И. Троицкий
Прогнозирование трудоемкости токарных операций на этапе конструирования изделия 1037

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

К.П. Помпеев
Особенности размерно-точностного анализа технологий изготовления валов в центрах 1049
С.Н. Степанов, Н.Ю. Видинеева.
Микрогеометрия зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания 1059
С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов, А.В. Петров
Качество деталей и текстура поверхности 1066

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

Барон Ю.М.
Производительное удаление заусенцев на заготовках после вырубки 1079
Ю. С. Барышников, В.Д. Азаров, М.В. Яковицкая
Технологическая возможность увеличения энергосбережения при торможениях вала электродвигателя 1087
Н.Р.Варгасов, Б.К. Барахтин
Новый подход в оценке структурного состояния рельсовой стали при горячей деформации 1095
Г.А Воробьева, Е.Е.Складнова
Исследование влияния аэротермоакустической обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей 1107
Н.Н. Горобей, А.С. Лукьяненко
Упрочнение поверхностного слоя металлических образцов легированием 1119
Ю.Б. Егорова, Л.В. Давыденко, И.М.Мамонов, Е.Н.Егоров, М.Г.Бурлакова
Прогнозирование механических свойств кованых прутков из титановых сплавов на основе данных промышленного контроля 1129
М.Т. Коротких
Конструкционное демпфирование режущих инструментов при прерывистой обработке резанием 1140

Р.В.Кузнецов, К.В.Мартынов
Опыт промышленного применения противопригарных покрытий на органическом связующем 1149

В. И. Никифоров
Классификация технологических методов обработки 1159

В.И. Новиков , А. И. Фоломкин
Влияние формы детали на шероховатость ее поверхности после электролитно-плазменного полирования 1169

А. П. Петкова , О. Ю. Ганзуленко
Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения прецизионным импульсным лазером 1177

А.И. Попова, А.И Попов, М. И. Тюхтяев, В.С. Медко
Управление жизненным циклом лопаток паровых турбин за счет применения узк - контроля 1188

М.М. Радкевич
Формирование структуры сталей при программной механико-термической обработке. 1199

В.В.Трофимов, И.Краус, Р.У.Ильясов
Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в алюминиевых бурильных трубах 1205

Л. А. Ушомирская
Технологические возможности электролитно-плазменного полирования 1212

М. В. Яковицкая А. П. Петкова
Технология повышения физико-механических свойств аустенитных хромоникелевых сталей для энергетики 1218

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Я.А. Андреева
Динамическое уравновешивание планетарных механизмов сложной структуры 1231

А.А. Гаврилов, А.Н. Гоц
Модифицированная математическая модель цикла поршневого двигателя 1239

В. И. Дягилев, В.А. Коковин, С.У. Увайсов
Исследование процессов в схеме транзисторного генератора для ультразвуковых технологических установок 1250

И.А. Жуков, В.В. Молчанов
К разработке двухступенчатых бойков ударных механизмов на основании правила «золотого сечения» 1258

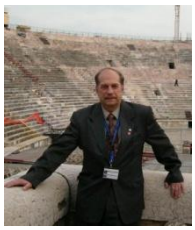
В. А. Клевцов, В. В. Максаров
О роли системности в развитии теории базирования 1265
В.А. Коковин, А.А. Евсиков
Использования метода потокового управления при автоматизации технологических установок 1275
А.А. Суджаян
Кинетостатическое исследование четырехзвенного кулачкового механизма с изменяемым промежуточным звеном 1285

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

УДК 378.14

Л.Б.Аксенов

КЛИПОВОЕ МЫШЛЕНИЕ: ГЕНИАЛЬНОСТЬ ИЛИ ДЕМЕНЦИЯ



Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт – Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. +7 921 931 6786, E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Аннотация

В работе рассмотрены основные черты клипового мышления, проявляющегося у представителей современной молодежи. Показано, что клиповое мышление вытесняет и замещает логическое мышление, к которому приспособлены традиционные процессы обучения, и оказывает существенное влияние на эффективность процесса обучения. Для получения должных результатов обучения преподавателям следует учитывать особенности восприятия информации молодыми людьми и помочь им справиться с проблемами ее анализа.

Ключевые слова: клиповое мышление, образование, обучение

Продолжая обсуждение проблем организации университетского образования, автор позволил себе перейти в данной работе от содержательных проблем обучения к методическим, и сменить тему выступления с темы «чему учить», рассмотренную в предшествующих выступлениях, как собственных [1], так и коллег [2], на тему «как учить». С целью полного понимания темы настоящей работы, приведем значения слов, стоящих в заглавии этой публикации [3]:

клип – [<англ. clip] - стрижка; быстрота (движения); вырезка (из газеты); отрывок из фильма, нарезка;

гениальность - [<лат. genialis] - высшая степень творческой одаренности, таланта;

деменция - [<лат. dementia безумие] – приобретенное слабоумие, потеря (или заметное снижение) интеллектуальных способностей.

Повышение эффективность передачи знаний от преподавателей к студентам, является одной из главных задач методической работы в вузе. Конечный уровень подготовки студентов зависит от их начального уровня подготовки (рис. 1) и уровня сложности восприятия предмета, характеризующего, насколько доступно преподавателям удается проводить обучение. В результате уровень подготовки представляется кривой с выраженным максимумом. После того как уровень сложности восприятия достигает некоторой предельной величины, названной

критическим разрывом, начинается спад уровня восприятия и конечного уровня подготовки. С уменьшением величины критического разрыва снижается эффективность процесса обучения.

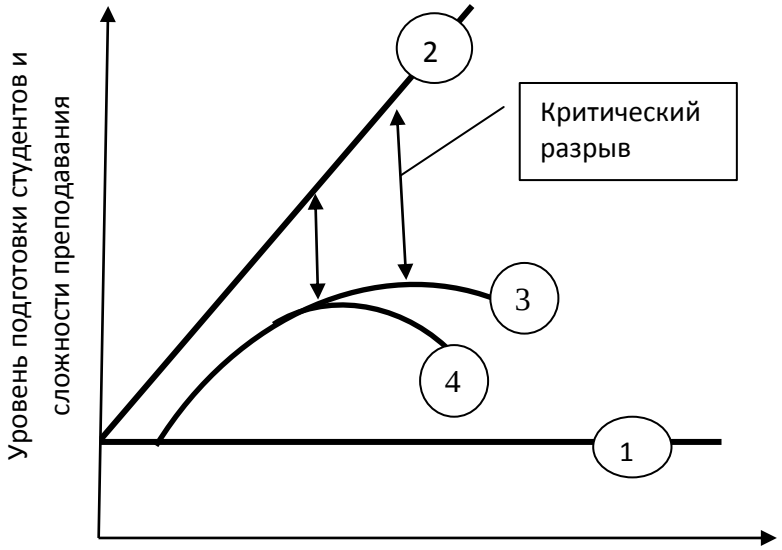


Рис. 1. Зависимость уровня подготовки студентов от уровня сложности преподавания: 1- начальный уровень подготовки студентов; 2- уровень сложности восприятия; 3- конечный уровень подготовки; 4- конечный уровень подготовки при сниженном критическом уровне

Не величину указанного критического разрыва оказывает существенное влияние отличие в восприятии и способе обработки информации у разных поколений, т.е. у преподавателей и учеников. Представители одного из самых консервативных общественных институтов – образования – заметили у нынешних подростков способность воспринимать преимущественно визуальные образы и только в течение короткого промежутка времени [4], то есть клиповое мышление.

«Клиповость», как способ восприятия, существовала всегда. Но если, в прошлом человек родившись с ней, рос в образованном обществе, то его перевоспитывали, как переучивали левшей, а если в необразованном, то на это не обращали внимание. Клиповое, как и привычное логическое, мышление, не присущи человеку с рождения, они вырабатываются в зависимости от способа потребления и анализа поступающей информации.

Человек всегда стремился сохранить и передать важную информацию от предшествующих поколений будущим на носителе более надежном, чем собственная память через рисунки на стенах пещеры, письменность и т.д. Разделять мышление на «клочки», «клипы» стали средства массовой информации. Активно этот процесс начался еще в 18-м веке, когда появились первые газеты, содержащие набор сообщений – коротких, не

связанных между собой текстов. Свое резкое суждение о такой форме представления информации пророчески высказала в 1935 г. Марина Цветаева [5]:

«…Глотатели пустот, Читатели газет!
Газет — читай: клевет,
Газет — читай: растрат,
Что ни столбец — навет,
Что ни абзац — отврат...».

В начале XX века в моду входит кинематограф и смысловая клиповость накладывается на визуализацию. С распространением телевидения человечество полностью адаптировались к такой манере подачи информации. Примерно в середине 1990-х годов происходящие с человеческим сознанием изменения были зафиксированы в понятии «клиповое мышление». Вхождение в нашу жизнь компьютерных технологий еще больше сконцентрировало проблемы восприятия.

Все чаще и чаще со страниц СМИ и телевизионного экрана озвучивается мысль, что многие проблемы современной молодежи связаны с клиповым мышлением. Человек с таким мышлением не может длительное время сосредотачиваться на какой-либо информации, и у него снижена способность к анализу. Клиповое мышление, прежде всего, влияет на успешность учебы. Для современного подростка осилить что-либо из классической литературы XIX века – уже сверхзадача [6]. Поэтому большой популярностью пользуются всевозможные дайджесты и готовые сочинения.

От стиля мышления во многом зависит успешность в жизни. Программы вузов намного сложнее школьных и требуют восприятия и переработки гораздо большей информации. В современном бизнесе без умений анализировать, вычленять суть и принимать на основе этого решения, вообще невозможно стать успешным менеджером. Одно из главных требований в нем – способность выстраивать цепочку из последовательности действий от существующего положения до поставленной цели. А создание таких цепочек подразумевает наличие «продолжительного» мышления. Отсюда, возникновение вполне реальной опасности, что носители «клипового мышления» будут вытеснены на положение аутсайдеров.

Педагоги часто жалуются, что современные школьники, изучив определённый материал, тут же его забывают. Это проявление клипового мышления. Человек с таким восприятием мира привыкает к тому, что потоки информации постоянно сменяют друг друга и, получив очередную порцию, мозг совершенно не стремится запомнить её, он как можно быстрее её стирает и ждёт получения новой. Ребёнок с клиповым мышлением не способен нормально освоить школьную программу [7]. Что тогда говорить о вузах, а от этого ведь зависит и успешность в жизни.

Многие считают «клиповое мышление» исключительно негативным явлением, злом, с которым надо бороться, в том числе американский футуролог Э.Тоффлер [8]. В США рассеянное внимание школьников лечат медикаментозно. В некоторых странах, где стали осознавать его опасность, разрабатываются специальные тренинги, где учат сосредотачивать внимание на одном предмете и удерживать состояние концентрации в течение длительного времени. Но наиболее доступный метод – это чтение (естественно, не клиповой литературы) [9]. И всяческое закрепление прочитанного – обсуждение, конспектирование и т.д., что способствует выработке умения анализировать, устанавливать связи между явлениями, и в конечном итоге приводит к разрушению мозаичной, фрагментированной картины мира. В России во имя этой борьбы рекомендуют побуждать детей и подростков больше читать. Этой цели служит возвращение к сочинению, как дополнительному испытанию для выпускников школ.

В тоже время клиповое мышление служит защитой, которая позволяет, так или иначе, выделить необходимое и важное из информационной лавины. Развитие клипового мышления с помощью довольно простого устройства позволило автору значительно увеличить скорость чтения. Приобретенный навык скорочтения не применим для чтения художественной литературы, где важна эмоциональная составляющая, но существенно ускоряет проверку студенческих работ.

Многие преподаватели замечают, что уровень подготовки студентов носит некоторый циклический характер (рис. 2) с периодом 2-4 года. При этом существует распространенное пессимистическое мнение, что общий уровень постепенно снижается (линия 1, рис. 2). К счастью это не так. На привычные знания накладываются знания, получаемые от новых курсов и разделов, замещающих старые (линия 2, рис. 2). В результате реальный уровень подготовки студентов не понижается, а растет (линия 3, рис. 2), но направленность подготовки меняется. Иначе как объяснить все растущий объем открытий XXI века, который обещает быть самым продуктивным из всей истории человечества. Таким образом, общее положение с образованием можно воспринимать в значительной мере оптимистично [10].

Так кто же они сегодняшние молодые люди с клиповым мышлением, делающие шаг к гениальности или деменции? Не то и не другое. Они в основном нормальные, но они – «другие» и им жить в другое время и в других условиях развития человечества. Научные открытия делаются в основном с применением сложного оборудования. Открытия «на кончике пера» теперь редкость. Так что получается, что наши ученики знают меньше учителей, а могут больше.

Процесс обучения всегда был трудным. На методические приемы и проблемы обучения своих учеников указывал еще Христос [11]:

«… потому говорю им притчами, что они видя не видят, и слыша не слышат, и не разумеют;…». Эти ученики сегодня почитаемы как апостолы.

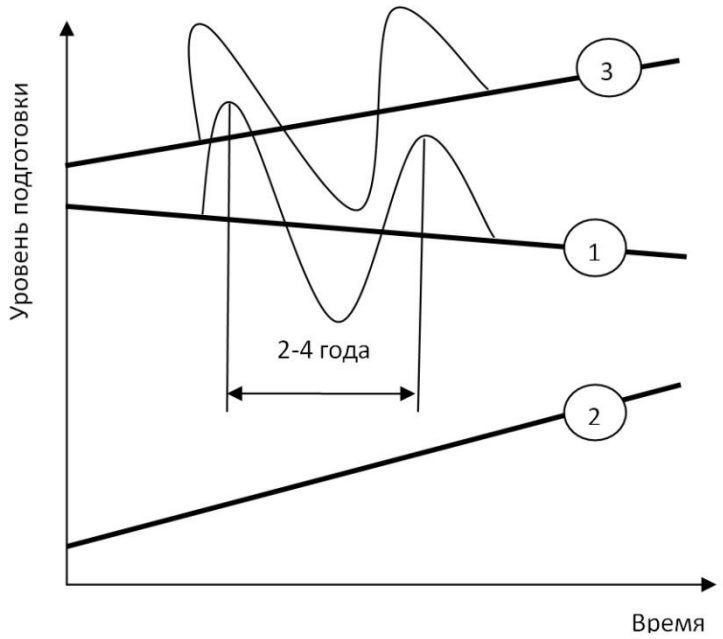


Рис. 2. Изменение уровня подготовки во времени:
1– распространенное мнение об уровне подготовки; 2– влияние новых курсов; 3 – реальный уровень подготовки

Некоторые футурологи предсказывают, что уже через 15 лет наиболее востребованы будут следующие специалисты: глазир, корпоративный антрополог, менеджер краудфандинговых и краудинвестинговых платформ, персональный бренд-менеджер и другие. Эти направления подготовки мы сегодня себе даже не представляем, хотя предполагаемым местом их обучения указывается СПбГПУ [12]. «Клиповость» становится нормой, и переучиваться придется, видимо, тем, кто 500 лет считал свой способ коммуникации единственно верным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов Л.Б. Фундаментальное образование с позиций теории нечетких множеств, 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.16-22.
2. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрия и кинематика механизма турбулентного смесителя //Современное машиностроение. Наука и образование. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. с. 701-708.

3. Словарь иностранных слов.- 11-е изд. стереотип.-М.:Рус.яз., 1984.- 608 с.
4. Нифонтова М.Н. Протез мозга. Научно-популярный журнал «Машины и механизмы», №6 (93), июнь 2013, с.28-33.
5. Цветаева М.И. из стихотворения «Читатели газет» (1935), интернет ресурс: http://www.stihi-xix-xx-vekov.ru/cvetaeva892.html (Дата обращения 15.02.2014).
6. Фельдман Н. А. Клиповое мышление. Русский информационно-познавательный ресурс «Русколань», интернет ресурс - http://www.ruskolan.xpomo.com/tolpa/klip.htm (Дата обращения 01.03.2014).
7. Азаренок Н.В. Клиповое сознание и его влияние на психологию человека в современном мире; Изд-во «Институт психологии РАН»; 2009.– с.110-112.
8. Тоффлер Э. Шок будущего: пер. с англ. – М.: АСТ, 2002.– 557с.
9. Фрумкин К.Г. Клиповое мышление и судьба линейного текста. // Топос, литературно-философский журнал, 23/09/2010. Интернет ресурс- http://www.topos.ru/article/7371 (Дата обращения 20.02.2014).
10. Rosen L. Me. My Space, and I: Parenting the Net Generation. – N.Y., 2007.– 258c.
11. От Матфея святое благовествование, 13:13// Библия, Книги Священного писания Ветхого и Нового Завета, Ленинград, 1990, т.2, с.316.
12. Работа будущего: какие профессии будут востребованы через 15-20 лет. Интернет ресурс: http://www.interfax.ru/photo/1544/19345. (Дата обращения 05.03.2014).

L.B.Aksenov

CLIP THINKING: GENIUS OR DEMENTIA

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper considers the main features of clip thinking, having a place among representatives of the modern youth. It is shown that clip thinking, forcing out logical thinking, to which the traditional processes of education is adapted, and has a significant influence on the efficiency of the training process. To obtain the expected results in the training teachers should take into account the peculiarities of information perception of young people and help them cope with problems of analysis.

Key words: clip thinking, education, training

REFERENCES

[1] Aksenov L.B. Fundamentalnoe obrazovanie s pozitsiy teorii nechetkih mnozhestv, Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova.– SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – p.16-22. (rus.)

[2] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometriya i kinematika mehanizma turbulentnogo smesitelya //Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. p. 701-708. (rus.)

[3] Slovar inostrannyih slov.- 11-e izd. stereotip.-M.:Rus.yaz., 1984.- 608 p. (rus.)

[4] Nifontova M.N. Protez mozga. Nauchno-populyarnyiy zhurnal «Mashinyi i mehanizmyi», #6 (93), iyun 2013, p.28-33. (rus.)

[5] Tsvetaeva M.I. iz stihotvoreniya «Chitateli gazet» (1935), internet resurs: http://www.stihi-xix-xx-vekov.ru/cvetaeva892.html (Data obrascheniya 15.02.2014). (rus.)

[6] Feldman H. A. Klipovoe myishlenie. Russkiy informatsionno-poznavatelnyiy resurs «Ruskolan», internet resurs - http://www.ruskolan.xpomo.com/tolpa/klip.htm (Data obrascheniya 01.03.2014). (rus.)

[7] Azarenok N.V. Klipovoe soznanie i ego vliyanie na psihologiyu cheloveka v sovremennom mire; Izd-vo «Institut psihologii RAN»; 2009.– p.110-112. (rus.)

[8] Toffler E. Shok buduschego: per. s angl. – M.: AST, 2002.– 557p. (rus.)

[9] Frumkin K.G. Klipovoe myishlenie i sudba lineynogo teksta. // Topos, literaturno-filosofskiy zhurnal, 23/09/2010. Internet resurs- http://www.topos.ru/article/7371 (Data obrascheniya 20.02.2014). (rus.)

[10] Rosen L. Me. My Space, and I: Parenting the Net Generation. – N.Y., 2007.– 258 p.

[11] Ot Matfeya svyatoe blagovestvovanie, 13:13// Bibliya, Knigi Svyaschennogo pisaniya Vethogo i Novogo Zaveta, Leningrad, 1990, t.2, p.316. (rus.)

[12] Rabota buduschego: kakie professii budut vostrebovanyi cherez 15-20 let. Internet resurs: http://www.interfax.ru/photo/1544/19345. (Data obrascheniya 05.03.2014). (rus.)

УДК 004.02: 514.18

Е.Л. Альшакова

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ НА ПРИМЕРЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ДИСЦИПЛИНЫ «ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА»

Елена Леонидовна Альшакова, к.т.н., доцент
Юго-Западный государственный университет
Россия, Курск
Тел.: (4712) 50-45-70, E-mail: alshakova_el@mail.ru

Аннотация

Модельно-ориентированное проектирование является актуальным, наиболее эффективным принципом управления информацией в области машиностроения. Концепции модельного подхода внедряются в учебный процесс дисциплины «Инженерная графика», базовой для изучения последующих дисциплин рабочего учебного плана направления подготовки (специальности). Подготовлены графические работы с использованием средств параметризации, внешних ссылок, инженерных инструментов, автоматизации создания конструкторской документации, реализованных в системе автоматизации проектирования.

Ключевые слова: модельно-ориентированное проектирование, цифровая модель изделия, система автоматизации проектирования, управление информацией, технологии проектирования, инженерная графика.

Введение

Современным направлением применения информационных технологий в области проектирования и машиностроительного производства становится инженерия на базе моделей. Основные концепции такого подхода следующие: в качестве источника данных на протяжении всего жизненного цикла изделия принимается 3D модель (в отличии от конструкторско-технологической документации); вычислительные, технологические операции также связаны с моделью; используется единый источник данных, однократно введенных в процесс и используемых всеми участниками проекта. В машиностроении – это применение на предприятиях PLM систем с программными продуктами, поддерживающими данную технологию.

Таким образом, необходимо организовать в соответствии с указанными требованиями современного машиностроительного производства учеб-

ный процесс различных инженерных дисциплин, начиная с базовой: инженерной графики. В дальнейшем ежегодно до начала ведения дисциплины пересматривать рабочую программу дисциплины на актуальность.

Обучаясь по предлагаемой методике, с использованием программных продуктов, поддерживающих модельный подход в проектировании, студенты выполняют предусмотренные в рамках дисциплины графические работы качественно и с существенной экономией времени, получают навыки работы с программным продуктом, обеспечивающим решение профессиональных задач, знакомятся с будущей профессией. Учебное время дисциплины направлено на изучение необходимого теоретического материала, моделирование сложных поверхностей, изделий, научную работу студента. В дальнейшем студенты имеют возможность выполнять курсовые, выпускную и дипломную работы осознано и в соответствии с требованиями производства, получают преимущества при прохождении производственной практики и трудоустройстве по выбранной специальности.

1. Цели и задачи преподаваемых дисциплин, их место в структуре образовательной программы

Учебные дисциплины «Начертательная геометрия. Инженерная графика», «Инженерная графика», «Инженерная и компьютерная графика» входят в базовую часть профессионального цикла Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) по различным направлениям подготовки (специальностям), изучаются на первом курсе и являются базовыми для освоения последующих дисциплин рабочих учебных планов направлений подготовки (специальностей).

Рассматриваемые дисциплины состоят из разделов: начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика. В результате обучения в соответствии с ФГОС ВПО должны быть сформирование определенные профессиональные компетенции. Конкретизацией компетенций, полностью или частично обеспечиваемых данными дисциплинами, являются: способность владеть элементами начертательной геометрии, знать теоретические основы построения чертежа, уметь разрабатывать проектную и техническую документацию, оформлять проектно-конструкторские работы, применять стандарты на техническую документацию и другие нормативные документы, а также способности применять интерактивные графические системы для выполнения изображений и чертежей, владеть современными программными средствами геометрического моделирования и подготовки конструкторской документации, решать профессиональные задачи с помощью средств автоматизации проектирования [1].

2. Применение программных продуктов, поддерживающих модельно-ориентированный подход, в учебном процессе графических дисциплин

Начертательная геометрия как наука изучает методы отображения пространственных объектов, в том числе, на плоскость, и способы решения стереометрических задач на чертеже. В процессе обучения студенту сложно понять алгоритм решения задачи без пространственного визуального образа рассматриваемых геометрических объектов, представить деталь по чертежу. Эти проблемы связанны с уровнем развития пространственного мышления. Поэтому в курсе начертательной геометрии с целью визуализации предлагаемой информации используется программный продукт Autodesk Inventor® 2014. 3D модели деталей, сборочных единиц, пространственных объектов, соответствующие вариантам заданий графических работ, содержатся в подготовленной графической базе данных.

Чертежи деталей, соединений, сборочных единиц рассматриваются одновременно с визуализацией соответствующих 3D моделей и анализом 3D модели на экране. Это дает возможность студентам научиться устанавливать ассоциативные связи между визуальными образными данными и их проекциями, понять смысл и назначение проекций.

В учебном процессе дисциплины «Инженерная графика» и в настоящее время графические работы могут выполняться «вручную» на бумаге с помощью чертежных инструментов или программного продукта AutoCAD®, направленного в основном на 2D технологии построения изображений (используется при оформлении курсовых работ). В этих случаях не применяются 3D технологии проектирования, обеспечивающие параметризацию, реалистичную наглядность изделия, включая анимацию и динамический анализ, автоматизацию инженерных и конструкторских работ.

При использовании модельно-ориентированного подхода для решения пространственных задач и оформления чертежей применяются 3D цифровое моделирование и инструменты автоматизации инженерной деятельности [2, 3]. Знания математики, геометрии и начертательной геометрии помогают студентам в процессе цифрового моделирования задач повышенной сложности, например, олимпиадных [4, 5].

В учебном процессе концепции инженерии на базе моделей поддерживаются программным продуктом Autodesk Inventor, а также собственными разработками, выполненными с помощью Autodesk Inventor. Это – задания, содержания графических работ, приемы их выполнения, модели параметрических деталей, параметрических сборок и соответствующая конструкторская документация: рабочие чертежей деталей, сборочные чертежи и спецификации. Подготовлены 3D схемы на основе предлагаемых сборок: разнесенные проекции сборок, анимированные сборки, с помощью которых демонстрируются связи между деталями сборочной единицы и порядок сборки.

Для студентов строительных направлений подготовки (специальностей) применение продуктов Autodesk® в учебном процессе [6] определяется тем, что система автоматизации проектирования AutoCAD традиционно используется в архитектурно-строительных организациях. В настоящее время на данных предприятиях внедряется Autodesk Revit® 2014, реализующий технологию информационного моделирования зданий (BIM): модельно-ориентированный подход в области архитектуры, проектирования и строительства. Модельный подход обеспечивает связь информации и взаимодействие различных дисциплин в проектировании и строительстве.

Autodesk Revit хранит информации об объекте строительства в одном файле проекта. Здесь осуществляется разработка модели, управление проектной информацией, оформление рабочей документации, смет. Это сокращает количество ошибок, обеспечивает коллективную работу над проектом, удобство внесения изменений, расчет строительных конструкций.

Модель, созданная в Autodesk Revit, может использоваться в учебном процессе для выполнения расчетов строительных конструкций при помощи программного продукта Autodesk Robot® Structural Analysis.

3. Инновации, реализованные с помощью программных продуктов в курсе инженерной графики

При выполнении графических работ, предусмотренных в курсах «Начертательная геометрия. Инженерная графика», «Инженерная графика», «Инженерная и компьютерная графика», осуществляется 3D цифровое моделирование деталей, сборочных единиц, формирование на их основе чертежей, спецификаций, а также автоматическое изменение конструкторской документации с помощью Autodesk Inventor.

В учебном процессе используются параметрические детали (имеющие различную конструкцию) и параметрические сборки. Размеры элементов деталей и их взаимное положение задаются путем установки связи с внешними файлами. Это могут быть таблицы Excel или файлы моделей Inventor. Таким образом подготовлены варианты заданий графических работ, а студенты способны выполнить графическую работу в короткие сроки.

Показывается применение инструментов инженерного проектирования (генераторов компонентов вала, зубчатых зацеплений, болтового, шпоночного, шлицевого соединений), реализованных в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor 2014, при создании моделей изделий, что сокращает время выполнения графических работ. При создании сборок используются библиотечные компоненты Inventor.

Планируется внедрять в учебный процесс элементы программирования при работе с Autodesk Inventor, с целью разработки удобного для пользователя инструмента решения конкретной задачи с определением правил построения детали, ограничения размеров детали, соединения деталей в сборке, созданием диалоговых окон и интерфейса пользователя [7].

В учебный процесс внедрен Autodesk Revit, в нем создается модель жилого или общественного здания и оформляются строительные чертежи.

4. Результаты обучения с применением программных продуктов, реализующих модельный подход

При выполнении графической работы «Деталирование»: разработка чертежей деталей по чертежу общего вида, студенты создают 3D модели деталей и изделия, а на основе моделей деталей – рабочие чертежи деталей (рис. 1) при помощи программных продуктов Autodesk Inventor (рис. 2) и AutoCAD (рис. 3). В настоящее время применяется Autodesk Inventor, т.к. содержит библиотеки компонентов, инструменты создания 2D изображений, параметризации, мастера проектирования, позволяющие облегчить процесс создания модели и чертежа, управление моделью.

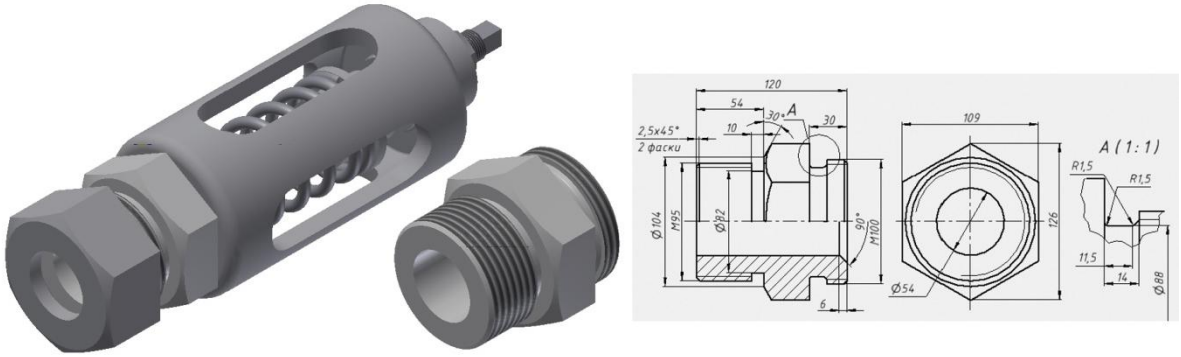


Рис. 1. Выполнение графической работы «Деталирование»

Рис. 2. Модели изделий, выполненные в Autodesk Inventor

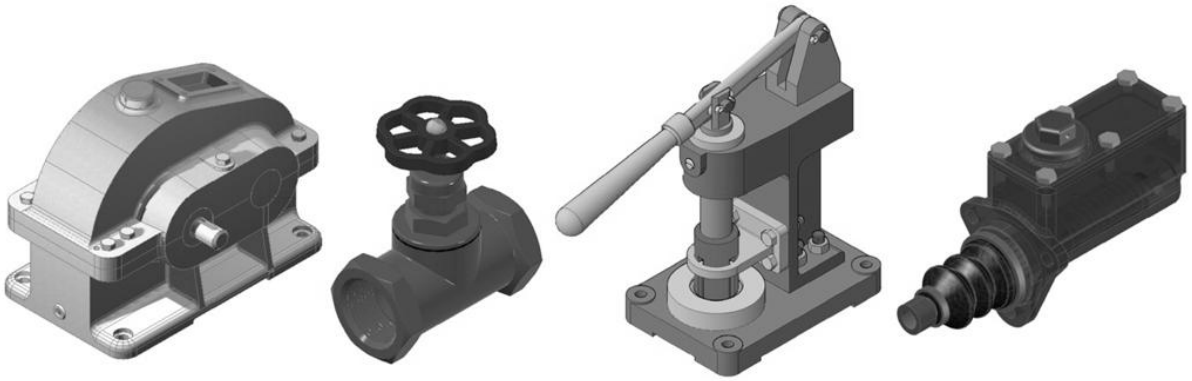
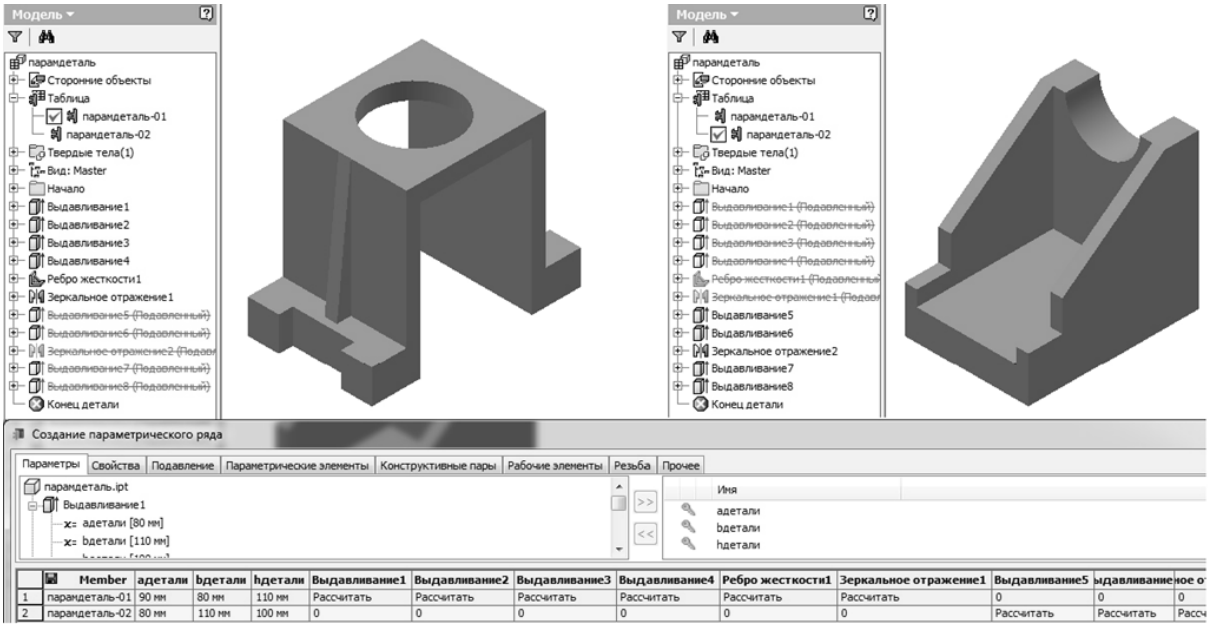


Рис. 3. Модели изделий, выполненные в AutoCAD

Для получения в одном файле деталей различной конструкции создается так называемое семейство деталей в диалоговом окне Создание параметрического ряда (рис. 4). Создается модель детали. Устанавливается связь с таблицей Excel, в которой хранятся значения размеров детали. Численные значения размеров в эскизах и элементах модели заменяются на имена параметров и формулы на их основе. Каждая деталь имеет свои значения параметров. Данные в таблице Excel можно менять, при этом модель изменяется автоматически.



	Member	aдетали	bдетали	hдетали	Выдавливание1	Выдавливание2	Выдавливание3	Выдавливание4	Ребро жесткости1	Зеркальное отражение1	Выдавливание5	ндавливание	ное от
1	парамдеталь-01	90 мм	80 мм	110 мм	Рассчитать	Рассчитать	Рассчитать	Рассчитать	Рассчитать	Рассчитать	0	0	0
2	парамдеталь-02	80 мм	110 мм	100 мм	0	0	0	0	0	0	Рассчитать	Рассчитать	Рассч

Рис. 4. Параметрические детали, созданные в одном файле

В учебный процесс внедрена графическая работа «Сборочный чертеж», основанная на модельном подходе в проектировании. Создается 3D модель сборочной единицы «Вал приводной ременной передачи». Сборка состоит из четырех оригинальных деталей – опор, втулок, вала и шкива, одной стандартной – шпонка. Конструкция шкива различна: для клиноременной или плоскоременной передачи, с симметричной или несимметричной ступицей. Задание содержит чертежи четырех деталей и таблицу параметров деталей. Всего двадцать восемь вариантов сборочной единицы. Все варианты реализованы в одном файле параметрической сборки с семейством деталей (шкив), управляемыми сборочными зависимостями.

Сборка состоит из обычных (опор, втулок), созданных с помощью Генераторов (вал, шпонка) и параметрической (шкив) деталей, строится на основе Зависимостей. В файле сборки создается параметрическая сборка. В таблице диалогового окна даны варианты и элементы параметрической детали в сборке и зависимости, которые необходимо изменить (рис. 5).

С целью изучения архитектурно-строительных чертежей выполняется графическая работа «Чертежи зданий». В этой работе в соответствии с вариантом задания, представленного в виде схемы плана этажа, фасада, раз-

реза здания и другой необходимой информации, такой как материал и толщена стен и перегородок, особенности оконных и дверных проемов, размещение лестничных клеток и сантехнического оборудования, строятся чертежи плана, фасада и разреза жилого или общественного здания.

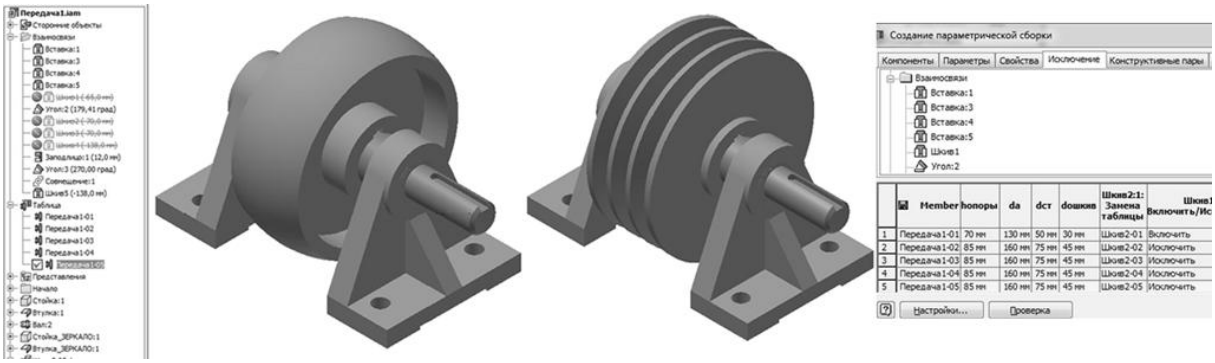


Рис. 5. Параметрические сборки в Autodesk Inventor

Строительные компании отказываются от использования 2D моделирования в пользу технологии информационного моделирования зданий, реализованной компанией Autodesk в программных продуктах Revit и Robot Structural Analysis. Для выполнения графической работы «Чертежи зданий» применяется Autodesk Revit: создается информационная модель здания, формируются требуемые чертежи, спецификации (рис. 6).

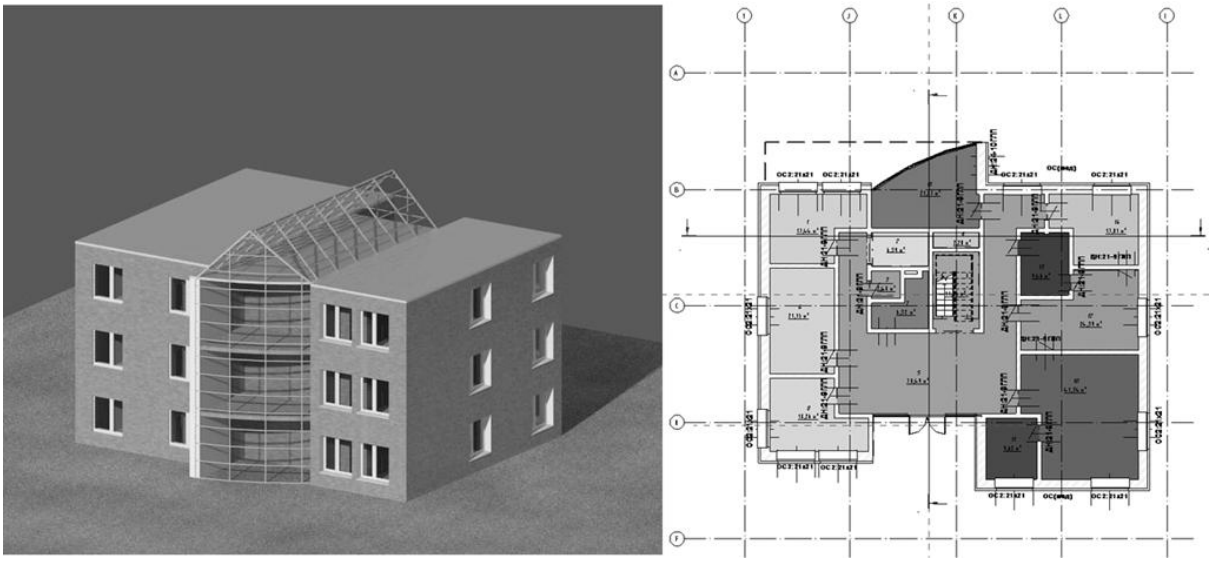


Рис. 6. Информационная модель здания, созданная в Autodesk Revit

5. Научная и профессиональная деятельность студентов

Студенты, пройдя обучение согласно предложенной методике, имеют возможность принимать участие в научных конференциях, олимпиадах и конкурсах по инженерной графике, компьютерному моделированию и САПР, занимая призовые места.

Задания олимпиад и конкурсов, проводимых по тематике преподаваемых дисциплин, соответствуют заданиям графических работ:

- региональная олимпиада по трехмерному моделированию в машиностроении, проводимая на базе Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) г. Курск в 2013 году, требовалось создать 3D модель детали – оценивалась эффективность способов ее создания, параметрическую модель детали различной конструкции, 3D сборку;

- всероссийская студенческая олимпиада по технологиям Autodesk, проводимая на базе Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева в рамках VI Международного форума информационных технологий «ITforum 2020/Взгляд в будущее» в 2013 году, требовалось, используя чертежи деталей, входящих в сборку, выполнить параметрические модели деталей, 3D сборку изделия, анимацию работы механизма;

- секция «Компьютерная графика» открытой Всероссийской студенческой олимпиады по начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графике, проводимой в Московском государственном университете тонких химических технологий имени М.В.Ломоносова г. Москва, по чертежу сборки создавалась 3D модель изделия;

- секция «Инженерная графика» – выполнение чертежей деталей по чертежу общего вида – 3D моделирование и автоматизация создания чертежей.

В результате, на олимпиаде САПР: CAD-OLYMP 2013, проводимой в г. Москва, студенты ЮЗГУ заняли призовые места в личном зачете, а также успешно прошли сертификацию по Autodesk Inventor. В открытой Всероссийской студенческой олимпиаде по начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графике 2013 года команда студентов ЮЗГУ заняла третье место в командном зачете секции «Инженерная графика». В региональных олимпиаде и конкурсе по трехмерному моделированию 2013 года, студенты, прошедшие обучение по этой методике, стали призерами.

По результатам занятий студенты публикуют статьи. Для участия в Международной молодежной научной конференции «40-е Гагаринские чтения» 2014 года, проводимой в МАТИ-РГТУ им. К.Э.Циолковского, г. Москва, студентами подготовлены четыре доклада. С 2010 года по 2013 год на эту конференцию были подготовлены семь докладов [8 – 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альшакова Е.Л. Применение информационных технологий в учебном процессе на кафедре начертательной геометрии и инженерной графики // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М. – 2013. – V. 1. I. 1. – С. 42 – 45.
2. Альшакова Е.Л. Инновационные методики обучения конструкторско-технологической подготовке производства // 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. 23 – 32.
3. Альшакова Е.Л. Компьютерные технологии при преподавании графических дисциплин //Научные труды. Вып. 18 (90). – М.: МАТИ. –2011. – С.324–328.

4. Альшакова Е.Л. Опыт олимпиад по начертательной геометрии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Лингвистика и педагогика. – Курск.: ЮЗГУ. – 2012. – №2. – С. 298 – 304.
5. Альшакова Е.Л. Организация и проведение олимпиад по начертательной геометрии в Юго-Западном государственном университете // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М. – 2013. – V. 1. I. 3. – С. 48 – 51.
6. Альшакова Е.Л. Содержание дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика» специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М. – 2013. – V. 1. I. 2. – С. 24 – 26.
7. Альшакова Е.Л. Методический комплекс обучения программированию на языке AutoLISP//Геометрия и графика.–М.: ИНФРА-М.–2013.–V.1.I.1.–С.38–41.
8. Андреев Д.А. Формирование графической базы данных для использования при обучении выполнению конструкторской документации // XXXVI Гагаринские чтения: научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. – М.: МАТИ. – 2010. – Т. 4. – С. 170 – 172.
9. Андреев Д.А. Использование информационных технологий для сопровождения лекционного курса технических дисциплин // XXXVII Гагаринские чтения: научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах. – М.: МАТИ. – 2011. – Т. 4. – С. 129 – 131.
10. Маслов В.Ю. Применение Autodesk Revit в учебном процессе // XXXIX Гагаринские чтения: научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. – М.: МАТИ. – 2013. – Т. 4. – С. 132 – 134.
11. Стариков А.В. Организация самостоятельной работы студентов в курсе инженерной графики с применением 3D технологий проектирования // XXXIX Гагаринские чтения: научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. – М.: МАТИ. – 2013. – Т. 4. – С. 151 – 153.

E.L. Alshakova

MODEL-BASED DESIGNING IN THE ENGINEERING EDUCATION ON EXAMPLE OF THE EDUCATIONAL PROCESS OF «ENGINEERING GRAPHICS» DISCIPLINE

Southwest state university, Russia.

Abstract

Model-based designing is actual, the most efficient principle of information management in the field of machine building. The concepts of the model approach are introduced in the educational process of «Engineering graphics» discipline, base for study of the following discipline of work educational plane of direction of preparation (specialty). Graphic works are prepared with used instruments of parameterization, external references, engineering instruments, automation of the creation of design documentation, existing in CAD system.

Key words: model-based engineering, digital model of a product, CAD system, information management, technologies of designing, engineering graphics.

REFERENCES

[1] Alshakova E.L. The application of information technologies in the educational process at the department of descriptive geometry and engineering graphics // Geometry and graphics. – M.: INFRA-M. – 2013. – V. 1. I. 1. – P. 42 – 45. (rus.)

[2] Alshakova E.L. Innovation techniques of training to design-technological preparation of manufacture // Modern Engineering. Science and Education: materials of 4th International scientific conference / Under editing M.M.Radkevich and A.N.Evgrafov. – SPb.: Polytechnic university. – 2013. – P. 23 – 32. (rus.)

[3] Alshakova E.L. Computer technologies when teaching of graphic disciplines //Scientific works. Issue. 18 (90). – M.: MATI. – 2011. – P. 324 – 328. (rus.)

[4] Alshakova E.L. Experience of the Olympiads on descriptive geometry // Izvestiya of Southwest state university. Series linguistics and teaching. – Kursk.: SWSU. – 2012. – N2. – P. 298 – 304. (rus.)

[5] Alshakova E.L. Organization and carry out the Olympiads on descriptive geometry in Southwest state university // Geometry and graphics. – M.: INFRA-M. – 2013. – V. 1. I. 3. – P. 48 – 51. (rus.)

[6] Alshakova E.L. Content of «Descriptive geometry and engineering graphics discipline» of specialty «Construction of the unique buildings» // Geometry and graphics. – M.: INFRA-M. – 2013. – V. 1. I. 2. – P. 24 – 26. (rus.)

[7] Alshakova E.L. Methodical complex of the education to programming on AutoLISP language // Geometry and graphics. – M.: INFRA-M. – 2013. – V. 1. I. 1. – P. 38 – 41. (rus.)

[8] Andreev D.A. Forming graphic database for use when learning to perform of design documentation // XXXVI Gagarinskie reading: scientific works of International youth scientific conference in 8 volumes. – M.: MATI. – 2010. – Vol. 4. – P. 170 – 172. (rus.)

[9] Andreev D.A. Using information technologies for accompaniment of the lecture course of technical discipline // XXXVII Gagarinskie reading: scientific works of International youth scientific conference in 8 volumes. – M.: MATI. – 2011. – Vol. 4. – P. 129 – 131. (rus.)

[10] Maslov V.YU. Using Autodesk Revit in educational process // XXXIX Gagarinskie reading: scientific works of International youth scientific conference in 9 volumes. – M.: MATI. – 2013. – Vol. 4. – P. 132 – 134. (rus.)

[11] Starikov A.V. Organization of the independent work student in engineering graphs course with using 3D technologies of designing // XXXIX Gagarinskie reading: scientific works of International youth scientific conference in 9 volumes. – M.: MATI. – 2013. – Vol. 4. – P. 151 – 153. (rus.)

УДК 378.147

И.Б.Афанасьева[1], Е.В.Князева[2]

ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

[1]Афанасьева Ирина Борисовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия. Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7714, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru

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

Аннотация

Статья посвящена вопросу организации самостоятельной работы студентов в условиях действия стандартов третьего поколения. Освещены различные формы самостоятельной работы студентов в учебно-познавательной деятельности.

Ключевые слова: самостоятельная работа студентов, учебно-познавательная активность, графические дисциплины.

Требования, предъявляемые обществом к выпускнику современной высшей школы, многократно возросший поток информации, ее новый уровень, нацеленность высшей школы на повышение качества образования влекут за собой возрастание роли самостоятельной работы в учебно-познавательной и творческой деятельности студентов.

В связи с этим деятельность преподавателя высшей школы должна быть сориентирована на решение весьма важной задачи: в системе организованного обучения дать обучающимся не только знания, но и познакомить их со способами эффективного усвоения этих знаний, самостоятельного поиска информации и активизации творческих способностей личности.

В связи с переходом на двухуровневую систему образования возрастает роль и объем самостоятельной работы студентов. Самостоятельная работа формирует готовность человека к самообучению, создает базу непрерывного образования, дает возможность постоянно повышать свою квалификацию или получать дополнительное образование.

Данные аспекты являются базисом творческого саморазвития личности будущего специалиста.

Исследования последних лет, связанные с проблемами творческого саморазвития студентов, позволяют установить, что педагогические условия современного учебного процесса должны способствовать переходу от одного вида деятельности (познавательной) к другой (профессиональной) с соответствующей сменой потребностей, мотивов, действий, результатов. Необходимо подчеркнуть, что включение студента в профессиональную деятельность, является составляющей процесса развития творческой индивидуальности [11].

В более полном смысле самостоятельная работа – это самоорганизация учебно-познавательной деятельности студента (приобретение знаний, умений и навыков при проявлении метакогнитивного контроля личности), при направляющей, поддерживающей роли преподавателя [1,2,4].

Для эффективной организации самостоятельной работы преподавателю необходимо решить несколько взаимосвязанных задач.

Во-первых, в самостоятельной работе должны в наибольшей степени раскрыться сильные индивидуальные стороны студента, поэтому авторитарный подход к организации самостоятельной работы студентов является неконструктивным. При данном подходе преподаватель определяет не только общие цели и задания, но и жестко указывает способы его выполнения и задания выдает студентам поэтапно. Согласно мнению ученых А.А.Реана, Н.В.Бордовской и С.И.Розума, в социально-перцептивном плане и в плане межличностных установок ориентация на поэтапное разграничение деятельности и поэтапный контроль свидетельствует о недоверии преподавателя к самостоятельности и ответственности своих учащихся. Более того, подобная практика ведет к снижению мотивации деятельности, поскольку студент не имеет представления о конечных целях собственной деятельности.

Таким образом, первая задача преподавателя заключается в том, чтобы определить средства организации и стимулирования процесса выполнения самостоятельной работы в изучении дисциплины так, чтобы студенты могли проявить себя с новой для себя стороны, профессионально самоопределиться и оптимально использовать свои сильные качества. Вторая, не менее важная, задача обусловлена следующим. Помимо высокого уровня квалификации, специалист должен обладать инициативностью в поиске новых решений, умением нестандартно мыслить, отстаивать свою точку зрения и быстро адаптироваться в динамично изменяющейся общественной среде. Следовательно, вторая важнейшая задача преподавателя при организации самостоятельной работы – помочь студентам понять и изучить требования к ним как специалистам в профессиональной среде.

При этом необходимо разграничить виды самостоятельной работы.

- аудиторная самостоятельная работа: конспектирование лекций, выполнение заданий на практических занятиях, контрольных работ и пр.
- внеаудиторная самостоятельная работа: написание рефератов и эссе, выполнение курсовых и дипломных работ, работа с литературой, подготовка к лекционным и практическим занятиям, подготовка к зачетам и экзаменам, выполнение отчетов по практике, получение информации из дополнительных источников (сеть Internet, электронные учебные пособия, справочная литература); доработка и дополнение материала лекций; подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних графических работ.
- инициативная самостоятельная работа студента определяется подготовкой и участием в олимпиадах по различным дисциплинам; анализом и разработкой проблемных ситуаций по учебной или исследовательской теме; участием в научно-практических студенческих конференциях, недели науки, творческих конкурсах и т.д.

Рассмотрим каждый вид самостоятельной работы отдельно.

Аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа студента входит в обязательную учебную нагрузку студентов.

В результате проведенной аудиторной и внеаудиторной самостоятельной работы преподавателем Князевой Е.В.был собран, проанализирован и откорректирован обширный объем материала (работы студентов-дизайнеров 1 курса кафедры «Инженерная графика и дизайн» СПбГПУ с 2005-2010г.) и Невского института управления и дизайна кафедра «Дизайн» с 2007-2012г.

И на основе собранного материала разработано ***методическое обеспечение*** – система учебно-программной документации и учебно-методических средств обучения, необходимых для качественной реализации образовательной программы [6].

Методическое обеспечение по художественно-графическим дисциплинам [7-10] структурировано следующим образом:

Учебно-методическое пособие «Пропедевтика (Основы композиции)» [7] (рис.1).

Тематические разделы пособия знакомят с первичными графическими закономерностями композиции, художественно-выразительными средствами построения, принципами организации и средствами гармонизации композиции. Освещены вопросы использования цвета в композиции и цветовой гармонии. Раскрывается типология композиционных средств и особенности их взаимодействия. Рассмотрены способы трансформации и принципы формообразования, графические структуры на плоскости. Значительное внимание уделено графическим композиционным приемам и основным аспектам образной

выразительности. Иллюстративный материал представлен работами студентов-дизайнеров, выполненных под руководством преподавателей.

Практические задания включают следующие темы: «Плоскостная композиция», «Графика», «Ритм», «Рельеф», «Визуальная трансформация и иллюзорные композиции», «Цвет в композиции», «Включение графики в объемную композицию», «Объемная композиция», «Построение глубинно-пространственной композиции» др.

Учебное пособие «Цветоведение и колористика» [10] (рис. 2).

Тематические разделы знакомят с историей учения о цвете, освещены вопросы физической природы цвета и света, рассмотрены особенности цветового зрения, цветовых контрастов и приемов цветовой гармонизации. Приводятся иллюстрации плоских и объемных цветовых моделей. Значительное внимание уделено физиологии восприятия цвета и его психологическому воздействию. Рассмотрены основные аспекты применения цвета в графическом и средовом дизайне.

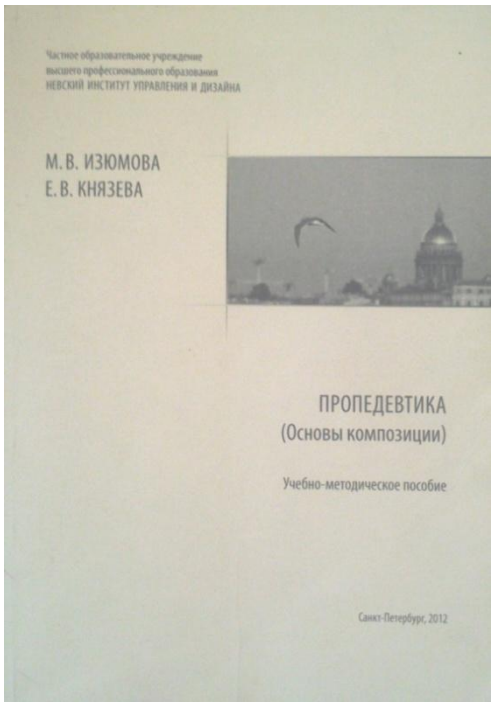


Рис. 1

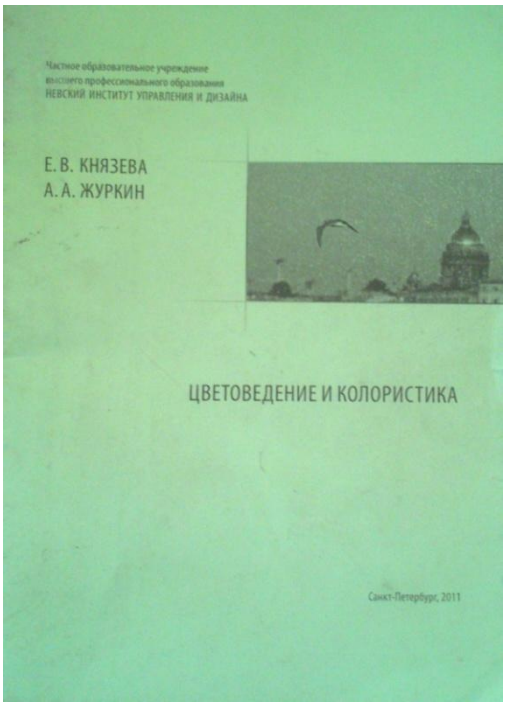


Рис. 2

В приложении представлены примеры практических заданий с методическими рекомендациями по их выполнению.

В ходе разработки методического обеспечения учитывались межпредметные связи, что позволило повысить эффективность усвоения геометро-графических и художественно-графических дисциплин. Например, в курсе «Пропедевтика» при выполнении заданий по созданию рельефных форм и объемных композиций, а также в курсе «Цветоведение и колористика» при выполнении цветовых многогранников использовались знания из области начертательной геометрии.

В результате студентами были созданы **наглядные средства обучения –** иллюстративный материал и объемные геометрические модели, которые нашли свое применение при изучении ими курса «Начертательная геометрия и технический рисунок», тема – геометрические поверхности, взаимное пересечение геометрических поверхностей.

Разработанное методическое обеспечение было апробировано и внедрено в практику учебного процесса на кафедре «Инженерная графика и дизайн» СПбГПУ, отдельные методические разработки на кафедре «Дизайн» НИУД.

Кроме того, на кафедре «Инженерная графика и дизайн», силами педагогического коллектива, разработаны и представлены на сайте кафедры электронные учебники, методические указания, примеры работ по геометро-графическим дисциплинам. Большое значение для учащихся имеет не только определение целей и задач обучения, но конкретное воплощение результатов работы в виде примеров выполнения графических заданий, курсовых работ и проектов, а применительно к студентам-дизайнерам – представление творческих работ других учащихся и преподавателей по художественно-графическим дисциплинам [3,5].

Методическое обеспечение используется в учебном процессе для очной и очно-заочной форм обучения.

Для очной формы обучения количество аудиторных часов, отведенных на изучение разных дисциплин значительно больше, чем у заочной. В связи с такими временными ограничениями для студентов-заочников самостоятельная работа выступает практически единственным методом обучения. Для данной категории студентов самостоятельная работа заключается в том, чтобы изучить материал учебных курсов по учебно-методическим пособиям, учебникам, конспекту лекций, а также в сжатые сроки выполнить определенное количество контрольных, курсовых и реферативных заданий.

Успешно справиться с таким объемом информации на заочном отделении помогают компьютерные средства обучения, телекоммуникации и сеть Internet. Они позволяют организовать процесс обучения и проведения самостоятельной работы на принципиально новом уровне и активизировать когнитивную деятельность, обеспечивая дополнительную мотивацию учения и возможность индивидуализировать обучение. В настоящее время не существует проблемы доступа к разнообразной информации, студент может приобретать знания в удобном для студента месте и в удобное для него время. Теперь эта проблема уступила место не менее сложной проблеме поиска нужных сведений в океане информации. В связи необходимым становится решение задач: совершенствовать коммуникативные навыки, учиться добывать и выделять нужное из разнообразных источников, обрабатывать, хранить, оперативно

обмениваться ею с помощью современных компьютерных технологий [2,5].

Инициативная самостоятельная работа не предусмотрена учебным планом. Она обеспечивает процессы коммуникации и кооперации студентов с коллегами по работе, помогает находить организационно-управленческие решения в нестандартных ситуациях и формировать в процессе работы профессионально важные качества: самостоятельность, ответственность, работоспособность, логическое мышление, четкость, общительность, самодисциплину, выдержку в стрессовых ситуациях, а также умение вести дискуссию и отстаивать свою точку зрения.

Успешность инициативной самостоятельной работы во многом зависит от того, насколько преподаватель сумел заинтересовать студента, стимулировать его к поиску новых знаний, создал учебно-методические пособия и средства визуализации обучения, рекомендовал источники информации, организовал познавательную деятельность наиболее рациональным образом. Например, доклад студента-первокурсника на научно-практической конференции, на Неделе науки в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете – результат не учебного задания, выполненного в течение семестра под руководством преподавателя, а самостоятельного инициативного поиска. Объем выполненной работы включает в себя: устный доклад, слайд-презентацию и публикацию. Тезисы лучших докладов публикуются в ежегодных сборниках: «Неделя науки» СПбГПУ, «Актуальные вопросы совершенствования системы высшего профессионального образования» НИУД и др. [8].

В качестве заключения хотелось бы отметить, что в современных условиях самостоятельная работа студента должна стать ведущей формой обучения в силу ряда обстоятельств:

1. Сегодня, в быстроменяющемся мире, невозможно получить знания на всю жизнь. Необходимо переходить от информационного метода обучения к эвристическому, к максимальному развитию интеллектуальных способностей личности, к умению учиться в течение всей последующей профессиональной деятельности, чтобы быть конкурентоспособным специалистом на рынке труда.

2. Знаниями, умениями, навыками каждый обучающийся овладевает только в результате самостоятельного познавательного труда, поскольку они передаются от преподавателя к студенту опосредованно, в результате субъект-субъектного взаимодействия в учебном процессе.

3. Процесс познания, направленный на выявление сущности и содержания изучаемого, подчиняется строгим законам, определяющим последовательность познания: знакомство, восприятие, переработка, осознание, принятие. Только пройдя все эти этапы, знание становится личностным и может реализовываться в профессиональной деятельности.

4. Студенты младших курсов в силу возраста находятся в особом, сензитивном периоде развития, который характеризуется активным формированием ментальных структур, наращиванием умственного потенциала, обогащением арсенала интеллектуальных проявлений личности. При этом, несмотря на благоприятный психофизический период, к творческой, активной работе приспособлены лишь те студенты, которые приучены (или хотят научиться) к систематическому умственному труду. Он развивает у человека такие личностные качества, как организованность, самодисциплина, инициатива, воля, упорство в достижении поставленной цели, вырабатывает умения анализировать факты и явления, способствует развитию творческого мышления.

Практика обучения сегодня должна ориентироваться на следующий факт: сумма знаний не может оставаться неизменной всю жизнь, что соответствует современной концепции непрерывного образования, одна из задач которого – научить человека учиться. Именно поэтому особенно актуальной в системе высшего образования становится самостоятельная работа студентов, причем задачи ее эффективной организации определяют одну из главнейших областей деятельности преподавателя вуза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева И.Б. Обучение с учетом когнитивно-стилевых особенностей студентов [Текст] / И.Б.Афанасьева, А.И.Сурыгин// Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал (основной выпуск)/ СПбГПУ.-СПб., 2008.-№ 5 (66).- С.20-27.
2. Афанасьева, И.Б. Дидактические аспекты обучения графическим дисциплинам в рамках новых ФГОС ВПО [Текст] /И.Б.Афанасьева, Т.В.Маркова// Современное образование: содержание, технологии, качество: материалы XVII Международной научно-методической конференции. Т.1. /СПбГЭТУ (ЛЭТИ).- СПб., 2011.- С.88-90.
3. Афанасьева И.Б. Система вариативного дидактического обеспечения как средство оптимизации учебного процесса. [Текст] /И.Б.Афанасьева, Н.С.Иванова, И.С.Смирнова// Проблемы качества графической подготовки студентов в технических вузах в условиях ФГОС ВПО (КГП-2011): материалы II Международной интернет-конференции. Гос.регистрация в НТЦ «Информрегистр» («Реестр электронных научных изданий») № 0321102593 /http:www.dgng.pstu.ru/conf2011/papers/11/.
4. Афанасьева И.Б. Методические аспекты технологии обучения графическим дисциплинам [Текст] /И.Б.Афанасьева, И.В.Кожевина, О.В.Меркулова, И.С.Смирнова// Современное образование: содержание, технологии, качество: материалы XVII Международной

научно-методической конференции.Т.2. /СПбГЭТУ (ЛЭТИ).- СПб., 2012.- С.75-77.
5. Афанасьева И.Б. Формирование информационно-образовательной среды в обучении дисциплинам геометро-графического цикла. [Текст] /И.Б.Афанасьева, Бежанова А.И., Л.И.Димент, О.В.Меркулова// Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XVIII Международной научно-методической конференции 28 февраля-01 марта 2013, СПб. Т3. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. С.4-6.
6. 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.
7. Изюмова М.В., Князева Е.В. Пропедевтика. Основы композиции: Учебно-методическое пособие /М.В.Изюмова, Е.В.Князева.- СПб.:Невский институт управления и дизайна, 2012 -138стр.:ил.
8. Князева Е.В. Организация самостоятельной работы у студентов-дизайнеров. Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе в условиях ФГОС ВПО. Материалы IV Международной Интернет-конференции КГП-2014 – Режим доступа: *http://dgng.pstu.ru/conf2014.*
9. Князева Е.В. Разработка методического обеспечения для студентов-дизайнеров. Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе в условиях ФГОС ВПО. Материалы II Международной Интернет-конференции КГП-2011 – Режим доступа: *http://dgng.pstu.ru/conf2011.*
10. Князева Е.В., Журкин А.А. Цветоведение и колористика: Учебное пособие: / Е.В.Князева, А.А.Журкин,- СПб.: Невский институт управления и дизайна, 2011.- 75с. (с илл.).
11. Лагунова М.В. Бригадная форма взаимодействия как условие творческого саморазвития студентов / М. В. Лагунова, М. Н. Рыскулова // Высшее образование сегодня = Higher education today : Реформы. Нововведения. Опыт.— М., 2010 .— №2 .— С. 83-86

I.B.Afanas'eva , E.V. Knyazeva

ORGANIZATION THE SELF-DETERMINATED WORK OF STUDENTS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Abstract

This paper is devoted to the problem of organization of self-determined

work of students at third generation standards. Authors put attention on various forms of self-determined work of students and pedagogical helping in the educational-cognitive activity.

Key words: self-determined work of students, educational-cognitive activity, graphic disciplines.

REFERENCES

[1] Afanas'eva I.B. Obuchenie s uchetom kognitivno-stilevykh osobennostej studentov [Tekst] / I.B.Afanas'eva, A.I.Surygin// Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU: nauchnyj zhurnal (osnovnoj vypusk)/ SPbGPU.-SPb., 2008.-№ 5 (66).- p.20-27. (rus.)

[2] Afanas'eva, I.B. Didakticheskie aspekty obucheniya graficheskim distsiplinam v ramkakh novykh FGOS VPO [Tekst] /I.B.Afanas'eva, T.V.Markova// Sovremennoe obrazovanie: soderzhanie, tekhnologii, kachestvo: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoj konferentsii. T.1. /SPbGEHTU (LEHTI).- SPb., 2011.- p.88-90. (rus.)

[3] Afanas'eva I.B. Sistema variativnogo didakticheskogo obespecheniya kak sredstvo optimizatsii uchebnogo protsessa. [Tekst] /I.B.Afanas'eva, N.S.Ivanova, I.S.Smirnova// Problemy kachestva graficheskoj podgotovki studentov v tekhnicheskikh vuzakh v usloviyakh FGOS VPO (KGP-2011): materialy II Mezhdunarodnoj internet-konferentsii. Gos.registratsiya v NTTS «Informregistr» («Reestr ehlektronnykh nauchnykh izdanij») № 0321102593 /http:www.dgng.pstu.ru/conf2011/papers/11/. (rus.)

[4] Afanas'eva I.B. Metodicheskie aspekty tekhnologii obucheniya graficheskim distsiplinam [Tekst] /I.B.Afanas'eva, I.V.Kozhevina, O.V.Merkulova, I.S.Smirnova// Sovremennoe obrazovanie: soderzhanie, tekhnologii, kachestvo: materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoj konferentsii.T.2. /SPbGEHTU (LEHTI).- SPb., 2012.- p.75-77. (rus.)

[5] Afanas'eva I.B. Formirovanie informatsionno-obrazovatel'noj sredy v obuchenii distsiplinam geometro-graficheskogo tsikla. [Tekst] /I.B.Afanas'eva, Bezhanova A.I., L.I.Diment, O.V.Merkulova// Vysokie intellektual'nye tekhnologii i innovatsii v natsional'nykh issledovatel'skikh universitetakh: materialy KHVIII Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoj konferentsii 28 fevralya-01 marta 2013, SPb. T3. – SPb.: Izd-vo Politekhn.un-ta, 2013. p.4-6. (rus.)

[6] Gomojunov K.K. Teorija i praktika vysshego professional'nogo obrazovanija / K.K. Gomojunov, V.N. Kozlov, V.I. Nikiforov, A.I.Surygin. — SPb.:Izd-vo SPbGPU, 2008. — 140p. (rus.)

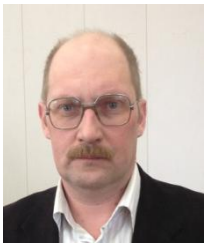
[7] Izjumova M.V., Knjazeva E.V. Propedevtika. Osnovy kompozicii: Uchebno-metodicheskoe posobie /M.V.Izjumova, E.V.Knjazeva.- SPb.:Nevskij institut upravlenija i dizajna, 2012 -138 p. (rus.)
[8] Knjazeva E.V. Organizacija samostojatel'noj raboty u studentov-dizajnerov. Problemy kachestva graficheskoj podgotovki studentov v tehnicheskom vuze v uslovijah FGOS VPO. Materialy IV Mezhdunarodnoj Internet-konferencii KGP-2014 – Rezhim dostupa: http://dgng.pstu.ru/conf2014. (rus.)
[9] Knjazeva E.V. Razrabotka metodicheskogo obespechenija dlja studentov-dizajnerov. Problemy kachestva graficheskoj podgotovki studentov v tehnicheskom vuze v uslovijah FGOS VPO. Materialy II Mezhdunarodnoj Internet-konferencii KGP-2011 – Rezhim dostupa: http://dgng.pstu.ru/conf2011. (rus.)
[10] Knjazeva E.V., Zhurkin A.A. Cvetovedenie i koloristika: Uchebnoe posobie: / E.V.Knjazeva, A.A.Zhurkin,- SPb.: Nevskij institut upravlenija i dizajna, 2011.- 75 p. (rus.)
[11] [11] Lagunova M.V. Brigadnaja forma vzaimodejstvija kak uslovie tvorcheskogo samorazvitija studentov / M. V. Lagunova, M. N. Ryskulova // Vysshee obrazovanie segodnja = Higher education today: Reformy. Novovvedenija. Opyt.— M., 2010 .— №2 .— P. 83-86 (rus.)

УДК 378.149:514

И.Б. Афанасьева[1], М.С. Кокорин[2]

ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УМЕНИЙ УЧАЩИХСЯ В ПРАКТИКЕ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

[1]Афанасьева Ирина Борисовна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: afanaseva.mmf@mail.ru



[2]Кокорин Михаил Станиславович, доцент, к.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)552-7514, E-mail: korms63@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены теоретические и методические основы формирования интеллектуальных умений в практике преподавания курса геометрического моделирования. Выделены этапы формирования интеллектуальных умений, а также геометрические и учебные задачи, общие и специфические приемы учебной деятельности.

Ключевые слова: интеллектуальные умения, учебная деятельность, геометрическое моделирование

Развитие мирового сообщества характеризуется такими технологиями общественного производства, управлять которыми может только высокоинтеллектуальная, творческая личность.

Овладение системой научных знаний, эффективная работа во многих видах теоретической и практической деятельности человека неразрывно связаны с развитыми интеллектуальными умениями. В современных условиях главной задачей образования является личностное и интеллектуальное развитие обучающихся (И.А. Зимняя, В.В. Сериков, Ю.Г. Фокин, М.А. Холодная, А.В. Хуторской и др.) [1,2,11,13,14].

Специфические черты инженерной графики и геометрического моделирования как науки и как учебной дисциплины определяют ее особое положение в ряду базисных направлений развития личности.

Геометрическое моделирование способствует развитию пространственного, логического, абстрактного мышления, творческих качеств личности, внимания, наблюдательности, формированию пространственного воображения и пространственных представлений, интеллектуальных умений, а также обеспечивает геометро-графическую грамотность специалиста [1,2,13]. Проблеме развития студентов в процессе обучения циклу геометро-графических дисциплин посвящены труды ученых А.О. Горнова, К.А. Вольхина, В.В. Степаковой, Л.А. Найниш, В.И. Якунина и др.

Авторы статьи имеют многолетний опыт преподавания курса геометрического моделирования в СПбГПУ, а также в ряде общеобразовательных школ (факультативные курсы) и естественно-научном лицее СПбГПУ (в рамках учебного предмета «Технология (конструирование и дизайн») [1-6].

Владение совокупностью приемов умственной деятельности как умение думать

Основным условием эффективности обучения является наличие у студентов интеллектуальных умений, формирование которых должно осуществляться в неразрывной связи с изучением содержания дисциплины [11,14]. Достижение целей обучения зависит, в частности, от сформированности у студентов общих и специальных приемов учебной деятельности. Общие приемы используются в разных областях знаний, специфические – отражают особенности изучаемой дисциплины и используются в пределах данной области знаний [9,12]. Познавательная деятельность включает в себя всю систему определенных действий и входящих в них знаний. Если эти приемы будут входить в содержание обучения как метазнания, то будет обогащаться метакогнитивный опыт студентов, что соответствует целям интеллектуального развития в процессе обучения.

Н.А. Менчинская понятие «интеллектуальное умение» трактует как сознательное владение рациональными приемами выполнения основных мыслительных операций (приемами умственной деятельности). Другие исследователи считают интеллектуальные умения одним из показателей общего уровня умственного развития учащихся [9,12]. Интеллектуальные умения носят обобщенный характер, поскольку в этом случае имеет место овладение общими приемами умственной деятельности, применяемыми в различных областях деятельности и по отношению к разному содержанию.

В психолого-педагогической литературе приводятся различные определения приемов умственной деятельности. В некоторых исследованиях *прием умственной деятельности* понимают как *логическую операцию* или совокупность логических операций, подчиненную

разрешению задач определенного класса. К логическим операциям авторы относят: абстрагирование, сравнение, обобщение; к логическим действиям – доказательство, опровержение. Совокупность их – это прием умственной деятельности. Д.Н. Богоявленский под приемом умственной деятельности понимает систему процессов или операций анализа, синтеза, абстракции, обобщения и других специально-организованных для решения задач (определенного типа и разной степени обобщенности).

Некоторые авторы не выделяют приемы анализа и синтеза, так как, по их мнению, вся познавательная деятельность осуществляется на основе этих процессов, которые присутствуют в любом приеме в скрытом виде. Другие считают, что в основе интеллектуальной деятельности лежат мыслительные операции: анализ и синтез, классификация, обобщение, аналогия, сравнение, подведение под понятие, установление причинно-следственных связей и т.д. [9,12]. Кроме этого исследователи выделяют общие и частные интеллектуальные умения. Первые обеспечивают решение широкого класса задач с использованием общелогических правил и обобщенных схем действий, они применимы в разных видах учебной деятельности. Вторые способствуют решению задач с использованием специфических правил, т.е. отражают специфическое содержание учебной дисциплины.

Анализ исследований по приемам умственной деятельности и формированию интеллектуальных умений показал, что большинство авторов в качестве основных приемов умственной деятельности выделяет анализ и синтез, сравнение, обобщение, классификацию и др. Все указанные приемы не являются равноценными с точки зрения решения разных задач. Они могут быть целевыми, т.е. играть главную роль, и вспомогательными, обслуживающими основной прием. Одни приемы могут включать в себя другие. Например, прием обобщения включает в себя приемы выделения главного, сравнения и др. Владение совокупностью приемов умственной деятельности называют умением думать.

В педагогических исследованиях выявлены два возможных *уровня формирования интеллектуальных умений: 1) эмпирический уровень* (без осознания учащимися используемых приемов умственной деятельности); 2*) теоретический уровень* (осознанное применение учащимися приемов). Для реализации развивающей функции образования необходим второй уровень формирования приемов. Процесс обучения в этом случае организуется следующим образом: во-первых, дается общая характеристика приема или формулируется его определение; во-вторых, дается правило – ориентир использования приема.

Этапы формирования интеллектуальных умений в обучении

Анализ процесса обучения в ряде общеобразовательных школ показал [1,2], что приемы умственной деятельности не являются предметом усвоения учащимися, а формируются стихийно, что отрицательно сказывается на умственном развитии учащихся и, как следствие, на качестве их знаний. Демонстрация или заучивание тех или иных приемов умственной деятельности непродуктивны в юношеском возрасте, поэтому процесс формирования интеллектуальных умений учащихся целесообразно строить в соответствии с определенными психолого-педагогическими теориями: *теорией умственного развития* (Д.Н. Богоявленский, Н.А. Менчинская, Е.Н. Кабанова-Меллер и др.) и *теорией поэтапного формирования умственных действий* (П.Я. Гальперина, Н.Ф. Талызина).

На основе теорий умственного развития и поэтапного формирования умственных действий, опираясь на собственный многолетний опыт преподавания курса геометрического моделирования, мы выделяем пять этапов формирования интеллектуальных умений, которые опираются на структурные компоненты познавательной деятельности личности, и определяем содержание деятельности преподавателя и студентов по формированию интеллектуальных умений на каждом из этапов.

1. ***Диагностический этап*** (структурный компонент познавательной деятельности личности – цель). Преподаватель, приступая к формированию приема умственной деятельности, прежде всего, должен провести диагностику сформированности приема у первокурсников (показатель – осознание учащимися этого приема). Целям диагностики могут служить задания двух видов: 1) направленных на выявление уровня сформированности отдельных составляющих действий приема; 2) направленных на выявление уровня сформированности самого приема. По результатам диагностики преподаватель устанавливает уровни сформированности интеллектуальных умений, по результатам анализа учебной деятельности, тестирования, наблюдения – ставит цели учебной деятельности. Студенты выполняют практические работы, включающие задания на приемы умственной деятельности.

2. ***Мотивационный этап*** (компонент – мотив). Преподавателю необходимо создать атмосферу заинтересованности студентов в овладении этим приемом. Он может использовать проблемно-поисковые методы, подробный анализ работ учащихся по основным структурным компонентам приема, подводя студентов к мысли, что для правильного выполнения приема необходимо знать его сущность и состав действия. В этом случае учащиеся принимают поставленную задачу и осознают необходимость в овладении соответствующим приемом умственной деятельности.

3. ***Ознакомительный этап*** (компонент – объект). На данном этапе происходит осмысление сути приема и правил его реализации. В зависимости от результатов диагностики ознакомительный этап может состоять из двух ступеней. Первая ступень – осознание учащимися составляющих действий приема – необходима, если получены неутешительные результаты диагностики. На второй ступени происходит разъяснение сути приема, выделение его содержания, формулируется определение и вводится правило-ориентир. Студенты должны усвоить содержание приема, характеристики действий в составе приема и т.д.

4. ***Формирующий этап*** (компонент – образец). Преподаватель организует практическую деятельность студентов по формированию умения. Здесь необходимо провести актуализацию имеющихся знаний учащихся о геометрических объектах, их свойствах и подвести к новым понятиям при выполнении заданий определенного типа. Учащиеся выполняют практические задания двух видов: направленных на усвоение отдельных составляющих действий приема и направленных на формирование самого приема.

5. ***Совершенствующий этап*** (компонент – действия). Преподаватель организует самостоятельную и творческую учебную деятельность всех видов, создает условия и способствует применению приема для более глубокого изучения программного материала, стимулирует применение алгоритмических предписаний, проверяет сознательность выполнения каждого шага. Студенты применяют сформированные умения в учебно-познавательной деятельности, осуществляя перенос приема на другие темы, в другие ситуации и другие области знания.

Контроль и коррекция учебной деятельности в качестве отдельных этапов не выделяются, так как контроль осуществляется на всех этапах и по его результатам проводятся корректирующие действия по формированию и закреплению соответствующего умения. В процессе целенаправленной работы педагога по формированию приемов умственной деятельности учащиеся разного уровня продвигаются по выделенным этапам в разном темпе, с различным содержанием формируемых приемов, с разной формой и мерой помощи со стороны преподавателя [1-5].

Наличие у студентов сформированных приемов учебно-познавательной деятельности способствует их интеллектуальному развитию. Это соответствует основополагающему принципу современной концепции образования, принципу приоритета развивающей функции в обучении [11,14]. Приемы познавательной деятельности сначала являются предметом усвоения, а потом – его средством. Формирование геометрических понятий происходит с помощью таких приемов умственной деятельности, как: анализ и синтез, сравнение объектов и их свойств, установление и использование аналогии, обобщение и

конкретизация понятий, выведение следствий из определения понятия, подведение под понятие, классификация и др. Эти приемы также необходимы студентам для овладения интеллектуальными умениями на каждом этапе.

Разработка системы вариативного дидактического обеспечения курса геометрического моделирования

Авторами разработана система вариативного дидактического обеспечения, которая основана на специальном конструировании содержания учебной дисциплины [1,2,3,5,7], форм и методов обучения (в рамках «обогащающей» методической модели) с учетом различных индивидуально-типологических особенностей студентов. Нами отобраны общие и специфические приемы, необходимые студентам для управления собственной интеллектуальной деятельностью, и разработана программа их формирования при обучении конкретному геометрическому содержанию [1,2,5]. Средствами обучения геометрическому моделированию являются: использование специальных учебных и геометрических задач (как в традиционном, так и инновационном исполнении), задачного и алгоритмического подходов в обучении, методов обучения как способов переработки элементов учебной информации. Все это позволяет преподавателю организовать управление познавательной деятельностью студентов на всех этапах учебного познания [4,7].

При характеристике учебных и геометрических задач принято выделять их сложность и трудность. Сложность задачи определяется объективными свойствами проблемной ситуации, составом ее элементов и числом связей между ними, степенью их изменчивости и неопределенности. Отражение сложной ситуации субъективно воспринимается человеком как трудность, мера переживания которой зависит от индивидуально-психологических способностей, наличия опыта, уровня развития интеллекта, общей подготовки, знаний, умений, навыков и др. Для учащихся элемент трудности в решении задач является фактором их интеллектуального развития. Ученые утверждают, что слишком трудные и слишком легкие задачи тормозят интеллектуальное развитие личности [1,2,15]. В процессе обучения решению задач преподавателю необходимо дифференцировать сложность и трудность задач, знать эти трудности и уметь помочь студентам их преодолеть.

Анализ содержания дисциплины показал, что целесообразно рассмотреть геометрические и учебные задачи в классификации Л.Н. Ланды и Л.М. Фридмана [10,15]. В результате были выделены четыре группы геометрических задач: 1) определенных классов, общий метод решения которых выражается предписанием; 2) с некорректным заданием условий (задачи с недостающими и с избыточными данными);

3) составляемых студентами по готовым проекционным моделям (эпюрам); 4) составляемых студентами на основе использования решенной ранее задачи. Кроме того, мы выделяем шесть групп учебных задач на составление: 5) схем определенных понятий; 6) предписаний по распознаванию понятий, связанных отношением; 7) предписаний по решению геометрических задач определенного типа; 8) упражнений для подведения объекта под понятие; 9) классификационных схем взаимосвязи понятий; 10) информационных схем-моделей элементов содержания курса геометрического моделирования.

Для каждой группы задач разработаны средства, с помощью которых осуществляется обучение их решению: алгоритмический и задачный подходы в обучении начертательной геометрии и соответствующие группе задач приемы. Таким образом, обогащение умственного опыта и формирование интеллектуальных умений студентов происходит в процессе решения задач выделенных групп и специального набора заданий *когнитивного*, *креативного*, *оргдеятельностного* типов. В указанные группы не включены геометрические задачи, не относящиеся к определенному классу. Для решения таких задач применяется *аналитико-синтетический метод*, которому учащиеся специально обучаются [10,15].

Учебная литература содержит огромное количество готовых задач, которые студенты решают в процессе изучения дисциплины. Однако психологами доказано, что умение решать задачи и умение составлять их – это совершенно разные умения. Составить одну задачу во много раз полезнее, чем решить несколько готовых. Самостоятельное составление задач – творческий процесс, предполагающий понимание ее структуры. Все сказанное относится и к задачам с избыточными и недостающими данными.

Результаты анализа процесса обучения решению геометрических задач, позволили сделать вывод: выделение типов и классов задач, использование общих методов решения задач определенного типа приводит к тому, что учащиеся не воспринимают каждую задачу как новую. В противном случае студенты испытывают значительные трудности при их решении. Обучение решению задач будет успешным только в том случае, если учащиеся будут управлять своей деятельностью с помощью специфических и общих приемов, составленных под руководством преподавателя. Для учащихся с низким уровнем сформированности интеллектуальных умений в дополнение к приемам решения задач преподавателю целесообразно разработать подсказки различного уровня, разной психологической направленности [4,7].

В процессе обучения курсу геометрического моделирования мы реализуем программу формирования общих и специфических приемов умственной деятельности [1-5] согласно выделенным этапам (по Ю.М. Колягину): 1) этап осмысления содержания задачи: 2) этап поиска

решения и составления плана решения; 3) этап осуществления плана решения; 4) этап обобщения найденного решения («взгляд назад»).

На *этапе осмысления* учащиеся осознают условие и требование задачи, разрабатывают отдельные элементы условия, производят поиск необходимой информации в своей памяти, соотносят с этой информацией условие и заключение задачи, выполняют построение эпюра и т.п. Такая деятельность способствует обогащению метакогнитивного опыта студентов [14].

На *этапе поиска*, при составлении плана решения задачи, студент должен подвести задачу под известный тип, приемлемые методы решения, наметить план решения и т.д. На этом этапе у учащихся формируется умение целесообразно варьировать способы решения познавательной проблемы, умение выявлять специфические особенности проблемы, формируется стремление осуществлять выбор действий и отыскивать кратчайший путь достижения цели. В процессе учебной деятельности на этом этапе обогащается когнитивный опыт (составляется схема решения задачи) и интенциональный опыт личности [14].

На *этапе осуществления решения задачи* студент должен реализовать план решения и оформить решение. На этом этапе формируются: умение вскрывать причинно-следственную связь посылки и заключения; стремление к обоснованию каждого шага решения проблемы; умение действовать в соответствии с планом; умение воспроизводить решение задачи; таким образом, происходит обогащение метакогнитивного опыта личности.

На *этапе обобщения решения* фиксируется конечный результат решения задачи, проводится его критический анализ, поиск путей рационализации решения, исследуются особые и частные случаи и т.д. На данном этапе у студентов формируются умения оценить правильность выбранных путей решения поставленной проблемы; умение исследовать различные варианты постановки задачи в зависимости от изменения условий; умение обобщать задачу. У студентов появляется желание изучить различные подходы к решению проблемы и стремление отыскать рациональный способ ее решения. Таким образом, обогащаются когнитивный, метакогнитивный и интенциональный опыты личности [14].

На всех этапах развиваются такие интеллектуальные способности, как обучаемость, креативность, конвергентные способности. Результатом решения задачи является нахождение какого-то знания, способа, модели. В этом состоит когнитивный аспект задачи. Результатами решения задач групп 1, 4, 5, 6 являются предписания определенного типа, поэтому для обучения их решению целесообразно использовать алгоритмический подход. Учебные задачи групп 7, 8, 9 решаются с помощью специальных приемов умственных действий. Для обучения решению задач групп 2, 3 используются эвристические приемы.

Проанализировав и систематизировав более 30 различных эвристических приемов решения задач, И.И. Ильясов выделил в процессе решения задачи три фазы: 1) *анализ* условия задачи; 2) *поиск* решения; 3) *проверка* решения [8]. Критерием распределения приемов по фазам решения задач является степень определенности состава эвристического приема, которая зависит от полноты знания о составе операций и последовательности их осуществления.

Если студент знает все необходимые данные для осуществления приема решения задачи, то такой прием является наиболее определенным с точки зрения его выполнения, а по механизму он является репродуктивным. В том случае, если знания о приеме имеются не полностью, то прием является наименее определенным. Если же недостающие знания можно вывести из какого-то общего знания, то прием является промежуточным по определенности.

Общий принцип состоит в том, что сначала следует использовать репродуктивные и более определенные по механизму приемы решения задач. Действия на первой фазе не дают содержательно новой информации, а позволяют лишь четко зафиксировать данное и искомое и их явные, задаваемые формулировкой задачи характеристики в полном и систематическом виде. На второй фазе необходимо применять дедуктивные выводные приемы, затем следует переходить к использованию менее репродуктивных эвристических приемов с одновременным нарастанием степени их эвристичности. После этого применяются продуктивные приемы, что дает возможность установить реализуемость или нереализуемость гипотез. Если гипотеза появилась, то ее фиксируют и затем осуществляют ее проверку и анализ на любом шаге решения. Сопоставление фаз решения задач с этапами, соответствующими методике обучения решению задач, показывает, что все фазы соответствуют процессу осмысления содержания задачи, поиску решения и составления плана, «взгляду назад».

В качестве заключения хотим отметить, что применение предложенных средств для формирования интеллектуальных умений учащихся в практике преподавания курса геометрического моделирования будет способствовать достижению целей интеллектуального развития личности и, следовательно, реализации личностных функций студента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева И.Б. Формирование интеллектуальных умений в обучении [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование» /СПбГПУ.-СПб. 2010.№4 (110).С.349-356.

2. Афанасьева И.Б. Учет когнитивно-стилевых особенностей студентов в обучении //Известия РГПУ им. А.И. Герцена № 105: научный журнал. – СПб., 2009. № 105, С.60-65.
3. Афанасьева И.Б. Психодидактический подход к обучению в вузе / Фундамент. исслед. и инновации в техн. ун-тах: Мат-лы ХП Всерос. конф. по проблемам науки и высшей шк. СПб, 14 мая 2008. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. С.314-315.
4. Афанасьева И.Б. и др. Управление педагогическим процессом при обучении начертательной геометрии [Текст] /И.Б. Афанасьева, Н.С. Иванова, И.С. Смирнова // Научно-технические ведомости СПбГПУ: научный журнал, серия «Наука и образование» / СПбГПУ.-СПб., 2011.- № 1 (117).-С.302-308.
5. Афанасьева И.Б., Кокорин М.С. Система дидактического обеспечения для реализации личностно-ориентированного обучения [Текст] / И.Б. Афанасьева, М.С. Кокорин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 января. 2013 года. В 7 частях. Часть I. 167 с. Мин-во обр. и науки – М.: «АР-Консалт», 2013. С.51-53.
6. 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 21-23 июня 2013. СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С.76-84.
7. Гельфман Э.Г., Холодная М.А., Демидова Л.Н. Психологические основы конструирования учебной информации (проблема интеллектоемких технологий преподавания) // Психологический журнал. 1993. № 3. С.38-45.
8. Ильясов И.И. Система эвристических приемов решения задач. М, 2001. 154 с.
9. Кабанова-Меллер Е.Н. Формирование приемов умственной деятельности и умственное развитие учащихся. – М.: Просвещение, 1968. 183 с.
10. Ланда Л.Н. Алгоритмизация в обучении. – М.: Просвещение, 1966. 522 с.
11. Леднев В.С. Содержание образования: сущность, структура, перспективы [Текст]. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991. 224 с.
12. Талызина Н.Ф. Педагогическая психология. М.: Академия, 1998. 288 с.
13. Покровская М.В. Инженерная графика: панорамный взгляд (научно-педагогическое исследование) [Текст]. М.: Изд-во:

Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1999. 137 с.
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. Фридман Л.Н. Теоретические основы обучения математике: Пособие для учителей, методистов и пед.вузов.– М.: МПСИ; Флинта, 1998. 224 с.

I.B.Afanasieva, M.S.Kokorin

FORMATION OF INTELLECTUAL SKILLS IN TEACHING PRACTICE OF GEOMETRIC MODELING COURSE

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper describes theoretical and methodical basis of formation of intellectual skills in teaching practice of educational activity course. Steps of forming of intellectual skills, the geometric and educational problems, the general and specific receptions of educational activity are allocated.

Key words: intellectual skills, educational activity, geometry modeling

REFERENCES

[1] Afanasieva I.B. Formirovanie intellektual'nyh umeniy v obuchenii [Tekst] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU: nauchniy zhurnal, seriya «Nauka i obrazovanie» /SPbGPU.-SPb. 2010.№4 (110). P.349-356. (rus)
[2] Afanasieva I.B. Uchet kognitivno-stilevyh osobennostey studentov v obuchenii //Izvestiya RGPU im. A.I. Gercena № 105: nauchniy zhurnal. – SPb., 2009. № 105, p.60-65. (rus)
[3] Afanasieva I.B. Psihodidakticheskiy podhod k obucheniyu v vuze / Fundament. issled. i innovacii v tehn. un-tah: Mat-ly HP Vseros. konf. po problemam nauki i vysshey shk. SPb, 14 maya 2008. – SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. p.314-315. (rus)
[4] Afanasieva I.B. i dr. Upravlenie pedagogicheskim processom pri obuchenii nachertatel'noy geometrii [Tekst] /I.B. Afanasieva, N.S. Ivanova, I.S. Smirnova // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU: nauchniy zhurnal, seriya «Nauka i obrazovanie» / SPbGPU.-SPb., 2011.- № 1 (117).-p.302-308. (rus)

[5] Afanasieva I.B., Kokorin M.S. Sistema didakticheskogo obespecheniya dlya realizacii lichnostno-orientirovannogo obucheniya [Tekst] / I.B. Afanasieva, M.S. Kokorin // Nauka, obrazovanie, obschestvo: tendencii i perspektivy: sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii 31 yanvarya. 2013 goda. V 7 chastyah. Chast' I. 167 s. Min-vo obr. i nauki – M.: «AR-Konsalt», 2013. p.51-53. (rus)
[6] Voloshinov D.V., Kokorin M.S. Ispol'zovanie metoda dopolnitel'nogo ortogonal'nogo proecirovaniya v praktike prepodavaniya kursa geometricheskogo modelirovaniya [Tekst] / D.V. Voloshinov, M.S. Kokorin // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: sbornik nauchnyh trudov po materialam Sh Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii 21-23 iyunya 2013. SPbGPU. – SPb: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. p.76-84. (rus)
[7] Gel'fman E.G., Holodnaya M.A., Demidova L.N. Psihologicheskie osnovy konstruirovaniya uchebnoy informacii (problema intellektoemkih tehnologiy prepodavaniya) // Psihologicheskiy zhurnal. 1993. № 3. p.38-45. (rus)
[8] Iliasov I.I. Sistema evristicheskih priemov resheniya zadach. M, 2001. 154 p. (rus)
[9] Kabanova-Meller E.N. Formirovanie priemov umstvennoy deyatel'nosti i umstvennoe razvitie uchaschihsya. – M.: Prosveschenie, 1968. 183 p. (rus)
[10] Landa L.N. Algoritmizaciya v obuchenii. – M.: Prosveschenie, 1966. 522 p. (rus)
[11] Lednev V.S. Soderzhanie obrazovaniya: suschnost', struktura, perspektivy [Tekst]. – 2-e izd., pererab. – M.: Vysshaya shkola, 1991. 224 p. (rus)
[12] Talyzina N.F. Pedagogicheskaya psihologiya. M.: Akademiya, 1998. 288 p. (rus)
[13] Pokrovskaya M.V. Inzhenernaya grafika: panoramniy vzglyad (nauchno-pedagogicheskoe issledovanie) [Tekst]. M.: Izd-vo: Issledovatel'skiy centr problem kachestva podgotovki specialistov, 1999. 137 p. (rus)
[14] Fokin Yu.G. Psihodidaktika vysshey shkoly: psihologo-didakticheskie osnovy prepodavaniya. – M: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 424 p. (Seriya «Pedagogika v tehnicheskom universitete»). (rus)
[15] Fridman L.N. Teoreticheskie osnovy obucheniya matematike: Posobie dlya uchiteley, metodistov i ped.vuzov.– M.: MPSI; Flinta, 1998. 224 p. (rus)

УДК 378.147

А.Л. Бочков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LMS-СИСТЕМ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Андрей Леонидович Бочков, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия,
Тел.: (812)552-7514, E-mail: a.l.bochkov@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены возможности использования LMS-систем для организации дистанционной формы обучения, проанализированы достоинства и недостатки дистанционной формы обучения, рекомендованы платформы для размещения электронного образовательного контента.

Ключевые слова: LMS-система, система управления обучением, открытые дистанционные онлайн курсы, дистанционное обучение.

Современный уровень развития и внедрение во все сферы человеческой деятельности информационных технологий, с одной стороны, позволяет активному человеку учиться, совершенствовать свои знания на протяжении всей своей жизни, с другой, подталкивает педагогов к изменению, поиску новых подходов в вопросах преподавания дисциплин. Система образования инерционна, развивается и изменяется значительно медленнее, чем происходит модернизация и обновление технологий, а информационных тем более. Однако, без внедрения в учебный процесс новых технологий и корректировки учебных программ под изменяющиеся промышленные технологии, учебное заведение не сможет удержаться на плаву и быть эффективным и востребованным потенциальными обучающимися.

Быстрое изменение технологий ведёт и к быстрому устареванию квалификаций и компетенций [2]. Меняется структура спроса на выпускников, с универсального специалиста на специалиста с отдельными компетенциями.

Уменьшение количества аудиторных часов, и увеличение часов на самостоятельную подготовку вынуждает преподавателей искать новые формы подачи учебного материала, создавать новые условия и методики обучения, методики работы с новыми средствами обучения и способы

управления самостоятельной познавательной деятельностью обучающегося, которые и являются основой современных образовательных технологий.

В этой связи, одной из важнейших задач, стоящих перед высшей школой в настоящее время, является необходимость разработки и внедрения механизмов обеспечения качества учебного процесса и расширения спектра дополнительных образовательных услуг [4-6].

На современном этапе в России дистанционные формы обучения можно рационально использовать в качестве дополнительного образования (повышение квалификации, переподготовка специалистов) и в качестве дополнительного учебного материала к основной образовательной программе, обучение студентов заочной формы.

При комбинированном обучении, используя традиционные (аудиторные) технологии и онлайн курсы [7], необходимо создать оригинальный образовательный продукт таким, чтобы он не повторял материал, который преподаватель дает в аудитории. Данный онлайн курс должен быть или дополнительным, расширяющим материалом на какую-либо тему, или, напротив, в онлайн курс можно вынести все простые темы, которые слушатель может освоить самостоятельно, а в аудитории рассматривать темы, вызывающие наибольшие затруднения.

Онлайн курс можно использовать студентом для ликвидации пробелов в знаниях, организации методической поддержки курсов повышения квалификации.

Дистанционные формы обучения имеют как достоинства [8], так и недостатки, среди которых можно выделить следующие:

преимущества дистанционных форм обучения:

- возможность получения необходимых учебных материалов независимо от времени и местонахождения обучаемого;
- возможность учащемуся жестко не придерживаться расписания и заниматься в удобное для него время;
- снижение затрат на обучение (аренда помещений и материальных ресурсов для организации учебного процесса, стоимость проезда к месту учебы, как учащихся, так и преподавателей и т. п.);
- возможность приобретения новых знаний и навыков без ограничения возраста;
- возможность проводить обучение большого количества человек.

недостатки:

- необходимость технического оснащения рабочего места учащегося компьютером и выходом в Интернет;
- онлайн обучение требует от учащегося жесткой самодисциплины и мотивации;

– отсутствие личного общения между обучаемыми и преподавателем.

Для построения системы дистанционного обучения можно использовать уже готовые платформы (LMS-системы), некоторые ВУЗы создают свои платформы. Можно также использовать CMS-системы («**Content Management System** (**CMS**) (система управления контентом) – информационная система или компьютерная программа для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления контентом») [1] совместно с системами онлайн тестирования, размещения видеоматериалов, например на Youtube.com и т.п. [3]. Остановимся на некоторых LMS-системах.

«*Система управления обучением (англ. Learning Management System, LMS)* – основа системы управления учебной деятельностью, используется для разработки, управления и распространения учебных онлайн-материалов с обеспечением совместного доступа. Создаются данные материалы в визуальной учебной среде с заданием последовательности изучения. В состав системы входят различного рода индивидуальные задания, проекты для работы в малых группах и учебные элементы для всех студентов, основанные как на содержательном компоненте, так и на коммуникативном» [1].

Известны LMS-системы, являющиеся закрытыми, в которых не каждый желающий сможет создать и выложить свой курс. Из них, наиболее распространенными в мире являются такие как: Blackboard, Coursera, EdX, Desire2Learn, Udacity. Перечисленные системы создавались ведущими мировыми университетами, которые делают ставку на качественный контент. Проверить лично возможности такой системы, удобства ее использования в роли преподавателя не представляется возможным.

К открытым LMS-системам относятся, такие как: Canvas, Udemy, Moodle, OpenLearning и др.

Примером российских разработок LMS-систем являются: платная система eLearning компании Гиперметод и закрытая система Универсариум.

Автором статьи был выполнен анализ работы открытых LMS-системы, исходя из ограниченного количества критериев, приведенных в таблице.

Неудобство работы в Moodle [9] связано с необходимостью подстраивать систему под свои требования, что связано с привлечением программистов.

Система OpenLearning имеет не понятный на интуитивном уровне интерфейс, видео и презентации не проигрываются в окне системы, их надо скачивать.

Таблица

Сравнительная таблица LMS-систем

	Открытость	Удобство	Организация платных курсов	Интерактив с преподавателем	Лекции	Создание тестов/ количество типов	Русский интерфейс
canvas BY INSTRUCTURE	✓	✓	✗	вебинар Google docs	видео	✓ /12	✓
udemy	✓	✓	✓	доска объявле-ний	видео	✓ /4	✓
moodle	✓	✗	✗	чат форум	видео	✓ /9	✓
openlearning www.openlearning.com	✓	✗	✓	чат	текст	✓ /4	частично
eLearning server	✓ платно	✗	✗	вебинар чат	видео	✓ /12	✓

Система eLearning Server компании Гиперметод требует отдельной программы eAutor для создания курса и, чтобы внести какие-либо изменения в материал уже размещенный на сервере, приходится редактировать снова исходный файл в eAutor и снова размещать на сервере.

Системы Canvas (https://canvas.instructure.com/) и Udemy (https://www.udemy.com/), имеющие интуитивно понятный интерфейс, с хорошей поддержкой, выглядят наиболее удобными для создания и размещения на них курсов. Платформа Udemy позволяет создавать также и платные курсы.

Сейчас активно внедряются «Массовые открытые онлайн курсы (*англ.* Massive open online courses (MOOC) – массивные, массовые, широкодоступные, публичные, открытые дистанционные онлайн курсы) – одна из форм дистанционного образования, интернет-курсы с масштабным интерактивным участием и открытым доступом через Интернет. В качестве дополнений к традиционным материалам учебного курса, таким как видео, чтение и домашние задания, МООС дают возможность использовать интерактивные форумы пользователей, которые помогают

создавать и поддерживать сообщества студентов, преподавателей и ассистентов» [1].

МООС может существенно расширить возможности системы образования в целом [11], к примеру, при использовании ее:

1. В дополнительном образовании при создании курсов, направленных на повышение квалификации и расширение интересов обучаемых. При этом обучаемые смогут получить информацию о новых тенденциях в определённой сфере и найти ответы на актуальные вопросы;
2. Обучаемыми, которые по разным причинам выпали из системы основного образования и не могут продолжать учиться и приобретать новые знания и навыки;
3. Обучаемыми с ограниченными возможностями.

Дистанционные курсы должны хорошо сочетаться с отечественными существующими системами преподавания, дополняя их. Они должны быть гибкими, масштабируемыми и приспосабливаемыми к изменению педагогических потребностей, быть легко поддерживаемыми и быть простыми в использовании.

Особую роль в МООС играет процесс коммуникации участников обучения. Массовость курсов приводит к тому, что студенты объединяются в сообщества, как в онлайн среде, так и в группы, встречающиеся в реальной жизни, для того чтобы помочь друг другу в обучении. В силу большого размера Интернет-сообщества студенты могут взаимодействовать друг с другом теснее, создавая, таким образом, социальную сеть по профессиональным интересам. Такие сообщества начинают непосредственно влиять на сам курс: студенты разыскивают дополнительные материалы и делятся ими, обсуждают на форумах возникшие сложности и предлагают решения.

МООС расширяет доступ к образованию, позволяет преподавателю отслеживать процесс учебы – как учатся, в какое время, в каких темах движутся вперед, в каких «застревают».

ВУЗы могут иметь доступ к закрытым платформам (Blackboard, Coursera, EdX, Desire2Learn, Udacity, Универсариум, и др.), заключив соответствующий договор о сотрудничестве.

Из изложенного выше, можно сказать, что если перед преподавателем стоит задача бесплатно разместить свой курс на какой-либо LMS-платформе, без привлечения программистов, то можно рекомендовать Canvas и Udemy.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Википедия [Электронный ресурс] // URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 07.03.2014).

2. К чему толкают высшее образование России [Электронный ресурс] // URL: http://irknod.ru/stuff/report/rus_highschool (дата обращения: 07.11.2013).
3. А.Л. Бочков, В.П. Большаков, А.В. Чагина. Информационная среда для обучения пользователей САПР геометрическому моделированию. // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ), ежемесячный научный журнал. – 2013 – №4. – С. 99-106.
4. А.Л. Бочков, А.В. Меженин, В.Т. Тозик. Повышение эффективности дистанционного обучения на основе современных мультимедийных технологий // X Международная конференция-выставка ИТО- 2000. Сборник трудов. – М.: МИФИ, 2000. – ч.III, – С. 39-40.
5. Л.А. Голдобина. Проектирование информационно-коммуникационных технологий при подготовке инженерных кадров // Перспективы развития информационных технологий. Материалы XVII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск.: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 119-124.
6. Л.А. Голдобина, А.Л. Бочков. Методические разработки для дистанционного обучения // Современное образование: содержание, технологии, качество. Материалы 18-й Международной научно-методической конференции. Т.1. – СПб.: ЛЭТИ, 2012. – С. 100-101.
7. В.А. Красильникова. Информационные и коммуникационные технологии в образовании: учебное пособие / В.А. Красильникова. – М.: ООО «Дом педагогики», 2006. – 231 с.
8. Т.В. Кузьмина, Е.В. Тихомирова, Л.Ю. Гольдфарб, Н.Ю. Дворников. Студент в среде E-Learning: учебное пособие [Электронный ресурс]. – М.: МЭСИ, 2008. – Режим доступа: http://www.bytic.ru/mesi/Zadanie/Book/elearning_1.pdf (дата обращения: 07.09.2013).
9. Ч.Д. Куулар. Недостатки систем электронного обучения на примере LMS MOODLE. //Ученые записки института социальных и гуманитарных знаний: Материалы V Международной научно-практической конференции «Электронная Казань – 2013», Казань: ЮНИВЕРСУМ, 2013. – Ч I. – С.339-342.
10. С.Л. Тимкин. Вводный курс в информационно-образовательную среду открытого образования (ИОС ОО): учеб. пособие / С.Л. Тимкин; Ом. гос. ун-т им. Ф.М. Достоевского. – Омск, 2005.
11. A primer on MOOCs. [Электронный ресурс] // URL: http://www.godcap.com/1/post/2012/11/a-primer-on-moocs.html (дата обращения: 18.11.2012).

A.L. Bochkov

LMS-SISTEM USE FOR DISTANCE LEARNING

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article discovers opportunities of LMS systems usage in organizations for distance learning, contains analysis of distance learning and recommendations of

eLearning platforms.

Key words: LMS, Learning Management System, MOOC, eLearning, distance learning, distance education, online courses.

REFERENCES

[1] Wikipedia [Electronic resource] // URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/ (address date: 07.03.2014). (rus.)
[2] To what push the higher education of Russia [An electronic resource]//with URL: http://irknod.ru/stuff/report/rus_highschool (address date: 07.11.2013). (rus.)
[3] Bochkov A.L., Bolshakov V.P., Chagina A.V. Information environment for training of users of SAPR in geometrical modeling. // News СПбГЭТУ (LETI), monthly scientific magazine. – 2013 – No. 4. – Page 99-106. (rus.)
[4] Bochkov A.L., Mezhenin A.V., Tozik V.T. Increase of efficiency of distance learning on the basis of modern multimedia technologies//the X ITO International conference exhibition - 2000. Collection of works. – M.: MEPhI, 2000. – t.III, – Page 39-40. (rus.)
[5] Goldobina L.A. Design of information and communication technologies by preparation of engineering shots//Prospects of development of information technologies. Materials XVII of the International scientific and practical conference. – Novosibirsk. : TsRNS publishing house, 2014. – Page 119-124. (rus.)
[6] Goldobina L.A., Bochkov A.L. Methodical development for distance learning//Modern education: contents, technologies, quality. Materials of the 18th International scientific and methodical conference. T.1. – SPb. : LETI, 2012. – Page 100-101. (rus.)
[7] Krasilnikova V.A. Informatsionnye and communication technologies in education: manual / VA. Krasilnikova. – M.: JSC Dom pedagogiki, 2006. – 231 pages. (rus.)
[8] Kuzmina T.V., Tikhomirov E.V., Goldfarb L.Yu., Dvornikov N.Yu. Student in the environment of E-Learning: manual [Electronic resource]. – M.: MESI, 2008. – Access mode: http://www.bytic.ru/mesi/Zadanie/ Book/elearning_1.pdf (address date: 07.09.2013). (rus.)
[9] Kuular Ch.D. Shortcomings of systems of electronic training on the example of LMS MOODLE. // Scientific notes of institute of social and humanitarian knowledge: Materials V of the International scientific and practical conference "Electronic Kazan — 2013", Kazan: YUNIVERSUM, 2013. – H I. – Page 339-342. (rus.)
[10] Timkin S.L. Introduction course on information and educational Wednesday of open education (IOS OO): studies. grant / Page L. Timkin; Ohm. the state. un-t of F.M. Dostoyevsky. – Omsk, 2005. (rus.)
[11] A primer on MOOCs. [An electronic resource] // URL: http://www.godcap.com/1/post/2012/11/a-primer-on-moocs.html (address date: 18.11.2012). (rus.)

УДК 378.147

Л.А. Голдобина[1], А.Л. Бочков[2]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГРАФИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

[1]Любовь Александровна Голдобина, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 677-5964, E-mail: lubagoldobina@rambler.ru

[2] Андрей Леонидович Бочков, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7514, E-mail: a.l.bochkov@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы создания новых подходов в обучении специалистов инженерно-технических направлений и специальностей путем внедрения дистанционных технологий, в частности созданием электронных учебно-методических комплексов и образовательных порталов по дисциплинам и отдельным курсам. Использование дополнительных (дистанционных) средств обучения способствуют эффективности общеинженерной графической подготовки студентов, формированию инженерной компетентности будущих специалистов и соответствию выпускников вуза квалификационным требованиям.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии, электронный учебно-методический комплекс, системы автоматизированного проектирования, компьютерная графика, дистанционное обучение.

В последнее время в связи с развитием высоких технологий и необходимостью подготовки высококвалифицированных специалистов, традиционная парадигма образования, которая рассматривала подготовку молодого поколения к профессиональной деятельности с использованием, созданных в других отраслях материальных ценностей, нуждается в преобразовании.

Сегодня возрастают требования со стороны общества к подготовке личности, способной к обновлению своих знаний, адаптации применения полученных знаний в новой области, что требует создания новых условий

и методов обучения, которые и являются основой современных образовательных технологий.

Цель создания новой парадигмы образования – обеспечение условий воспитания, обучения и развития свободной, критически мыслящей личности, соответствующей требованиям жизни в условиях рыночной экономики, способной к непрерывному повышению собственного уровня образования и культуры, интегрированных в мировое информационное пространство [1].

Необходимость создания новых форм представления обучающего материала, методик работы с новыми средствами обучения и способов управления самостоятельной познавательной деятельностью обучающегося, является, по мнению авторов статьи, одной из важнейших задач, стоящих перед высшей школой в настоящее время.

Использование информационных технологий в системе образования позволило создать "компьютерную методологию обучения", которая ориентирована на применение в учебном процессе таких методов, как компьютерное моделирование учебно-познавательной деятельности, метод информирования, программирование учебной деятельности, ассоциативный метод, метод тестирования, игровой метод активного обучения, метод проектов, метод "не поставленных задач", метод ситуационного моделирования и другие [2].

Одним из известных путей, позволяющих получать знания и навыки не только через традиционные формы обучения, но и дистанционно, является создание электронных учебно-методических комплексов (ЭУМК) по дисциплине, содержащих различные нормативные и методические материалы. Учебно-методический комплекс позволяет преподавателю оперативно формировать и редактировать содержание того или иного курса, создавать новые курсы программно-инструментальными средствами.

Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика являются одними из базовых дисциплин технической подготовки специалистов инженерных направлений. Известно, что на сегодняшний день количество часов на изучение геометрии в средней школе существенно сократилось, а такая дисциплина как черчение изъята из числа обязательных дисциплин, изучаемых в школе. На изучение базовых инженерных дисциплин «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика» федеральными государственными образовательными стандартами 3-го поколения (ФГОС-3) также предусмотрено недостаточное количество зачетных единиц [3].

Кроме перечисленных выше особенностей подготовки инженерных кадров в современных условиях, следует отметить, что введение ФГОС-3, основой которых является компетентностный подход в высшем образовании, требует смещения акцентов с традиционных форм обучения

путем перехода на новые современные средства и методы обучения. Решению подготовки специалистов, способных отвечать запросам современного рынка труда, содействует применение новых компьютерных образовательных технологий [4-7].

Авторами статьи были разработаны и активно используются в учебном процессе «Электронный учебно-методический комплекс» (ЭУМК) по начертательной геометрии, соответствующий программе курса «Начертательная геометрия и инженерная» [8,9] и электронный обучающий комплекс «Основы трехмерного моделирования: КОМПАС-3D; SolidWorks; Inventor» [10], предназначенные для подготовки специалистов, бакалавров и магистров, получающим образование по техническим и технологическим специальностям и направлениям очной, очно-заочной, заочной и дистанционной форм обучения. Материалы, размещенные в данных комплексах, могут быть полезны как студентам, так и преподавателям начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики высших и средних специальных учебных заведений.

ЭУМК позволяет усовершенствовать процесс обучения студентов в условиях глобальной информатизации и компьютеризации профессиональной деятельности и повышения требований общеобразовательных стандартов к графической подготовке будущих специалистов.

Известные положения начертательной геометрии в ЭУМК представлены несколько раз: прежде всего, в полном конспекте лекций; в кратком (опорном) конспекте лекций, выполненном в виде презентаций; в рабочей тетради; в тестах; в методических указаниях по выполнению контрольных работ. Такое разнообразие материала позволяет студентам с различной степенью подготовки проработать теоретический курс и научиться применять теоретические положения начертательной геометрии при решении практических задач, а также выполнить самоконтроль знаний посредством тестирования и выполнения контрольных заданий. ЭУМК позволяет, тем самым, облегчить освоение студентами трудоемкого курса начертательной геометрии в условиях недостаточного количества часов, отведенных настоящими стандартами на аудиторные занятия.

ЭУМК может быть использован не только при самостоятельной работе студентов, но и на лекционных и практических занятиях, в том числе, и для обучающихся в дистанционной форме.

В целом ЭУМК позволяет повысить эффективность общеинженерной графической подготовки студентов, способствуя формированию инженерной компетентности будущих специалистов и соответствию выпускников вуза квалификационным требованиям, предъявляемым к ним информационно-технологическим обществом.

В целом пособие написано на языке разметки гипертекстовых документов html. Основными структурными элементами документа являются разделы и подразделы учебно-методического комплекса, вызов которых осуществляется из вложенных каталогов оглавления. В состав электронного учебно-методического комплекса входят следующие электронные документы:

1. Лекции (рис.1) ориентированы в основном на индивидуальную работу студента, что не исключает использования их и в традиционных методах обучения. В каждом разделе лекций рассматривается решение типовых задач по теме, а с целью закрепления и проверки понимания пройденного материала предлагаются упражнения для самостоятельной работы. Изложение теоретического материала и примеры решения задач в конспекте лекций сопровождаются значительным количеством иллюстративного материала, что делает пособие интересным, привлекательным и доступным (рис. 2). Предлагаемые в учебном пособии алгоритмы решения геометрических задач позволяют однозначно, доступно и кратко описать последовательность процедур для достижения искомого результата, закрепить приобретенные знания и развить логическое мышление. Приобретенные навыки позволяют студентам успешно решать аналогичные задачи, а также применять полученные знания для эвристического поиска и решения прикладных конструкторских и методических задач.
2. Тестовые задания для самоконтроля, созданные в программе CourseLab, располагаются в конце каждой темы. Тесты позволяют студенту осуществлять самоконтроль знаний по мере освоения материала. Программно-дидактические тестовые задания представлены в следующих стандартизированных формах: открытой; закрытой (с выбором одного или нескольких заключений); на установление правильной последовательности; на установление соответствия (рис. 3).
3. Методические указания по выполнению контрольных работ содержат решения типовых контрольных работ с кратким изложением теоретического материала по основным темам начертательной геометрии: позиционные и метрические задачи; многогранники; способы преобразования чертежа; взаимное пересечение поверхностей.

Методические указания содержат: требования к уровню освоения дисциплины; общие указания к выполнению и оформлению работы; принятые условные обозначения; краткие теоретические сведения по темам контрольных задач; пошаговое описание решения каждой задачи с приложением алгоритма ее решения. Решение задач сопровождается графическим материалом.

4. Мультимедийные материалы созданы для лучшего понимания подходов и последовательности решения типовых контрольных задач, что особенно актуально для студентов заочной и дистанционной форм

обучения. В ЭУМК размещены видео-файлы с озвучанием пошагового решения контрольных задач (рис. 4).

5. Краткий конспект лекций в виде презентаций может быть использован как студентами, для восполнения личного конспекта лекций в случае, если они по каким-то причинам отсутствовали на занятии, так и преподавателями для проведения лекционных и практических занятий. Краткий конспект лекций в презентациях состоит из восьми лекций по основным темам начертательной геометрии (рис. 5).

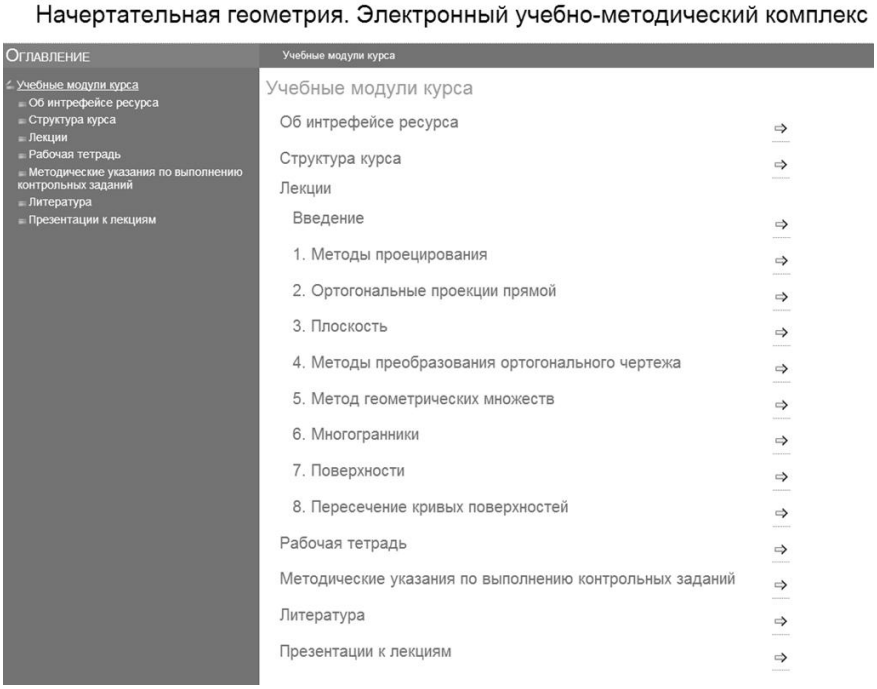


Рис. 1. Содержание ЭУМК

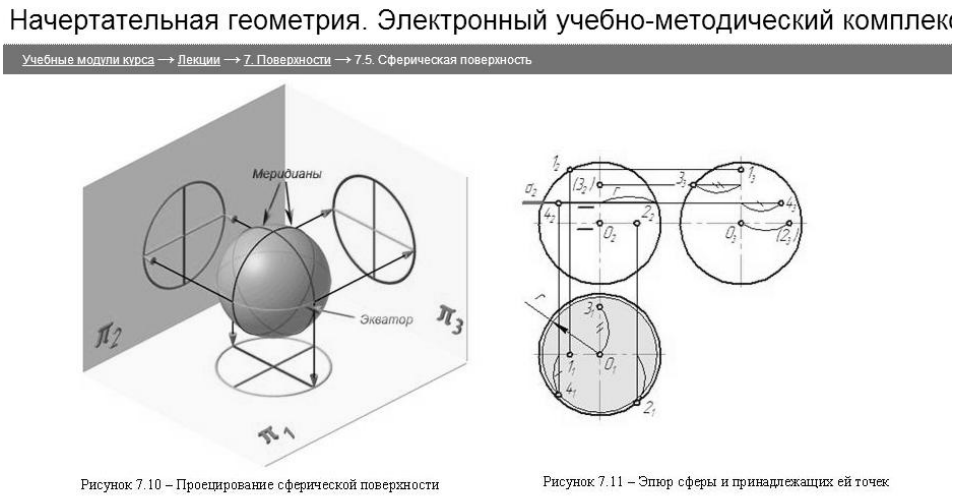


Рис. 2. Фрагмент из конспекта лекций

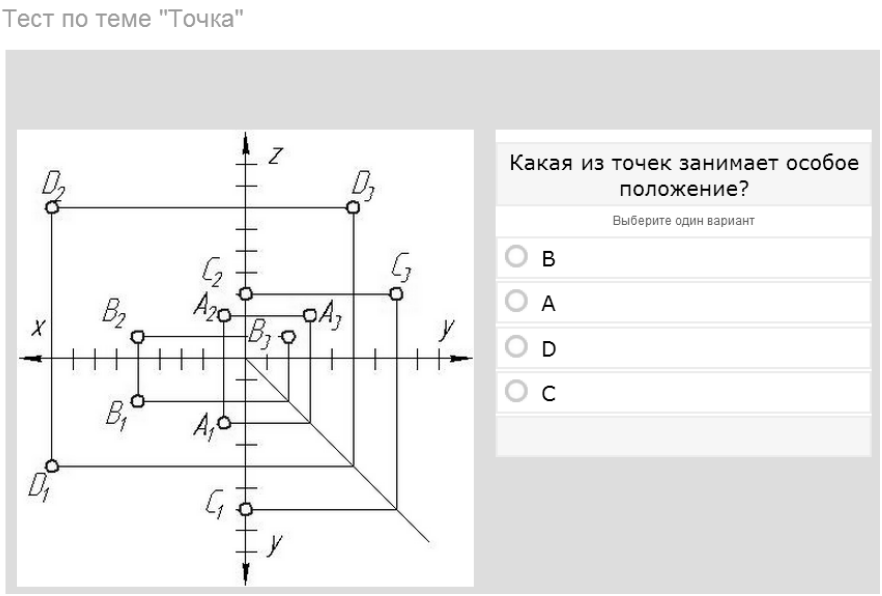


Рис. 3. Пример теста по теме «Точка»

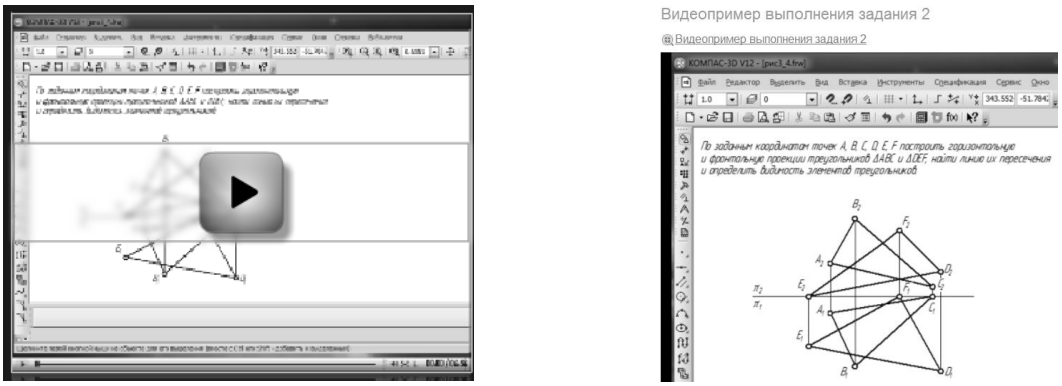


Рис. 4. Фрагмент мультимедийных уроков

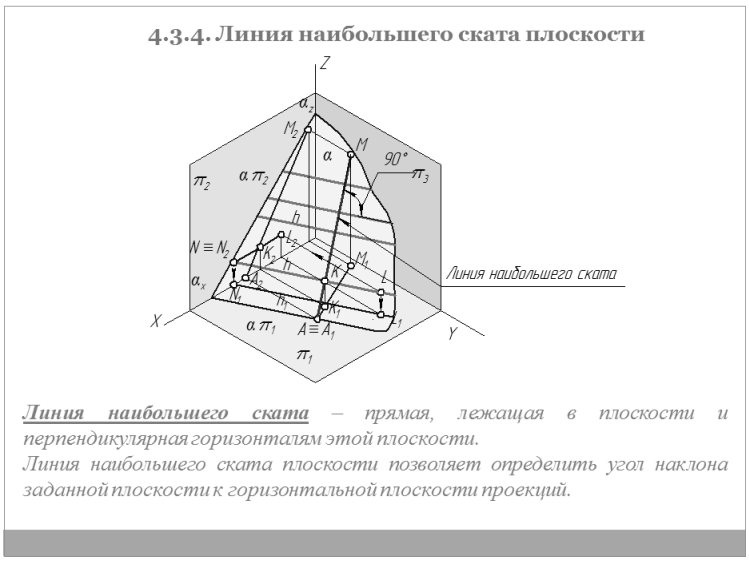


Рис. 5. Пример презентации лекции

6. Рабочая тетрадь (рис. 6) содержит: задачи по основным темам начертательной геометрии и краткую теоретическую информацию, необходимую для их решения; вопросы для самоподготовки по каждой из тем; правила оформления задач; условные обозначения, применяемые для обозначения геометрических образов на эпюре.

Задачи в рабочей тетради сгруппированы в шести темам: точка, прямая, плоскость, способы преобразования чертежа, пересечение поверхностей плоскостью, взаимное пересечение поверхностей. Перед решением задач студенту предлагается повторить материал, рассмотренный на лекции, ответить на вопросы данной темы, а затем приступить к решению задач. Часть задач решается в аудитории под руководством преподавателя, а оставшиеся по данной теме задачи студенту следует решить самостоятельно. Рабочая тетрадь выполнена с использованием системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, поэтому у студента есть возможность выполнить решение задачи в электронной версии рабочей тетради. Рабочая тетрадь по начертательной геометрии предназначена для закрепления студентами теоретических основ курса «Начертательная геометрия», приобретения навыков решения задач, освоения требований ГОСТов ЕСКД по выполнению и оформлению чертежей, и позволяет активизировать аудиторную и самостоятельную работу студентов.

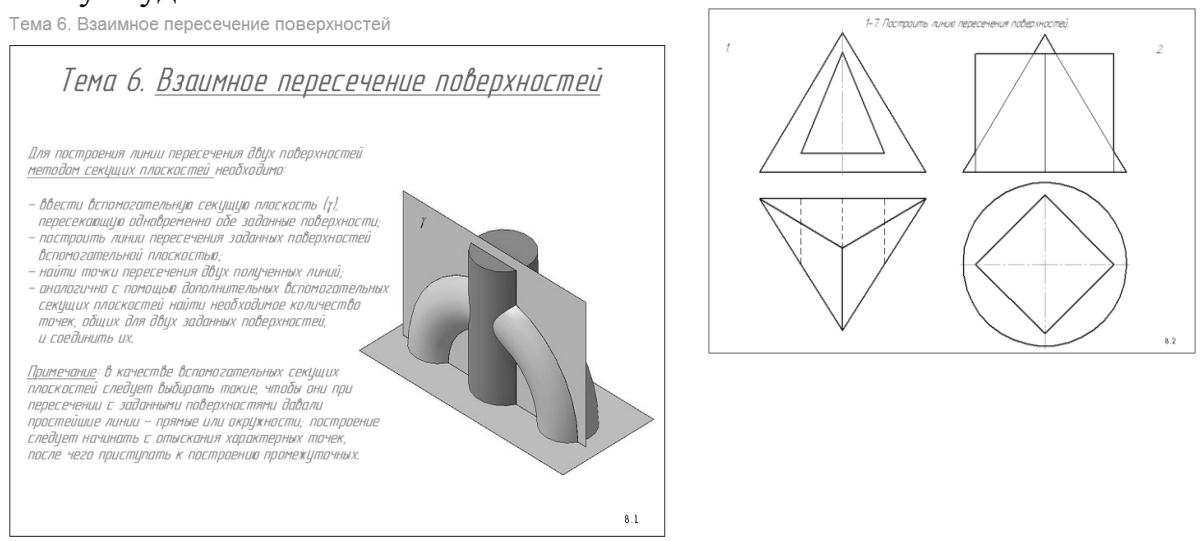


Рис. 6. Фрагмент рабочей тетради

7. Варианты контрольных заданий предназначены для самостоятельного выполнения студентами и даны в виде графических изображений условий задач с размерами или в виде координат опорных точек.

Электронный учебно-методический комплекс «Начертательная геометрия» может работать как в режиме удаленного доступа или внутри локальной сети с помощью Internet/Intranet-технологии, так и на одном компьютере. Рекомендуется использовать Web-обозреватель с поддержкой

проигрывателя Flash.

Для самостоятельного изучения и получения навыков работы с современными системами автоматизированного проектирования, позволяющими выполнять трехмерные модели технических объектов для различных отраслей экономики, а также создавать по выполненным моделям проектно-конструкторскую документацию, нами разработан и апробирован интегральный электронный обучающий комплекс «Основы трехмерного моделирования: КОМПАС-3D; SolidWorks; Inventor».

Электронный обучающий комплекс используется при изучении курса «Инженерная и компьютерная графика», содержит подробное описание лабораторных работ по основным положениям инженерной графики в части создания рабочих чертежей деталей и сборочных чертежей, а также подробное описание построения моделей объектов различного назначения и создания по этим моделям проектно-конструкторской документации с использованием известных САПР КОМПАС-3D; SolidWorks. Обучающий комплекс находится в постоянной разработке и дополнении новыми материалами (рис. 7-9).

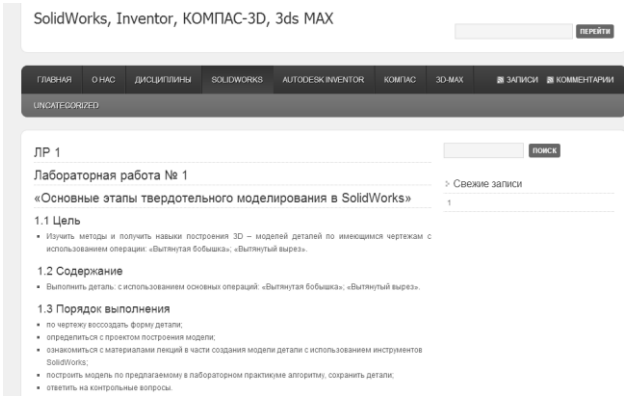


Рис. 7. Размещение материалов обучающего комплекса

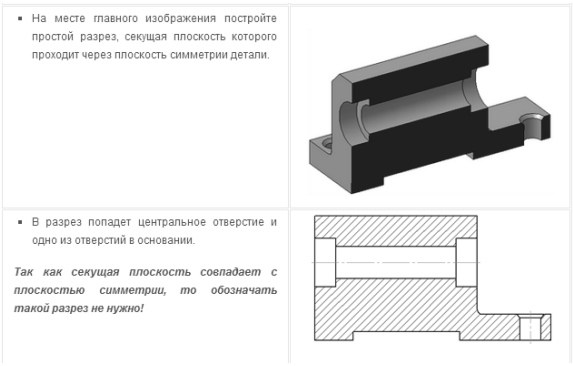


Рис. 8. Фрагмент выполнения работы «Простые разрезы»

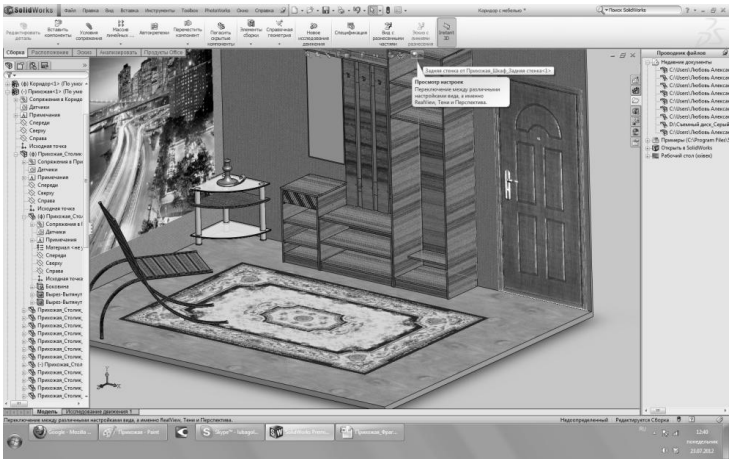


Рис. 9. Фрагмент выполнения работы «Дизайн интерьера»

Применение подобных дистанционных технологий позволяет эффективно наладить работу с целью:

- ликвидации пробелов в знаниях или получения знаний по курсам, закрепленным за кафедрой;
- углубленного изучения темы, раздела рабочей программы дисциплины;
- подготовки студентов к сдаче экзаменов;
- дополнительного образования по вопросам автоматизированного проектирования с использованием современных программных продуктов;
- обучения различных профессиональных и возрастных категорий студентов, преподавателей и специалистов;
- организации методической, научно-методической поддержки и повышения квалификации преподавателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильникова, В.А. Информационные и коммуникационные технологии в образовании: учебное пособие / В.А. Красильникова. – М.: ООО «Дом педагогики», 2006. – 231 с.
2. Дмитриев, В.М., Дмитриев, И.В. Структура автоматизированного учебно-методического комплекса по техническим дисциплинам. // Вестник РУДН. Серия «Информатизация образования», 2010, № 4.
3. Глазунов, К.О., Абросимов. С.Н. Современные особенности геометро–графической подготовки в техническом вузе // Научно-технический журнал «Технико-технологические проблемы сервиса», №2(24), 2013. – С. 115-121.
4. Голдобина, Л.А. Применение систем автоматизированного проектирования при подготовке специалистов в сфере сервиса. // Сборник научных трудов «Формирование университетских комплексов – путь стратегического инновационного развития образовательных учреждений». Том 4. – СПб.: СПбГУСЭ, 2008. – С. 107 -110.
5. Голдобина, Л.А., Засидкевич, И.Н. Опыт применения компьютерных технологий в преподавании инженерных дисциплин. // Информационно-коммуникационные технологии в подготовке учителя технологии и учителя физики: сборник материалов научно-практической конференции. Ч. 2 / отв. ред. А.А. Богуславский. – Коломна: Московский государственный областной социально-гуманитарный институт, 2010. – С. 132-136.
6. Голдобина, Л.А., Бочков А.Л. Опыт использования САПР в учебном процессе и дополнительном образовании в вузе. // Современное образование: содержание, технологии, качество. // Материалы 18-й

Международной научно-методической конференции. Т. 1. - СПб.: ЛЭТИ, 2012. –С. 98-100.
7. Голдобина, Л.А. Проектирование информационно-коммуникационных технологий при подготовке инженерных кадров. // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XVII Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 119 – 124.
8. Бочков, А.Л., Голдобина, Л.А. Методические разработки для дистанционного обучения. // Современное образование: содержание, технологии, качество. // Материалы 18-й Международной научно-методической конференции. Т. 1. - СПб.: ЛЭТИ, 2012. – С. 100-101.
9. Бочков, А.Л., Голдобина, Л.А. Начертательная геометрия. // Электронный учебно-методический комплекс (лекции, презентации лекций, рабочая тетрадь по начертательной геометрии, методические указания по выполнению контрольных работ, тесты, видеоуроки). // Депонированная рукопись от 23.06.2011 г. № 52/2011 в Учреждении ИНИиМ. Свидетельство о регистрации электронного курса № 17165 от 07.06.11 г. – М.: Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образования» Российской академии образования при Государственной академии наук, 2011.
10. http://cadinstructor.wordpress.com/ - Бочков, А.Л., Голдобина, Л.А. SolidWorks, Inventor, КОМПАС-3D, 3ds MAX: электронный курс Интернет-ресурс.

L.A. Goldobina, A.L. Bochkov

USE OF ELECTRONIC TRAINING COMPLEX IN STUDYING GRAPHIC DISCIPLINES

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper discusses the creation of new approaches to the teaching of engineers and technical fields and specialties through the introduction of remote technologies, in particular the creation of electronic teaching materials and educational portals disciplines and individual courses. The use of additional (remote) contribute to the effectiveness of teaching aids general engineering graphic preparation of students forming the engineering competence of future professionals and graduates compliance with the qualification requirements .

Keywords: information and communication technology, e-training complex, computer-aided design , computer graphics , remote training.

REFERENCES

[1] Krasil'nikova, V.A. Information and communication technology in education : a tutorial / VA Krasil'nikova . - M.: "House of Pedagogy ", 2006. - 231 p. (rus.)

[2] Dmitriev , V.M. Dmitriev , I.V. Structure -aided educational complex in technical disciplines . // Bulletin of Peoples' Friendship University . Series "Informatization of Education ", 2010, № 4. (rus.)

[3] Glazunov, K.O., Abrosimov. S.N. Modern features geometrical graphics training in a technical college // Scientific and technical journal "Technical and technological problems of service», № 2 (24), 2013. - p. 115-121. (rus.)

[4] Goldobina , L.A. The use of CAD systems with training in the field of service. // Proceedings "Formation of university complexes - innovative way of strategic development of educational institutions ." Volume 4. SPb.: SPbGUSE 2008. - Pp. 107 -110. (rus.)

[5] Goldobina, L.A., Zasidkevich, I.N. Experience of using computer technology in the teaching of engineering disciplines . // Information and communication technologies in teacher preparation technology and physics teacher: compendium of scientific and practical conference. Part 2 / Br. Ed. A.A. Boguslavskiy. - Kolomna Moscow State Regional Socio - Humanitarian Institute , 2010 . - p. 132-136. (rus.)

[6] Goldobina , L.A., Bochkov, A.L. Experience using CAD in the learning process and further education at the university. // Modern education : content, technology and quality. // Proceedings of the 18th International Scientific Conference. T. 1. - St. Petersburg: LETI, 2012. -p . 98-100. (rus.)

[7] Goldobina, L.A. Designing information and communication technologies in the training of engineers. // Prospects for the development of information technology : a collection of materials XVII International scientific and practical conference / Under total. Ed. SS Chernoff. - Novosibirsk: Publishing TSRNS 2014 . - p. 119 - 124. (rus.)

[8] Bochkov, A.L., Goldobina, L.A., Methodological development for distance learning. // Modern education : content, technology and quality. // Proceedings of the 18th International Scientific Conference . T. 1. - St. Petersburg. : LETI , 2012. - Pp. 100-101. (rus.)

[9] Bochkov , A.L., Goldobina , L.A. Descriptive Geometry. // Electronic training complex (lectures , presentations, lectures, workbook on descriptive geometry, guidelines for the implementation of examinations, tests, video tutorials). // Deposited manuscript from 23.06.2011 № 52/2011 in the Institution INIiM . Certificate of registration of an electronic course number 17165 from 07.06.11 g - M: Consolidated Fund of electronic resources "Science and Education" Russian Academy of Education at the State Academy of Sciences, 2011. (rus.)

[10] http://cadinstructor.wordpress.com/ – Bochkov, A.L. , Goldobina , L.A. SolidWorks, Inventor, KOMPAS -3D, 3ds MAX: e-course online resource.

УДК 37.013.32

А.Д. Касатиков[1], А.М. Лейбов[2], О.М. Осокина[3]

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПЕДАГОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКУЛЬТЕТОВ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ВУЗОВ

[1]Алексей Дмитриевич Касатиков
Кузбасская государственная педагогическая академия
Россия, Новокузнецк
Тел.: 8(3843) 74-03-75

[2]Алексей Михайлович Лейбов, канд. пед. наук
Новосибирский государственный педагогический университет
Россия, Новосибирск
Тел.: 8(383) 244-23-68

[3]Олеся Михайловна Осокина, канд. пед. наук
Кузбасская государственная педагогическая академия
Россия, Новокузнецк
Тел.: 8(3843) 74-03-75

Аннотация

В статье рассмотрены современные информационно-компьютерные технологии и их применение в образовательном процессе. Влияние современных технологий на формирование компетентности студентов технологических факультетов педагогических вузов.

Ключевые слова: информационные технологии в образовательном процессе, Интернет, интерактивные средства обучения, САПР-технологии, технологии дополненной реальности, технологии быстрого прототипирования.

Современное образование претерпевает непрерывные изменения. В погоне за выработкой оптимальной стратегии, парадигмы образования, меняются стандарты, требования, программы и подходы в обучении. Студенты от освоения знаний, умений, навыков переходят к овладению компетенциями разного уровня. Кардинальная перестройка принципов образования ведет к неизбежному поиску новых подходов, методик и приёмов передачи знаний. И здесь многие уповают на «помощь» вошедших в нашу жизнь информационных технологий.

Одними из таких представителей информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) можно смело назвать Интернет-технологии. Непрерывное развитие данного ресурса, начавшееся в 70-е годы прошлого столетия, идёт и сейчас. Интернет буквально захватил нашу жизнь во многих областях. Еще 10-15 лет назад никто и не подозревал, что без интернета большинство людей не смогут не жить, не работать. Тоже самое происходит и с образованием: возможности интернета изначально использовались для обмена информацией – рефератами, книгами, лекциями. Сейчас же – это мощный инструмент в руках грамотного и опытного педагога. Он несет в себе как образовательную, так и воспитательную функцию [1]. Конечно, как и в любом массовом средстве общения, в нем можно отыскать и отрицательные стороны, но будем относиться к ним как к «необходимому злу».

Сегодня Интернет это не просто склад большого объема информации, но и источник знания, инструмент обучения и средство общения. Дистанционное обучение непрерывно входит в нашу жизнь и уже практически каждое учебное заведение имеет свой сайт дистанционного обучения и использует дистанционные ресурсы для поддержки очного и заочного обучения. Кроме этого, в Федеральных государственных образовательных стандартах нового поколения, дистанционные образовательные технологии и электронное обучение стало официально признанным и рекомендованным к применению. Можно отметить, что на рынке дистанционных средств обучения одним из самых востребованных и часто используемых является модульная объектно-ориентированная дистанционная обучающая система MOODLE [7]. Данная система позволяет всесторонне организовать образовательный процесс и общение преподавателя со студентом. Одним из основных её достоинств является возможность свободного использования, так как она распространяется по свободной лицензии. В арсенале MOODLE есть такие средства организации деятельности обучающегося, как лекция, пояснения, рабочая тетрадь, форум, задание, глоссарий, опрос, тест. Данная система дистанционного обучения полноценно применяется в процессе подготовки студентов на факультете технологии и предпринимательства Новосибирского государственного педагогического университета [7].

Несомненно, средства сопровождения процесса обучения развиваются не только в направление использования Интернет-технологий. Уровень техники в области мобильных и, так называемых, touch-технологий, в последние годы повысился достаточно сильно. Это не могло не сказаться на средствах технического обучения, используемых в образовательном процессе. Повысилась всесторонняя интерактивность уже итак достаточно компьютеризированных средств. На смену занявшим свою нишу «экранным» технологиям (связка «проектор-экран» или ЖК-панель) пришли интерактивные доски и устройства. Достаточно большой спектр

разновидностей интерактивных досок позволил всесторонне применять их в учебном процессе, сочетая высокое качество отображения информации разного уровня с достаточно низкой ценой. Кроме этого появились такие интерактивные устройства как интерактивные столы, стены, полы, планшетные технологии, интерактивные опросные системы и многое другое. Также нельзя не упомянуть и про 3D-технологии в отображении виртуальной реальности. Применение всех этих средств позволяет практически бесконечно расширить методические возможности современного урока [6]. Необходимо лишь, чтобы преподаватель был достаточно компетентен в данной области. Это и является задачей современных педагогических вузов и в том числе их технически направленных факультетов – подготовить компетентного выпускника, умеющего пользоваться всеми современными новинками технического плана. Ведь ни для кого не секрет, что учитель, знающий свой предмет, безусловно ценен, но и знание современных методических возможностей применения прогрессивных технических средств обучения необходимо.

Сегодня идёт непрерывное развитие в области техники и технологий, вызванное внедрением научных достижений. Это требует от преподавателей, осуществляющих подготовку специалистов для современного производства, знания и владения данными технологиями. Эти знания необходимы для педагогов технических факультетов (факультет технологии и предпринимательства, технолого-экономический факультет и т.д.) педагогических вузов. Задача вышеупомянутых факультетов состоит в подготовке грамотных, компетентных педагогов для общеобразовательных учреждений и учреждений среднего профессионального образования, знающих не только основы трудовой деятельности, но и умеющими работать с современными промышленными и индустриальными технологиями. В данном ключе хотелось бы остановиться на технологиях автоматизации производственных процессов, в связи с тем, что не одно производство невозможно без данного направления деятельности. Отсюда и задача педагогов познакомить студентов с системами автоматизированного проектирования (САПР) и заложить основы работы с ними.

Учитывая возможности современных САПР их можно использовать и как инструмент демонстрации современных технологий, и как инструмент оптимизации и увеличения эффективности образовательного процесса. К примеру, на факультете технологии и предпринимательства НГПУ, САПР используются в преподавании предметов технической и информационной направленности: начертательная геометрия, инженерная графика, компьютерная графика, информационные технологии, детали машин, сопротивление материалов. Это дало возможность частично перейти на, так называемые, безбумажные технологии, когда студенты не чертят чертежи в ручную на бумаге, а строят их на экране монитора с помощью специализированных программ и современных технологий (параметричес-

кое черчение, ассоциативные технологии создания чертежа из модели) [2, 5, 10]. Для данного вида работ используется отечественная система трехмерного моделирования КОМПАС-3D, разработанная группой компаний АСКОН [3].

Использование САПР в преподавании технических и графических дисциплин увеличивает наглядность, уменьшает время на выполнение рутинных, подготовительных операций, позволяет повысить мотивацию и заинтересованность студентов и, главное, освоить в полной мере возможности технологий САПР. Эффективность использования САПР в преподавании показали ряд исследований, проведёнными преподавателями факультета [2, 5, 11].

Еще одним направлением, набирающим популярность, как в повседневной жизни, так и в образовании, являются технологии дополненной реальности (Augmentedreality, AR). Бурное развитие данной технологии произошло не так давно, около 5 лет назад, и связано с появлением мобильных устройств, веб-камер и интернет-технологий. Данная технология заключается в дополнении реального мира, расширяя воспринимаемую человеком действительность за счёт дополнения видимого и ощущаемого мира цифровой информацией в реальном времени.

Сегодня технологии позволяют считывать изображение окружающей действительности при помощи камер и понимать его при помощи алгоритмов распознавания образов. Окончательной предпосылкой для появления дополненной реальности стало желание людей добавить в этот мир что-то несуществующее или даже невозможное. Теперь цифровые камеры отправляют видеосигнал на компьютеры, а программы, в свою очередь, обрабатывают реальное изображение и дополняют его трехмерным виртуальным.

Исходя из этого можно выделить две основные технологии дополненной реальности – это 3D Markerless и GPS based. С помощью технологии 3D Markerless можно преобразовать в трехмерное и буквально оживить любое плоское изображение, попавшее в кадр. Камера фиксирует маркер (картинку, рисунок), нанесенный на любой объект, затем обрабатывает и выводит изображение в изменённом виде. Подобные интерфейсы дополненной реальности могут быть разделены на четыре группы по типу устройства вывода: компьютерные экраны, мобильные телефоны, встроенные в очки дисплеи и проекторы. При технологии GPS based разрабатывается программное обеспечение, которое в зависимости от местонахождения аппарата и положения его экрана в пространстве показывает соответствующую информацию о снимаемом на камеру объекте [12].

В образовании данные технологии могут найти повсеместное применение, обогащая собой плоские изображения: учебники, плакаты, различные бумажные пособия. Простейшие смартфоны, имеющие доступ в

интернет и видеокамеру, имеют уже почти 90% студентов. Осталось только нанести на плоские изображения – маркеры-метки и привычные средства обучения превратятся в новый класс обучающих средств [4].

Ещё одно направление, быстро проникающие из «серьёзного» производственного сектора, в образовательную среду – это технологии быстрого прототипирования (RP-технологиии). Заключаются они в воспроизведении моделей, полученных в 3D редакторах в реальном материале, путем печати на принтерах, так называемая, трехмерная печать. Точно так же как и другие технологии, еще 5-7 лет назад про эти технологии можно было говорить только теоретически из-за дороговизны аппаратов для печати и материалов. Сегодня уровень цен упал до 50-80 тыс. рублей и приобрести такой 3D принтер может приобрести как и учебное заведение, так и любой желающий. Возможности 3D принтеров в образовании достаточно широки. Это и получение вещественных копий моделей, демонстрация производственного цикла и современных технологий, экспериментальная и опытная деятельность студентов, широкая научная деятельность и рекламно-сувенирная продукция.

На сегодняшний день существует несколько технологий 3D печати: стереолитография, лазерное спекание порошковых материалов, послойная печать расплавленной полимерной нитью, технология струйного моделирования, технология склеивания порошков, ламинирование листовых материалов, облучение ультрафиолетом через фотомаску. Все эти технологии имеют свои преимущества и недостатки. Наиболее выгодное соотношение цена-качество для учебных заведений имеет технология послойной печати расплавленной полимерной нитью. С помощью такого принтера за несколько часов удается получить достаточно качественную модель практически любой сложности.

Учитывая требования последних версий Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования, предусматривающих реализацию академического и прикладного бакалавриата, технологии, рассмотренные в статье, дадут возможность обеспечить качественное и современное образование студентов, сформировать полный спектр компетенций, присущий современному выпускнику-бакалавру педагогического и профессионального образования [8, 9]. Кроме этого, они будут полезны для магистров в реализации научно-исследовательской деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольхин К.А., Астахова Т.А. Использование информационных технологий в курсе начертательной геометрии // Омский научный вестник. 2012. № 2-110. С. 282-286.
2. Вольхин К.А., Лейбов А.М. Проблемы формирования графической компетентности в системе высшего профессионального образования //

Философия образования. 2012. Т. 43. № 4. С. 16-22.
3. Группа компаний АСКОН: [сайт]. URL: http://ascon.ru
4. Интерактивные технологии ELEGOVISION: [сайт]. URL: http://www.eligovision.ru
5. Каменев Р.В. Влияние САПР на повышение эффективности профессионального обучения специалистов // Сибирский педагогический журнал. 2013. - № 4. - С. 98-101.
6. Каменев Р.В., Крашенинников В.В. Теоретико-методологическое обоснование использования интерактивных средств обучения в системе профессионального образования // Философия образования. 2012. - Т. 43. - № 4. - С. 160-167.
7. Каменев Р.В., Лейбов А.М. Технологии дистанционного обучения при изучении прикладных библиотек КОМПАС-3D // САПР и графика. 2010. - № 12. - С. 86.
8. Касатиков А.Д., Лейбов А.М., Осокина О.М. Оценка уровня сформированности IT-компетенций студентов-технологов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. - № 3. - С. 100-108.
9. Лейбов А.М., Осокина О.М. Оценка уровня сформированности IT-компетенций студентов ФТП и ТЭФ педагогических вузов // Вестник Кузбасской государственной педагогической академии. 2013.- № 3 (28). - С. 70-76.
10. Лейбов А.М., Крашенинников В.В.Современные аспекты использования систем автоматизированного проектирования в образовании // Философия образования. 2006. Т. 1. С. 272.
11. Лейбов А.М. Методика применения систем автоматизированного проектирования в графической подготовке студентов технического колледжа: автореф.дис.… канд.пед. наук / А.М. Лейбов; КузГПА. – Новокузнецк, 2006. – 24 с.
12. Сковпень Л.В., Лейбов А.М. Применение технологии дополненной реальности в образовании. Технологическое образование школьников и профессиональное образование в России и за рубежом. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Новокузнецк, 2013. – 174 с. С.92-94.

A.D. Kasatikov[1], A.M. Leybov[2], O.M. Osokina[1]

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF TECHNOLOGICAL FACULTIES OF PEDAGOGICAL UNIVERSITIES

[1]Kuzbass State Pedagogical Academy, Russia, Novokuznetsk
[2]Novosibirsk State Pedagogical University, Russia, Novosibirsk

Abstract

The article considers the modern information and computer technologies and their application in the educational process. The impact of modern

technology on the formation of technological competence of students of faculties of pedagogical universities.

Keywords: information technologies in educational process, the Internet, interactive learning tools, CAD-technology, augmented reality technology, rapid prototyping technology.

REFERENCES

[1] Vol'hin K.A., Astahova T.A. Ispol'zovanie informatsionnyh tehnologiy v kurse nachertatel'noy geometrii // Omskiy nauchnyj vestnik. 2012. № 2-110. P. 282-286. (rus.)
[2] Vol'hin K.A., Leybov A.M. Problemy formirovaniya graficheskoy kompetentnosti v sisteme vysshego professional'nogo obrazovaniya // Filosofiya obrazovaniya. 2012. Vol. 43. № 4. P. 16-22.(rus.)
[3] Group of companies "ASKON": [site]. URL: http://ascon.ru
[4] Interactive technologies ELEGOVISION: [site]. URL: http://www.eligovision.ru (rus.)
[5] Kamenev R.V. Vliyanie SAPR na povysheni eeffektivnosti professional'nogo obucheniya spetsialistov // Sibirskiy pedagogicheskiy zhurnal. 2013. № 4. P. 98-101. (rus.)
[6] Kamenev R.V., Krasheninnikov V.V. Teoretiko-metodologicheskoe obosnovanie ispol'zovaniya interaktivnyh sredstv obucheniya v sisteme professsional'nogo obrazovaniya // Filosofiya obrazovaniya. 2012. T. 43. № 4. P. 160-167. (rus.)
[7] Kamenev R.V., Leybov A.M. Tehnologii distantsionnogo obucheniya pri izuchenii prikladnyh bibliotek KOMPAS-3D // SAPR i grafika. 2010. № 12. P. 86. (rus.)
[8] Kasatikov A.D., Leybov A.M., Osokina O.M. Otsenka urovnya sformirovannosti it-kompetentsiy studentov-tehnologov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. 2013. № 3. P. 100-108. (rus.)
[9] Leybov A.M., Osokina O.M. Otsenka urovnya sformirovannosti it-kompetentsiy studentov FTP i TEF pedagogicheskih vuzov // Vestnik Kuzbasskoy gosudarstvennoy pedagogicheskoy akademii. 2013. № 3 (28). P. 70-76. (rus.)
[10] Leybov A.M., Krasheninnikov V.V. Sovremennye aspekty ispol'zovaniya system avtomatizirovannogo proektirovaniya v obrazovanii // Filosofiya obrazovaniya. 2006. Vol. 1. P. 272. (rus.)
[11] Leybov A.M. Metodika primeneniya system avtomatizirovannogo proektirovaniya v graficheskoy podgotovke studentov tehnicheskogo kolledzha: avtoref. dis. … kand.ped. nauk / A.M. Leybov; KuzGPA. – Novokuznetsk, 2006. – 24 p. (rus.)
[12] Skovpen' L.V., Leybov A.M. Primenenie tehnologii dopolnennoy real'nosti v obrazovanii. Tehnologicheskoe obrazovanie shkol'nikov i professional'noe obrazovanie v Rossii i zarubezhom. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Vol. 2. – Novokuznetsk, 2013. – 174 p. P.92-94. (rus.)

УДК 378.147

М.В. Лагунова[1], Н.В. Ежова[2]

ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПОДХОД В ДИСТАНЦИОННОМ ПРЕПОДАВАНИИ КУРСА МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМ МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

[1]Лагунова Марина Витальевна, к.ф-м.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 931256995, E-mail: lagmarina@gmail.com

[2]Ежова Наталья Владимировна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 9117096699, E-mail: ezhovanv@gmail.com

Аннотация

В докладе изложена информация о продолжении эксперимента по внедрению в учебный процесс дистанционного обучения математике студентов механико-машиностроительного отделения ИММиТ СПбГПУ и о применении новых интерактивных подходов. Также подводятся некоторые предварительные итоги по успеваемости студентов, обучающихся, в том числе, и по этим технологиям.

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

Как известно, в нашем университете, на кафедре «Компьютерные интеллектуальные технологии» (ИИТУ) был создан специальный сайт на основе платформы Moodle – «**Портал дистанционных образовательных технологий СПбГПУ»** http://dl.spbstu.ru/. Этот сайт содержит интернет-ресурсы по различным курсам. В том числе и такой консервативной дисциплины, как математика. На отделении механики ИММиТ в течение двух лет проводится эксперимент по применению ресурсов этого портала в учебном процессе. О принципах работы с этим сайтом и пойдет речь в настоящем докладе, а также о некоторых результатах проводимого эксперимента.

Курс математики, размещенный на Портале дистанционных образовательных технологий СПбГПУ, представляет из себя комплекс

различных обучающих элементов. Здесь кроме традиционных методических пособий студенты смогут просматривать видеолекции, записанные с помощью разработанной в нашем университете программы, в которой совмещаются слайды с анимацией и изображение преподавателя, читающего лекцию. После каждой такой лекции студент проходит небольшой тест, в котором он самостоятельно может оценить полученные знания. В случае неправильного ответа, если студент допустил традиционную ошибку, ему будет дана подсказка или пояснение, в чем состоит его ошибка. Надо заметить, что чтение лекций «с листа», да и личное присутствие на лекции не всегда обеспечивает полное понимание и усвоение курса. Процесс обучения также сильно зависит от конкретной личности студента. Есть люди, которые лучше воспринимают информацию зрительно (визуалы), в том числе чтение книг и, соответственно, учебников. А есть те, которые лучше воспринимают информацию на слух (аудиалы). Видеолекции охватывают наиболее широкий круг студентов, состоящий как из аудиалов, так и визуалов.

В этом году мы ввели в дистанционный курс математики также принципиально новые дополнения в виде практических занятий, которые, безусловно, окажутся полезными для тех, кто не до конца понял материал или не смог присутствовать на занятии, например, по причине болезни. Практические занятия построены на основе формата «Лекция» платформы Moodle. В них студенту предлагается вспомнить основные понятия из соответствующей лекции, ознакомиться с типовыми примерами и некоторые задачи решить самостоятельно. В конце каждого экрана практического занятия предлагается вопрос, при правильном ответе на который студент направляется на следующую страницу. Если же был дан неправильный ответ, то идет объяснение, почему этот ответ неправильный, и студент направляется на тот же экран или, возможно, в другой раздел, в зависимости от того, какого типа ошибка была допущена.

В конце каждой темы составлен контрольный тест, который открывается в тот момент, когда данная тема пройдена. По результатам этого теста, во-первых, студент может адекватно оценить свои знания, а во-вторых, хорошо выполненный тест дает право преподавателю поставить студенту зачет по данной теме. Обычно на прохождение контрольного теста отводится 4 часа и дается 4 попытки. Через 2 недели после того, как тест становится доступен, он автоматически закрывается. Если студент не успел за отведенные 2 недели выкроить время для написания теста, то дальше он сможет с ним работать уже только на зачетной неделе. Тест считается пройденным, если студент набрал 70% по 100-балльной шкале. Есть возможность сразу проверить свой ответ на каждый вопрос и внести исправления, правда, количество очков, набранных за это задание, в данном случае, снижается. То есть простая «угадайка» не сработает. На третьей попытке ввести ответ очки уже не

присуждаются. Степень личного участия студента оценивается на специальных коллоквиумах, средняя оценка за которые идет в зачетку. Коллоквиум проходит в присутствии преподавателя, так что смысл жульничать при написании теста сводится к минимуму.

Данная обучающая программа соответствует Standard 8 CDIO Initiative – Active Learning (Teaching and Learning based on active experiential learning methods). Как записано в этом стандарте, «студенты запоминают меньше одной четверти из того, что они услышали и только половину из того, что увидели и услышали». Предполагается более активное участие как студентов, так и преподавателей в учебном процессе. Общение происходит посредством форума, который также предусмотрен в курсе. Кроме того, некоторые навыки, которые довольно трудно проверить в режиме теста, например, построение графиков или вычисление неопределенного интеграла, студенты выполняют обычным методом – с помощью ручки и бумаги. На сайт они отправляют отсканированные копии своей работы. Это можно сделать даже с телефона. Преподаватель получает информацию о том, что студент задание выполнил или обновил (это тоже приходит в виде сообщения на телефон), и проверяет работу, оставляя свои комментарии и выставляя баллы. Преподавателями курса, имеющими доступ к информации, назначены также кураторы групп и заместитель директора по работе со студентами. Таким образом, они могут получать в любое удобное время полную информацию о состоянии дел каждого студента и проводить воспитательную работу с нерадивыми учениками.

И, наконец, отметим некоторые результаты проводимого эксперимента. Разумеется, пока у нас недостаточно данных, чтобы проводить их статистическую обработку, но успеваемость по результатам сдачи первого экзамена повысилась на 20% (с 50 до 70). Нельзя, конечно, утверждать однозначно, что тому причиной явилось именно использование интернет-технологий, но то, что дистанционное обучение не помешало – это бесспорный факт. Кроме того, студенты принимают самое деятельное участие, настаивая, например, на создании тестов по определенной тематике, выискивая ошибки и опечатки в ответах, которые, к сожалению, неизбежны на первом этапе. То есть дистанционный курс математики, как это ни парадоксально, предполагает самое активное участие студента в изучении материала и более тесную обратную связь с преподавателем. Особенно это важно, учитывая факт постоянного сокращения числа аудиторных часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.П. Козликин, М.М. Радкевич. Особенности подготовки бакалавров по новому федеральному государственному образовательному стандарту. //

Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 47-50.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. В.В. Носов. Внедрение информационных технологий в процесс изучения технических дисциплин // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 108-117.
6. Е.С. Полат, М.Ю. Бухаркина, М.В. Моисеева. Новые педагогические технологии в системе образования // М.: Издательский центр «Академия», 2002. – С. 272.
7. 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.
8. Cavalli E., Gnudi A., Lorenzi A., Malvisi L., The Virtual Classroom within Blended Learning, Proceedings of EDEN 2006 // Annual Conference, Vienna, 2006.
9. 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
10. T. Anderson, J. Dron. Learning technology through three generations of technology enhanced distance education pedagogy. // http://www.eurodl.org 13.09.2012

M.V. Lagunova. N.V. Ezhova

THE INTERACTIVE APPROACH IN DISTANT LEARNING OF MATHEMATICS FOR STUDENTS OF MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

This article highlights the extension of the experience in the use of new educational technologies in the course in mathematics for bachelors in mechanical engineering field and about new interactive approaches.

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

REFERENCES

[1] Kozlikin D.P., Radkevich M.M. Osobennosti podgotovki bakalavrov po novomu federal'nomu gosudarstvennomu obrazovatel'nomu standartu // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2011. – 47-50 p. (rus)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] Nosov V.V. Vnedrenie informacionnyh tehnologyi v process izuchenija tehnicheskih discipline. // SPb.: International scientific conference «Modern Engineering: Science and education», 2011. – 108-117 p. (rus)

[6] Polat E.S. Buharkina M.U., Moiseeva M.V. Novye pedagogicheskie tehnologii v sisteme obrazovanija. // M.: «Academia», 2002. – 272 p. (rus.)

[7] 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.

[8] Cavalli E., Gnudi A., Lorenzi A., Malvisi L., The Virtual Classroom within Blended Learning, Proceedings of EDEN 2006 // Annual Conference, Vienna, 2006.

[9] 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

[10] T. Anderson, J. Dron. Learning technology through three generations of technology enhanced distance education pedagogy. // http://www.eurodl.org 13.09.2012

УДК 51

Н. И. Лобкова[1], Ю.Д. Максимов[2], Ю.А.Хватов[3]

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО МАТЕМАТИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

[1]Наталья Ивановна Лобкова, к.ф.-м.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-67-50, E-mail: lobkova@list.ru

[2]Юрий Дмитриевич Максимов, к.ф.-м.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)492-54-17, E-mail: yuriidmax@mail.ru

[3]Юрий Алексеевич Хватов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-67-50, E-mail: chvat@mail.ru

Аннотация

В работе описан двухтомный курс математики для студентов технических направлений подготовки, который может использоваться как бакалаврами, так и магистрами. Перечислены изложенные разделы, охарактеризована структура изложения материала. Отмечена возможность использования этого пособия также студентами направлений подготовки, связанных с экономикой и при дистанционном обучении.

Ключевые слова: математика, федеральный образовательный стандарт третьего поколения.

Переход на новую систему образования «бакалавр-магистр» и на новые ФГОСы (федеральный образовательный стандарт) связан с сокращением числа часов на курс математики и тем самым ставит перед преподавателями проблему создания нового *учебника для бакалавров и магистров*. Это должен быть учебник, с одной стороны, содержащий учебный материал для подготовки бакалавров и с другой стороны, могущий быть использован и при подготовке магистров. Такой учебник (учебное пособие) был разработан в 2012-2014 годах на кафедре «Высшая математика» СПбГПУ

и принят в печать издательством «ПРОСПЕКТ» (Москва). Планируемые сроки выпуска учебного пособия — весна 2014 года. Общий объём учебного пособия: 1-й том — 36.5 печ. л. (584 стр.), 2-й том — 29,5 печ. л. (472 стр.).

Отметим особенности подготовленного пособия.

1. Учебник содержит 15 разделов, отражающих требования ФГОС-3 к общему курсу дисциплины «МАТЕМАТИКА». Вот эти разделы:

1. Линейная алгебра.
2. Векторная алгебра.
3. Аналитическая геометрия.
4. Введение в математический анализ.
5. Дифференциальное исчисление функций одной переменной.
6. Комплексные числа. Алгебраические многочлены и рациональные алгебраические дроби.
7. Интегральное исчисление функций одной переменной.
8. Дифференциальное исчисление функций нескольких переменных.
9. Дифференциальные уравнения.
10. Числовые и функциональные ряды.
11. Ряды и интеграл Фурье.
12. Интегральное исчисление функций нескольких переменных.
13. Теория поля.
14. Теория вероятностей.
15. Математическая статистика.

Разделы указаны в том порядке, который рекомендуется при изучении курса математики. Первые 8 разделов составляют содержание первого тома, а остальные — второго.

Несомненно, что всегда был и будет большой разброс в числе часов и в тематике для разных направлений подготовки. Задача преподавателя — произвести разумный отбор материала из учебного пособия и его ограничение: что доказывать, а что только формулировать и разъяснять. Подготовленный учебник хорошо рубрицирован, поэтому задача модернизации курса в упомянутом направлении может быть решена. Для одних специальностей это могут быть одни темы, для других — другие.

2. Изложение теоретического материала, методы решения основных задач сопровождаются значительным количеством примеров. Материал в пособии авторы старались изложить так, чтобы максимально помочь студенту овладеть различными математическими методами, сделать их простыми и естественными, научить свободно их применять. С этой целью в пособии довольно много места отводится разбору и решению задач на основе рассмотренных общих методов. Все приводимые примеры призваны проиллюстрировать общие методы. Они являются простыми, чтобы внимание читателя акцентировалось на методе, а не трудностях преобразований. Сам же пример, в силу его простоты, иногда может быть решён и дру-

гими частными приёмами более эффектно.

Имеется также много упражнений для самостоятельной работы (не менее 25 по каждому разделу), которые позволяют лучше усвоить изложенный материал, по существу разобраться в его содержании, проконтролировать его понимание, развить математическую культуру мышления, научить применять математический аппарат к решению простейших задач.

В упражнениях используются задания, которые могут быть решены методами, разобранными в курсе и которые посильны каждому учащемуся. Весьма рекомендуется при изучении курса делать все упражнения по мере того, как они появляются в тексте, ибо они составляют неотъемлемую часть всего изложения. Если какое-либо из упражнений вызывает затруднение, это означает, что соответствующая часть курса не усвоена и целесообразно вернуться назад.

3. Материал излагается на уровне строгости**,** принятом в настоящее время при изложении курса математики для инженерных специальностей. Уменьшена строгость некоторых доказательств, особенно во введении в анализ. Если теория включает несколько однотипных теорем, то приводятся образцы доказательств, при этом доказательства ряда теорем опускается.

В пособии не затрагиваются вопросы существования (непротиворечивости) возникающих в процессе рассуждений множеств и понятий, не подвергается сомнению принцип произвольного выбора.

В пособии приведены главы и параграфы, помеченные знаком *. К ним относятся: гамма и бета-функции, уравнения n-го порядка, однородные относительно искомой функции и её производных, степенные ряды с комплексными членами, интеграл и преобразование Фурье, доверительные интервалы для среднего квадратичного отклонения нормальной генеральной совокупности и любой генеральной совокупности при большом объеме выборки. Они содержат учебный материал, который в первую очередь может быть востребован магистрами и может быть опущен бакалаврами.

При изучении свойств функций большое внимание обращается на метод выделения главной части: показывается, что он является универсальным для решения многих задач анализа; он применяется, например, при исследовании поведения функции (пределы, экстремумы, точки перегиба, асимптоты и т. п.), исследовании сходимости рядов, при приближённых вычислениях и т. п.

4. В пособии много внимания уделено (≈ 200 стр. 2-го тома) изложению разделов 14 и 15 — «Теория вероятностей» и «Математическая статистика». Это связано с тем, что указанные разделы являются базовыми, обеспечивающими приложения в естественных и гуманитарных науках и технике. Статистические данные и выводы, полученные на их основе, используются в естественных и гуманитарных науках, в инженерной практике, экономике. Особенно велика роль статистики в решении задач управ-

ления производством, социальными группами людей, ибо без знания состояния управляемого объекта разумное управление этим объектом невозможно. Эти знания об объекте несут обработанные и осмысленные статистические данные.

5. Содержание учебника немного выходит за рамки программ для технических направлений подготовки бакалавров в соответствии ФГОС-3. Это связано с тем, что результативность современной системы образования не должна ограничиваться только объёмом приобретённых знаний, но решать задачу формирования *компетенций в области теории* (*знания*) *и компетенций как готовности и необходимости применять полученные знания* (*умения и навыки*).

Студент должен овладевать способами познавательной деятельности, чтобы на протяжении всей жизни эти знания пополнять, совершенствовать и применять на практике. Данное учебное пособие представляет студенту возможность при его заинтересованности *самостоятельно* более глубоко изучить те или иные разделы дисциплины. Только так можно овладеть навыками познавательной деятельности, и только таким путём формируются механизмы мышления.

Заметим в заключении, что учебник может быть использован (и уже используется) также студентами направлений подготовки, связанных с экономикой и при дистанционном обучении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лобкова Н.И., Лагунова М.В., Семёнов В.М.* Математика. Выпуск 1. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии. Опорный конспект. /Под ред. Ю.Д. Максимова и Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2003. – 109 с.
2. *Лобкова Н.И.* Математика. Выпуск 2. Введение в математический анализ. Дифференциальное исчисление функции одной переменной. Опорный конспект. / Под ред. Ю.Д. Максимова и Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, — 2001. 132 с.
3. *Максимов Ю.Д., Романов М.Ф., Рыжаков И. Ю.* Математика. Выпуск 3. Комплексные числа, неопределенный интеграл, определенный интеграл и его приложения, дифференциальное исчисление функций нескольких переменных переменной. Опорный конспект. /Под ред. Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 125 с.
4. *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. /Под ред. Ю.Д. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.– 109 с.
5. *Романов М.Ф., Хватов Ю.А.* Математика. Выпуск 5. Интегральное исчисление функций нескольких переменных. Теория поля. Опорный конспект /Под ред. Ю.Д. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 92 с.
6. *Максимов Ю.Д.* Математика. Выпуск 7. Опорный конспект. Теория веро-

ятностей. /Под ред. Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. — 76 с.
7. *Максимов Ю.Д.* Математика. Выпуск 8. Математическая статистика. Опорный конспект. /Под ред. Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 98 с.
8. *Максимов Ю.Д.* Математика. Выпуск 9. Теория вероятностей. Детализированный конспект. Справочник по одномерным непрерывным распределениям. /Под ред. Ю.А. Хватова. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002.– 97 с.
9. Математика. Выпуск 10, часть 1. Дополнение к опорному конспекту (выпуски 1-3). Доказательства теорем и выводы формул. Основы линейной алгебры и аналитической геометрии. Введение в математический анализ. Дифференциальное исчисление функции одной переменной. Комплексные числа, неопределенный интеграл, определенный интеграл и его приложения, дифференциальное исчисление функций нескольких переменных. /Н.И. Лобкова [и др.]; под ред. Ю.Д. Максимова и Ю.А. Хватова. СПб.: Изд. СПбГПУ, 2002. – 132 с.
10. Математика. Выпуск 10, часть 2. Дополнение к опорному конспекту (выпуски 4 - 5). Доказательства теорем и выводы формул. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Ряды. Кратные и криволинейные интегралы. Теория поля. Учеб. пособие / Н.И. Лобкова [и др.]; Под ред. Ю.Д. Максимова и Ю.А. Хватова-- СПб.: Изд. СПбГПУ, 2003.– 88 с.
11. *Лобкова Н.И., Буляница А.Л., Лагунова М.*В. Опыт реализации курса математики для бакалавров. //Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й научно-практической конференции. Под редакцией М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2013. – с 124 - 128.

N.I.Lobkova, Y.D.Maksimov, Y.A. Chvatov

TRAINING MANUAL ON MATHEMATICS FOR STUDENTS OF TECHNICAL DIRECTIONS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In the work described two-volume course in mathematics for students of technical areas that can be used as bachelors and masters. Lists the topics described the structure of the material. Noted the possibility of using this benefits students of training related to transition and in distance learning.

Keywords: mathematics, Federal educational standard of the third generation.

REFERENCES

[1] Lobkova N.I., Lagunova M.V., Semyonov V.M. Mathematics. Issue 1. Fundamentals of linear algebra and analytical geometry. A Breviary. Ed. Y. Maximov and Y. Chvatov. Spb: Publishing House of the Technical Univer-

sity, 2003. – 109 p. (rus.)
[2] Lobkova N.I. Mathematics. Issue 2. Introduction to mathematical analysis. Differential calculus of one variable functions. A Breviary. Ed. Y. Maximov and Y. Chvatov. Spb: Publishing House of the Technical University, 2001. – 132 p. (rus.)
[3] Maksimov Y.D., Romanov V.F., Ryzhakov I.Y. Mathematics. Issue 3. Complex numbers, indefinite integral, definite integral and its applications, differential calculus of functions of several variables: A Breviary. Ed. Y. Chvatov. Spb: Publishing House of the Technical University, 2001. – 125 p. (rus.)
[4] Bortkovskya M.R., Romanov M.F. Chvatov Y.A. Mathematics. Issue 4. Ordinary differential equations. Numeric and functional ranks. Fourier series and Fourier integral. A Breviary. Ed. Y. Maximov. Spb: Publishing House of the Technical University, 2001. – 109 p. (rus.)
[5] Romanov M.F., Chvatov Y.A. Mathematics. Issue 5. Integral calculus of functions of several variables. Field theory. A Breviary. Ed. Y. Maximov. Spb: Publishing House of the Technical University, 2001. – 92 p. (rus.)
[6] Maksimov Y. D. Mathematics. Issue 7. Probability theory. A Breviary. Ed. Y. Chvatov. Spb.: Publishing House of the Technical University, 2000. – 76 p. (rus.)
[7] Maksimov Y.D. Mathematics. Issue 8. Mathematical statistics. A Breviary. Ed. Y.Chvatov. Spb: Publishing House of the Technical University, 2001. – 98 p.
[8] Maksimov Y.D. Mathematics. Issue 9. Probability theory. The detailed syllabus. Handbook of one-dimensional continuous distributions. Ed. Y. Chvatov. Spb.: Publishing House of the Technical University, 2002. – 97 p. (rus.)
[9] Mathematics. Issue 10, part 1. Addition to the chimney abstract (issues
[10] 1-3). Proof of theorems and conclusions. Fundamentals of linear algebra and analytical geometry. Introduction to mathematical analysis. Differential calculus of one variable functions. Complex numbers, indefinite integral, definite integral and its applications, differential calculus of functions of several variables. /N.I. Lobkova [et al.]; Ed. Y. Maximov and Y. Chvatov. Publishing House of the Technical University. 2002.– 132 p. (rus.)
[11] Mathematics. Issue 10, part 2. Addition to the chimney abstract (issues 4-5). Proof of theorems and conclusions. Ordinary differential equations. Ranks. Multiples and curvilinear integrals. Field theory. Stud. Manual. /N.I. Lobkova [et al.]; Ed. Y. Maximov and Y. Chvatov. Publishing House of the Technical University, 2003.– 88 p. (rus.)
[12] Lobkova N.I., Bulaynitsa A.L., Lagunova M.V. Mathematics experiences for undergraduate students. //Modern machinery. Science and education: 3-th scientific and practical Conference. Edited by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. Spb.: Publishing House of the Technical University, 2013. – from 124-128 p. (rus.)

УДК 62.133, 69.002.5

О.В.Мкртычев

ВВЕДЕНИЕ ФАКУЛЬТАТИВНЫХ КУРСОВ ДЛЯ БАЗОВЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН

Олег Витальевич Мкртычев, доцент
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, филиал в г.Новороссийск
Россия, Новороссийск
Тел.: (8617)22-1333, E-mail: oleg214@ya.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы проблемы, возникающие с получением и усвоением знаний по фундаментальным дисциплинам, в связи с сокращением по новым учебным планам отводимого на их изучение времени. Предлагается для сохранения возможности у обучающихся получить необходимый набор компетенций и умений дополнять возникающие пробелы введением факультативных курсов.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, вариационные принципы механики, колебания, вибрации, вибратор направленных колебаний.

Модернизация системы высшего образования в соответствии с принципами Болонской декларации в организационном и методическом плане выдвигает перед профессорско-преподавательским составом ряд проблем в организации профессиональной подготовки студентов [1, 2]. Среди них и резкое сокращение времени, отводимого на изучение каждой дисциплины, и смещение акцентов в методике обучения с «ручного» процесса вычислений и построений в «автоматический» [3-6]. Так как для выполнения конкретной профессиональной деятельности будущим бакалаврам и магистрам потребуются знания, умения и навыки в рамках выполнения профессиональных функций специалиста, то выходом из сложившейся ситуации может быть только создание факультативных курсов по выбору обучающегося. В отношении инженерно-технических специальностей сокращение времени при изучении таких фундаментальных дисциплин, как «теоретическая механика» и «теория механизмов и машин», крайне желательно введение курсов «вариативные принципы механики», «колебания».

Например, в строительстве (как и во многих других технологических областях) широкое применение находят вибромеханизмы [7, 8].

Применению и принципам работы таких механизмов посвящено большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных авторов [9-13]. Следовательно, можно в факультативном курсе «колебания» ввести в рассмотрение главу о работе вибромеханизмов. В частности, методически удобно рассмотреть вибромеханизмы на базе гипоциклоид и гипотрохоид [14-16], которые можно применять для получения направленных вибраций, в том числе, и для получения прямолинейно направляющих механизмов [17]. При этом можно рассмотреть общий вид уравнений движения в параметрической форме (параметром является угол качения). Для примера на рис.1 показаны треугольные и четырёхугольные гипоциклоиды, на рис. 2 – треугольные гипотрохоиды: укороченная и удлинённая.

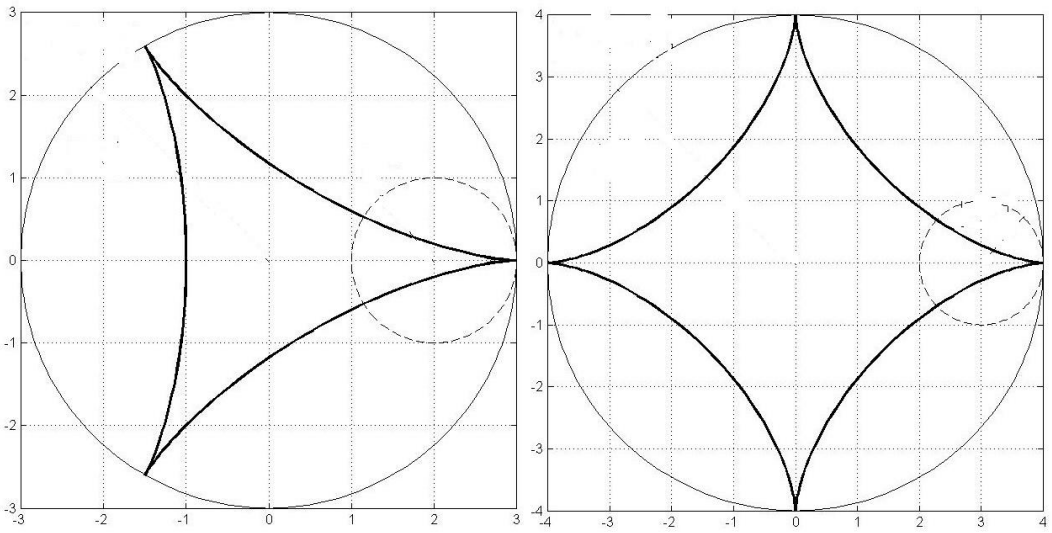


Рис. 1 – Гипоциклоиды (жирно): треугольная слева и четырёхугольная справа.

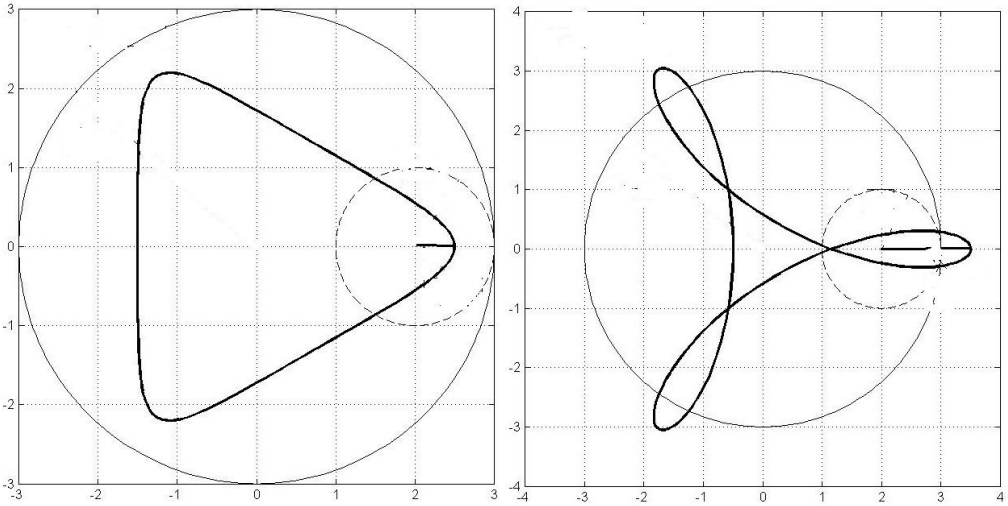


Рис. 2 – Гипотрохоиды (жирно) треугольные: укороченная слева и удлинённая справа.

Дифференцированием этих уравнений движения можно получить для точки качения уравнения скорости и ускорения и построить фазовые портреты движений (рис. 3, 4).

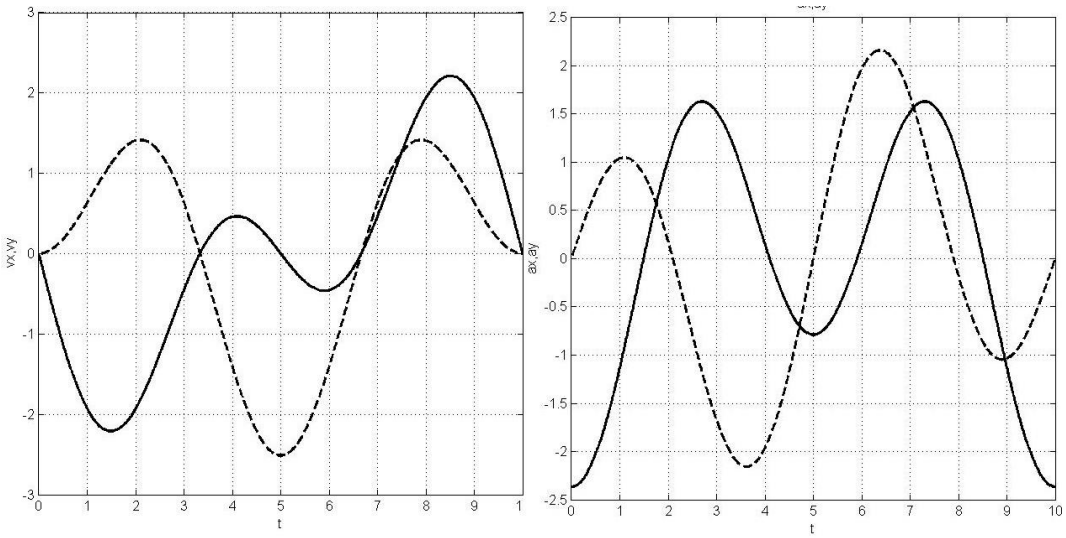


Рис. 3 – графики проекций скоростей (слева) и ускорений (справа) на оси абсцисс (сплошные линии) и оси ординат (штриховые линии) в зависимости от времени для треугольной гипоциклоиды.

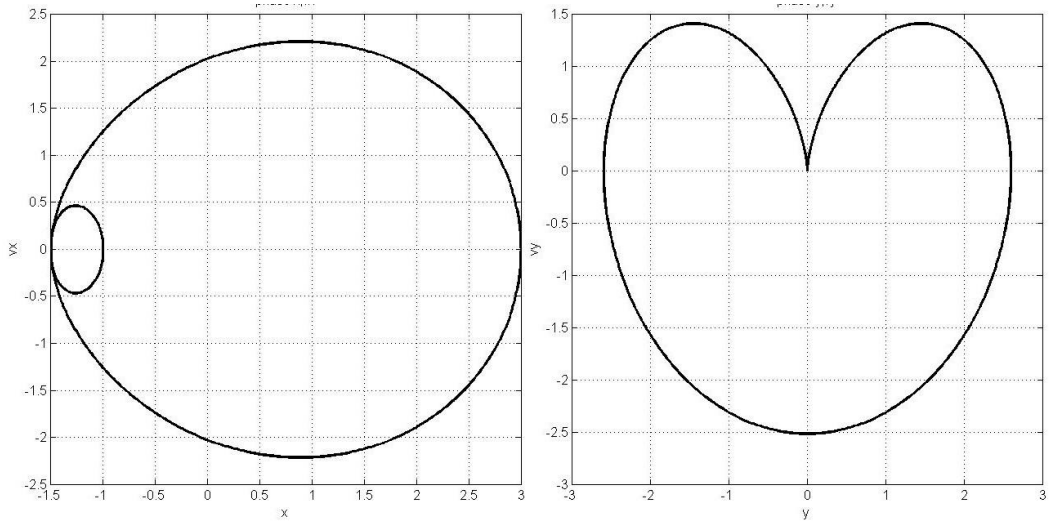


Рис. 4 – графики на фазовых плоскостях x-v_x (слева) и y-v_y (справа) для треугольной гипоциклоиды.

В различных технологических процессах получили широкое распространение вибраторы [18]. Метод возбуждения механических колебаний с помощью планетарных вибраторов получает дополнительные области применения если получать направленные колебания [17, 18]. Описанные в [7, 8] способы возбуждения механических колебаний в планетарном одновальном вибраторе [17], в котором траектория движения

центра масс зависит от соотношения диаметров планетарной и венцовой шестерён, является хорошим практическим примером применения гипоциклоидных механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мкртычев О.В. О кредитно-балльном рейтинге оценок знаний студентов. // Современное машиностроение – наука и образование. Материалы 3-й международной научно-практической конференции, СПбГПУ. – под ред. Радкевича М.М., Евграфова А.Н. СПб, 2013.
2. Мкртычев О.В. Компьютерные технологии в преподавании ТММ - цель или средство? // Современное машиностроение – наука и образование. Материалы 2-й международной научно-практической конференции, СПбГПУ. – под ред. Радкевича М.М., Евграфова А.Н. – СПб, 2012. – С.96-102. – 844 с.
3. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при кинематическом анализе плоских механизмов. // Теория механизмов и машин. – СПб, 2012. – Т. 10. № 19. – С. 46-52.
4. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при силовом расчёте плоских механизмов. // Теория механизмов и машин. – СПб, 2013. – Т. 11. № 21. – С. 77-83.
5. Мкртычев О.В. О некоторых проблемах и возможностях модернизации в преподавании курса «теория механизмов и машин». // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2014. – № 1. – С. 217-219.
6. Мкртычев О.В. Проблемы обучения студентов компьютерному моделированию при изучении дисциплин «теоретическая механика» и «теория механизмов и машин». // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2012. – № 2. – С. 211-214.
7. Герасимов М.Д. Способ получения направленных механических колебаний для практического применения в технологических процессах. // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 1. С. 35-38.
8. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М. Определение закона движения, скорости и ускорения центра масс планетарного вибровозбудителя. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 12. – С. 8-11.
9. Zhang M., Wei J.M., Xue L., Xu M.J. The study in the application of FFT in vibroseis data harmonic filtering. // Applied Mechanics and Materials, 380-384 (2013), 3589-3594.

10. Labutin V.N., Mattis A.R. Method to reduce a piled rock resistance to penetration of a loading-hauling machine bucket. // Journal of Mining Science, 47 (2011), 3, 360-366.
11. Taradai D.V., Komarov V.A., Gerasimov V.P., Shuranova Yu.A. Method for vibration diagnostics of turbine units under repair using the VTI vibration exciter and modern means of vibrometry. // Power Technology and Engineering, (2012), 1-5.
12. Taradai D.V., Komarov V.A., Gerasimov V.P., Shuranova Y.A. Method for vibration diagnostics of turbine units under repair using the VTI vibration exciter and modern means of vibrometry. // Power Technology and Engineering, 46 (2012), 3, 239-243.
13. Pevchev V.P. Choosing parameters of design elements of an impulse seismic source. // Journal of Mining Science, 48 (2012), 2, 339-346.
14. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. // Издание переработанное, пер. с нем. под ред. Гроше Г. и Циглера В. / Совместное издание изд-во «Тойбнер», Лейпциг, ГДР и изд-во «Наука», Москва, СССР. Главная редакция физико-математической литературы. / 1981 г. / 720 с., с илл.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров // Изд-во «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. / М. / 1973 г. / 832 с., с илл.
16. Гильберт Д., Кон-Фоссен С. Наглядная геометрия. // пер. с нем. Каменецкого С.А. / Объединённое научно-техническое издательство НКТП СССР. Главная редакция общетехнической литературы и номографии. / М., Л. / 1936 г. / 302 с.
17. Герасимов М.Д., Исаев И.К. Способ направленных колебаний и устройство для его осуществления. // Патент RU 2381078 C2, B 06B 1/00, 24.12.2007.
18. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов: Справочник / Под.ред. В.А.Баумана и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 548 с.

O.V.Mkrtychev

INPUT of FACULTATIVE COURSES for BASE FUNDAMENTAL DISCIPLINES

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, branch in Novorossiysk, Russia

Abstract

In work the questions of a problem arising with reception and mastering of knowledge on fundamental disciplines, in connection with reduction under new curricula of time taken away on their studying are considered. It is offered for preservation of possibility at trained to receive a necessary set of competitions and abilities to supplement arising blanks introduction of facultative courses.

Key words: applied mechanics, variation principles of mechanics, fluctuation, vibration, the vibrator of the directed fluctuations.

REFERENCES

[1] Mkrtychev O.V. About a credit-mark rating of estimations of knowledge of students. // Modern mechanical engineering - science and education. Materials of 3 international scientifically-practical conference, SPb. – ed. By Radkevich M. M, Evgrafov A.H. SPb, 2013. (rus.)

[2] Mkrtychev O.V. Computer technologies in teaching TMM – the purpose or means? // Modern mechanical engineering - science and education. Materials of 2 international scientifically-practical conference, СПбГПУ. - under ред Radkevich M. M, Evgrafova A.N. – SPb, 2012. – P.96-102. – 844 p. (rus.)

[3] Mkrtychev O.V. Computer modelling at the kinematic analysis of flat mechanisms. // The Theory of Mechanisms and Machines. – SPb, 2012. – V. 10. № 19. – P. 46-52. (rus.)

[4] Mkrtychev O.V. Computer modelling at power calculation of flat mechanisms. // The Theory of Mechanisms and Machines. – SPb, 2013. – V. 11. № 21. – P. 77-83. (rus.)

[5] Mkrtychev O.V. About some problems and modernisation possibilities in course teaching «the theory of mechanisms and machines ». // The Bulletin of the Belgorod state technological university named after V.G.Shukhov. – Belgorod, 2014. – № 1. – P. 217-219. (rus.)

[6] Mkrtychev O.V. Problems of training of students to computer modelling at studying of disciplines «the analytical mechanics» and «the theory of mechanisms and machines». // The Bulletin of the Belgorod state technological university named after V.G.Shukhov. - Belgorod, 2012. – № 2. – p. 211-214. (rus.)

[7] Gerasimov M.D. Way of reception of the directed mechanical fluctuations for practical application in technological processes. // Building and road cars. – 2014. – № 1. p. 35-38. (rus.)

[8] Gerasimov M.D., Gerasimov D.M. Definition of the law of movement, speed and acceleration of the centre of weights planetary vibroactivator. // The International magazine applied and basic researches. – 2013. – № 12. – p. 8-11. (rus.)
[9] Zhang M., Wei J.M., Xue L., Xu M.J. The study in the application of FFT in vibroseis data harmonic filtering. // Applied Mechanics and Materials, 380-384 (2013), 3589-3594.
[10] Labutin V.N., Mattis A.R. Method to reduce a piled rock resistance to penetration of a loading-hauling machine bucket. // Journal of Mining Science, 47 (2011), 3, 360-366.
[11] Taradai D.V., Komarov V.A., Gerasimov V.P., Shuranova Yu.A. Method for vibration diagnostics of turbine units under repair using the VTI vibration exciter and modern means of vibrometry. // Power Technology and Engineering, (2012), 1-5.
[12] Taradai D.V., Komarov V.A., Gerasimov V.P., Shuranova Y.A. Method for vibration diagnostics of turbine units under repair using the VTI vibration exciter and modern means of vibrometry. // Power Technology and Engineering, 46 (2012), 3, 239-243.
[13] Pevchev V.P. Choosing parameters of design elements of an impulse seismic source. // Journal of Mining Science, 48 (2012), 2, 339-346.
[14] Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. Directory on the mathematician for engineers and pupils of technical colleges. // The Edition processed and translated from German, edited by Groshe G. and Zigler B. / The joint edition publishing house «Toybner», Leipzig, GDR and publishing house «Nauka», Moscow, USSR. – The main edition of the physical and mathematical literature. –1981. – 720 p., with images. (rus.)
[15] Corn G., Corn T. Directory on the mathematician. For science officers and engineers // Publishing house «Nauka», Moscow, USSR. – The main edition of the physical and mathematical literature. – M. – 1973. – 832 p., with images. (rus.)
[16] Hilbert D., Con-Fossen S. Evident geometry. // Translated from German Kamenetskiy S.A. – Incorporated scientific and technical publishing house NKTP of the USSR. The main edition of common technical literatures and nomography. – M, L. – 1936. – 302 p. (rus.)
[17] Gerasimov M. D, Isaev I.K.Way of the directed fluctuations and the device for its realisation. // Patent RU 2381078 C2, B 06B 1/00, 24.12.2007. (rus.)
[18] Vibrating machines in building and manufacture of building materials: The Directory / Ed. by V.A.Bauman et al. – M.: Mechanical engineering, 1970. – 548 p. (rus.)

УДК 378.45.3

Н.И. Наумкин[1], Е.А.Нуязин[2]

ФОРМИРОВАНИЕ У БАКАЛАВРОВ НАЦИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ И ЕЕ ОЦЕНКА С ПРИМЕНЕНИЕМ БРС

[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 подготовки студентов инженерных направлений в условиях национально-исследовательских вузов на примере ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Обозначена проблема формирования компетенций у студентов инженерных направлений и намечены пути ее решения в интеграции с балльно-рейтинговой системой (БРС) оценки знаний студентов.

Ключевые слова: Общекультурные компетенции, профессиональные компетенции, образовательная программа, балльно-рейтинговая система, контрольная точка аттестации.

Согласно федеральным государственным образовательным стандартам одной из основных задач подготовки студентов является формирование общекультурных и профессиональных компетенций.

При решении этой задачи возникает много трудностей. Например, как заинтересовать работать студента равномерно и систематично в течение всего семестра, а не только в предсессионный период. В дополнение к этому следует отметить сложность содержания материала дисциплин инженерных направлений подготовки, в результате во время промежуточной аттестации наблюдается статистика ухудшения среднего балла, падение процента качественной успеваемости. Это хорошо иллюстрируется на рис. 1, где представлены результаты летних экзаменационных сессий студентов направления подготовки 35.03.06 (110800.62) «Агроинженерия» ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» за последние три отчетных года.

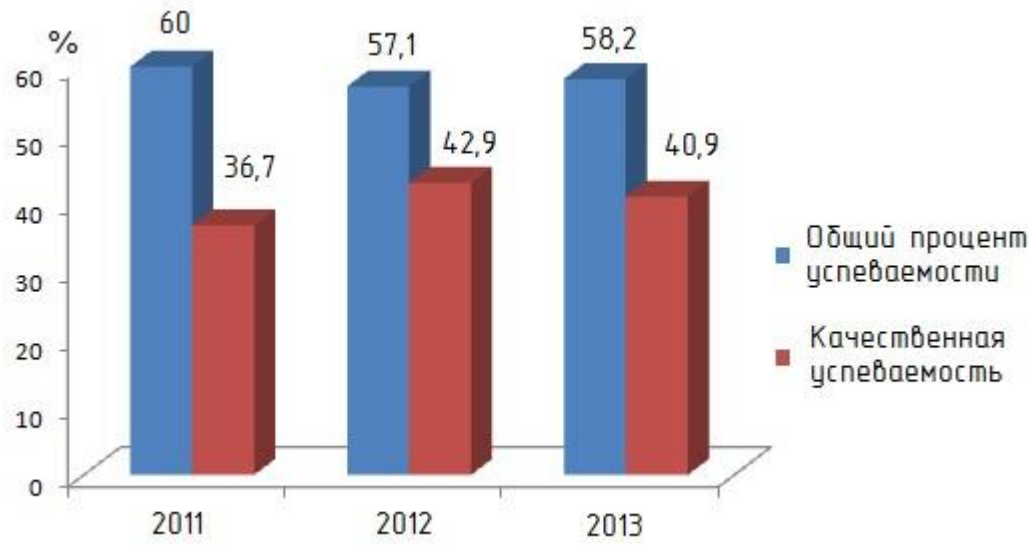


Рис. 1. Результаты летних экзаменационных сессий

Как видно из рис. 1 общий процент успеваемости студентов составляет около 60 %, качественная успеваемость еще меньше.

Одним из условий успешного формирования компетенций, повышения качества успеваемости, является внедрение балльно-рейтинговой системы оценки знаний студентов. Данная система достаточно широко используется и совершенствуется в ведущих вузах Российской Федерации. Ее основные цели и задачи описаны в Положении [1]:

1. Целью введения БРС является повышение качества образования на основе использования технологии комплексной оценки деятельности студентов при освоении ими ООП ВПО или СПО;
2. БРС является элементом внутривузовской системы менеджмента качества, инструментом управления образовательным процессом, обеспечивающим мотивацию студентов к систематической работе в течение семестра при формировании компетенций (определенных ФГОС и программой ООП) при освоении им дисциплины (модуля), при прохождении практики, проведении научно-исследовательской работы;
3. БРС позволит использовать персональные достижения и результаты учебной и научной деятельности каждого студента при формировании рейтинга всех студентов.
4. БРС оценки результатов учебных достижений студентов позволяет:

– активировать разработку и внедрение новых организационных форм и методов обучения, максимально мотивирующих активную творческую работу, как студентов, так и преподавателей Университета;

– совершенствовать организацию учебного процесса в соответствии с требованиями ФГОС;

– упорядочить и структурировать процедуру непрерывного контроля учебных достижений студентов;

– накапливать и использовать информацию о рейтинге студента, группы, потока за любой промежуток времени и на текущий момент;

– студентам рационально распределять свои временные, физические и умственные ресурсы на конкретном временном интервале;

– активизировать личностный фактор путем введения принципа состязательности в процесс обучения;

– установить уровень подготовки студента (группы, потока) относительно других студентов (групп, потоков) в сопоставимых условиях;

– сопоставить результаты обучения с европейской системой оценки знаний студентов (ECTS) [1].

Последняя задача внедрения БРС позволяет достичь одной из целей продекларированных Болонской Декларацией, а именно гармонизации Российских и Европейских дипломов, как это уже описывалось в работе [2]. Согласно положениям о сопоставлении дипломов о высшем профессиональном образовании оценки выставляются по 100 бальной шкале.

Однако ключевым моментом внедрения БРС в учебный процесс является формирование мотивации у студентов к учебной деятельности, повышение стремления к освоению учебных занятий в течение всего семестра, о чем говорилось выше. Это, в свою очередь, позволяет более эффективно формировать у студентов соответствующие компетенции, реализуя так называемый мотивационно-целевой компонент педагогической модели, описанной в статье [3].

Основной задачей дальнейшей работы является разработка методики и содержания самой системы БРС и реализация ее в условиях национально-исследовательского Мордовского государственного университета. При этом будет реализовываться технологический компонент педагогической модели [3]. Решение данной задачи также не является достаточно простым, так как различные направления подготовки инженерного профиля по своей структуре отличаются, поэтому типовой БРС для всех специальностей не существует.

Для решения поставленной задачи можно использовать опыт различных вузов России. Так в национальном исследовательском Казанском техническом университете им. А. И. Туполева (КАИ) система БРС развивается уже более 10 лет. Ученые этого университета предлагают проводить несколько промежуточных аттестаций в течение семестра, присваивая за каждую пройденную отсечку определенное количество баллов. Набирая, таким образом, определенную сумму баллов и проходя аттестацию, студент уже знает, на какую оценку он претендует. Количество промежуточных аттестаций зависит от трудоемкости дисциплины и может достигать от одной до трех. Таким образом, студент заинтересован работать в течение всего семестра, набирая определенную сумму баллов во время промежуточной (рубежной) отсечки оценки знаний. Для реализации системы БРС необходима достаточная информационная сеть. В КНИТУ им. А.И. Тупо-

лева предлагается схема информационных потоков (рис. 2)

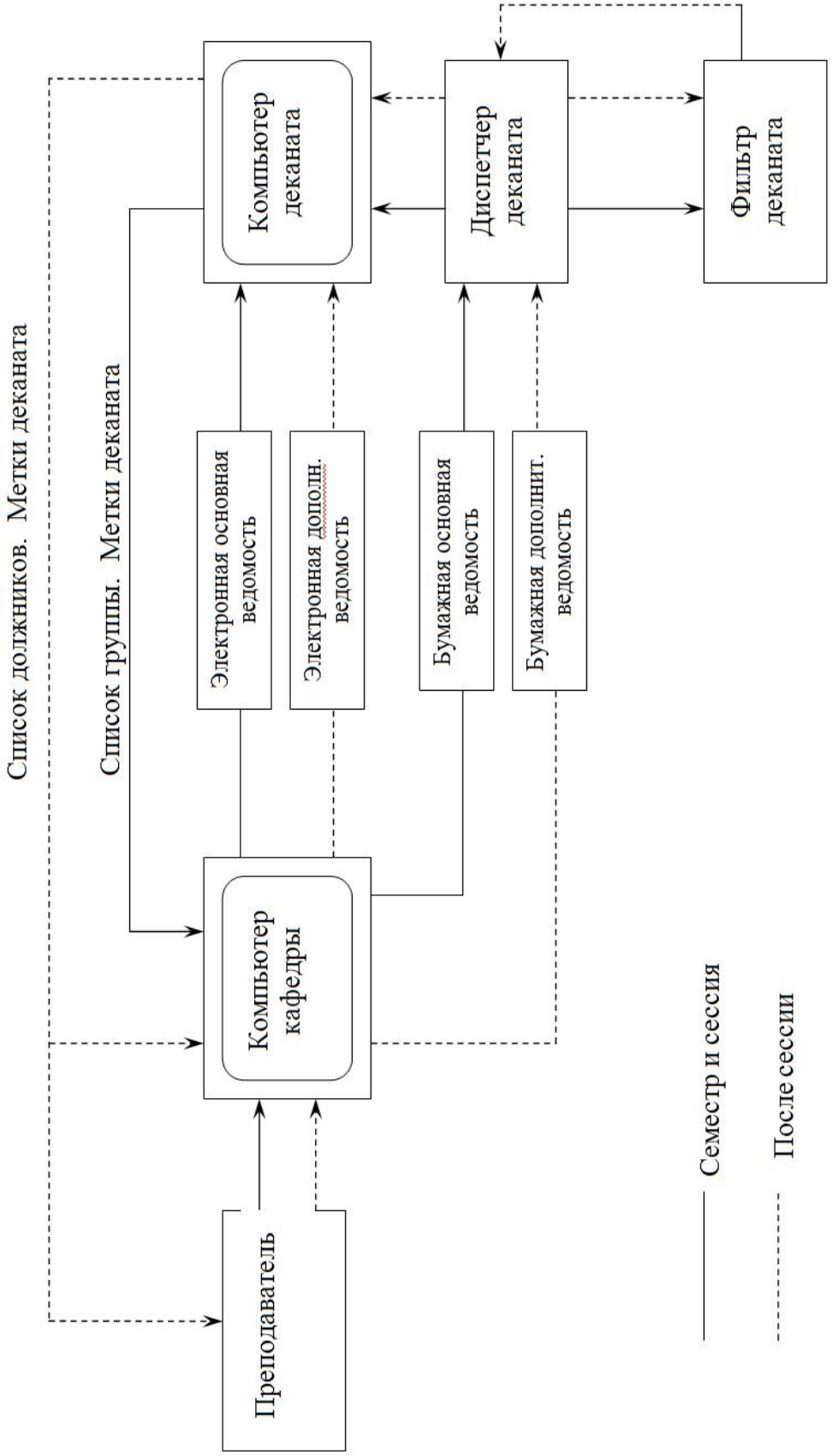


Рис. 2. Схема информационных потоков при оценке знаний по БРС

Каждый из ведущих доцентов, профессоров, составляющих учебный курс, в своих рабочих программах по дисциплинам разрабатывают методики оценки знаний на рубежных отсечках (контрольных точках) и определяют «стоимость» оценки. Главное требование такой оценки, чтобы на аттестации студента во время экзаменационной сессии сумма не превышала 100 баллов.

Отдельной задачей ставится оценка формирования компетенций при итоговой государственной аттестации выпускников. Для решения данной задачи предлагается также использовать БРС. Например, при оценке знаний на государственном экзамене предлагается создавать две контрольные точки. Первую, на этапе компьютерного тестирования, вторую – на этапе сдачи экзамена в присутствии экзаменационной комиссии. Баллы распределять поровну – 50 баллов на первом этапе, 50 баллов – на втором этапе. При оценке знаний на защите выпускных квалификационных работ также предлагается учитывать несколько контрольных точек, таких как оценка содержания пояснительной записки, качество представленного графического материала, уверенность в ответах на дополнительные вопросы и т. д.

В дальнейшем, для формирования компетенций у студентов, необходимо также развивать содержательный компонент, включающий источники, принципы, основания, критерии, а также развивать элементы национально-исследовательской системы, включающие инфраструктуру, инновационную деятельность, инновационные продукты, не забывая при этом релаксационно-оценочный компонент. Только в интеграции, реализуя педагогическую модель единой методической системы обучения, можно в полной мере достичь результата, удовлетворяющего требования работодателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Положение об организации балльно-рейтинговой системы оценки результатов учебных достижений студентов в ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Утверждено Ученым Советом вуза. Протокол №10 от 26 ноября 2013 г. Режим доступа: www.mrsu.ru/ru/i_depart/docs.php?IBLOCK_ID=2016.
2. Нуянзин Е.А., Наумкин Н.И. Гармонизация Российских и европейских дипломов о высшем профессиональном агроинженерном образовании //Тракторы и сельскохозяйственные машины – 2013. – №12. – С.7-8.
3. Наумкин Н.И., Нуянзин Е.А., Авдюшкин А.С. Балльно-рейтинговая система оценки знаний как инструмент формирования компетенций студентов инженерного направления //Физическое образование: проблемы и перспективы развития. Материалы XIII международ. науч.-методич. конференции. М.: МПГУ, 2014. – С.152-155.
4. Крюков В.Г. Основные положения модифицированной балльно-рей-

тинговой системы контроля знаний. Казань, 2008. – 11 с.
5. Наумкин Н.И., Нуянзин Е.А. Интегрированная схема подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности на основе ФГОС // Современное машиностроение. Наука и образование: №3 – 2013. – С. 135-142.
6. Сенин П.В., Нуянзин Е.А. Проблемы перехода инженерных вузов на двухуровневую систему образования // Инженерное образование – 2011. – № 8. – С.88-91.
7. Паршин Л.К. О двухуровневом образовании // Современное машиностроение. Наука и образование: №3 – 2013. – С. 153-156.
8. Смольников Б.А., Пальмов В.А. Уровни образования в Российских технических университетах // Современное машиностроение. Наука и образование: №3 – 2013. – С. 168-171.
9. Naumkin N. I., 2013. Integrated Technology of Competence Staged Formation in Innovation Through Pedagogy of Cooperation / N. I. Naumkin, V. F. Kuprjashkin, E. P. Grosheva, N. N. Shekshaeva, E. N. Panjushkina // World Applied Sciences Journal. Date Views 16.12.13. pp. 935-938. URL: http://www.idosi.org/wasj/wasj27(7)13/21.pdf; http://www.idosi.org/wasj/wasj 27%287%292013.htm.
10. Наумкин Н.И., Грошева Е.П. Междисциплинарная интеграция инженерного образования в процессе формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности // Наука и образование, 2008.– №6 – С.46
11. Наумкин Н.И. Оценка эффективности формирования у студентов технических вузов способности к инновационной инженерной деятельности в процессе обучения общетехническим дисциплинам // Сибирский педагогический журнал, 2008. – №8. – С.30-38.

N.I. Naumkin, E.A.Nuyazin

BACHELORS FORMATION AT THE NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY PROFESSIONAL COMPETENCE AND ITS EVALUATION USING PRS

Ogarev Mordovia State University, Russia

Abstract

The paper discusses the issues of training engineering students in areas under national research universities by the example of Ogarev Mordovia State University. Denotes the problem of formation of competencies for students of engineering areas and ways of its solution based on the use of points-rating system (PRS) assessment of student learning.

Key words: General cultural competence, professional competence, education program, point-rating system, checkpoint certification.

REFERENCES

[1] Regulations on the organization points-rating system evaluation of educational achievements of students in the Ogarev Mordovia State University. "Approved by the Academic Council of the university. Minutes № 10 of November 26, 2013. Access mode: www.mrsu.ru/ru/i_depart/docs.php?IBLOCK_ID=2016. (rus)

[2] Nuyanzin E.A. Naumkin N.I. Harmonization of Russian and European diplomas of higher professional education agroengineering // Tractors and agricultural machinery - 2013. - № 12. - P.7-8. (rus)

[3] Naumkin N.I. Nuyanzin E.A., Avdyushkin A.S. Point-rating system of knowledge as an instrument for shaping the direction of engineering skills of students // Physical Education: Problems and prospects. Proceedings of XIII International. scientific. - Methodological. Conference. Moscow: Moscow State Pedagogical University, 2014. - P.152-155. (rus)

[4] Kryukov V.G. Main provisions of the modified score-rating system control knowledge. Kazan, 2008. – P.11 (rus)

[5] Naumkin N.I Nuyanzin E.A. Integrated circuit training students for innovative engineering activities on the basis of the FSES // Modern engineering. Science and education: № 3 - 2013. - P. 135-142. (rus)

[6] Senin P.V., Nuyanzin E.A. Problems of transition of engineering schools on two-tier system of education // Engineering Education - 2011. - № 8. - P.88-91. (rus)

[7] Parshin L.K. About two-tier education // Modern engineering. Science and education: № 3 - 2013. - P. 153-156. (rus)

[8] Smolnikov B.A., Palmov V.A. Levels of education in the Russian technical universities // Modern engineering. Science and education: № 3 - 2013. - P. 168-171. (rus)

[9] Naumkin N. I., 2013. Integrated Technology of Competence Staged Formation in Innovation Through Pedagogy of Cooperation / N. I. Naumkin, V. F. Kuprjashkin, E. P. Grosheva, N. N. Shekshaeva, E. N. Panjushkina // World Applied Sciences Journal. Date Views 16.12.13. pp. 935-938. URL: http://www.idosi.org/wasj/wasj27(7)13/21.pdf.

[10] Naumkin N.I., Grosheva E.P. Interdisciplinary integration of engineering education in the process of formation at the technical university students ability to innovate engineering // Science and Education, 2008. - № 6 - P.46(rus)

[11] Naumkin N.I. Evaluating the effectiveness of the formation of students of technical colleges ability to innovative engineering activities in the learning process of technical disciplines // Siberian pedagogical magazine, 2008. - № 8. - P.30-38. (rus)

УДК 378.147:744.4

Т.А. Никитина[1], И.С. Смирнова[2]

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА»

[1]Никитина Татьяна Александровна, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: nik_tatiana@mail.ru

[2]Смирнова Ирина Сергеевна, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 552-75-14, E-mail: kpgd@mail.ru

Аннотация

Рассматривается тестовый метод контроля знаний как средство оптимизации учебного процесса в условиях действия образовательных стандартов третьего поколения. Освещены преимущества и недостатки тестового подхода. Показаны особенности разработки контрольно-измерительных материалов по инженерной графике, приведены примеры заданий. Рассмотрены возможности автоматического тестового контроля.

Ключевые слова: тестирование, инженерная графика

Оценка качества знаний — одна из обязательных составляющих процесса обучения. Переход на двухуровневую систему высшего образования привел к сокращению времени, отводимого на изучение общепрофессиональных дисциплин, в сравнении с ранее действовавшими стандартами. Это привело к повышению интенсивности занятий и увеличению количества тем, отводимых на самостоятельную проработку студентами. Постоянный рост количества учебной информации ставит перед образовательной средой глобальную задачу оптимизации учебного процесса за счет внедрения новых образовательных технологий.

В условиях действия стандартов третьего поколения кафедра инженерной графики и дизайна (ИГД) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета пересматривает

содержание инженерно-графических дисциплин, на изучение которых количество часов сократилось почти вдвое, перерабатывает и совершенствует методику их преподавания [2, 5].

Оценка знаний и умений учащихся — важное звено учебного процесса, от которого зависит качество усвоения учебного материала. Это, так называемая, «обратная связь», благодаря которой преподаватель получает информацию об эффективности обучения предмету. Общепринятые системы контроля знаний, такие как экзамен, типовые задания, проверочные и контрольные работы, на кафедре ИГД дополняются тестированием.

Можно назвать следующие причины широкого признания тестового метода как приемлемой процедуры проверки знаний, умений и навыков обучаемых:

– потенциально позволяет осуществить переход от субъективных методов оценки знаний к объективно обоснованным при равных условиях для всех учащихся,

– учитывается не только практический, но и теоретический учебный материал,

– дает возможность реализовать детальную проверку каждой темы курса,

– способствует овладению учебным материалом каждым студентом,

– способствует самоконтролю испытуемых, позволяет им лично оценить свои результаты,

– экономит время проверки знаний и оценки результатов обучения,

– разнообразит учебный процесс, создает обстановку состязательности.

Однако, при принятии решения об использовании тестовых методов в учебном процессе следует учитывать и ряд их недостатков:

– существует вероятность выбора правильного ответа наугад или методом исключения,

– не всегда позволяет проследить логику рассуждений,

– относительно сложно оценить глубину знаний.

Разработка контрольно-измерительных материалов по инженерной графике, предмету с четко выраженной практической направленностью, имеет свои особенности [8]. В дисциплине изучаются основы построения технических чертежей и правила выполнения и оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД [6, 7, 10]. Поэтому варианты ответов на поставленные вопросы даются преимущественно в виде фрагментов чертежей или условных обозначений. Кроме того, технический характер предмета предполагает четкую формулировку вопроса и краткие варианты ответов. Правильный учет этих особенностей позволяет развивать у обучающихся навыки чтения

чертежей, формирует дисциплину мысли и укрепляет знание стандартов ЕСКД.

В настоящее время на кафедре ИГД ведется разработка и внедрение в образовательный процесс системы тестирования знаний и умений по инженерной графике [9]. Тестовые задания используются для промежуточной и итоговой аттестации, не отменяя при этом другие формы контроля, традиционно применяемые на кафедре.

Контрольно-измерительные материалы по инженерной графике постоянно пополняются и совершенствуются, приводятся в соответствие с тематической направленностью учебных программ различных направлений подготовки студентов. Изначально предусматривалась возможность использования не только бумажной, но и электронной формы тестирования. Это наложило отпечаток на выбор формы тестовых заданий.

Для тестовых вопросов первого уровня из общепринятых типов заданий [1, 3] используется закрытая форма с множественным выбором — из нескольких вариантов ответа необходимо выбрать единственный правильный. При этом предлагается набор из четырех-пяти ответов, как наиболее рациональный.

В качестве примера рассмотрим некоторые образцы тестовых заданий первого уровня по темам «Резьба» и «Разъемные соединения», которые можно условно разделить на следующие группы [4]:

1. Узнавание, различение.

Эта группа вопросов имеет пониженную сложность и требует у испытуемого визуального различения объекта или условного обозначения. Например, среди приведенных объектов необходимо выбрать один, обладающий каким либо указанным свойством, удовлетворяющий какому-либо критерию (рис. 1).

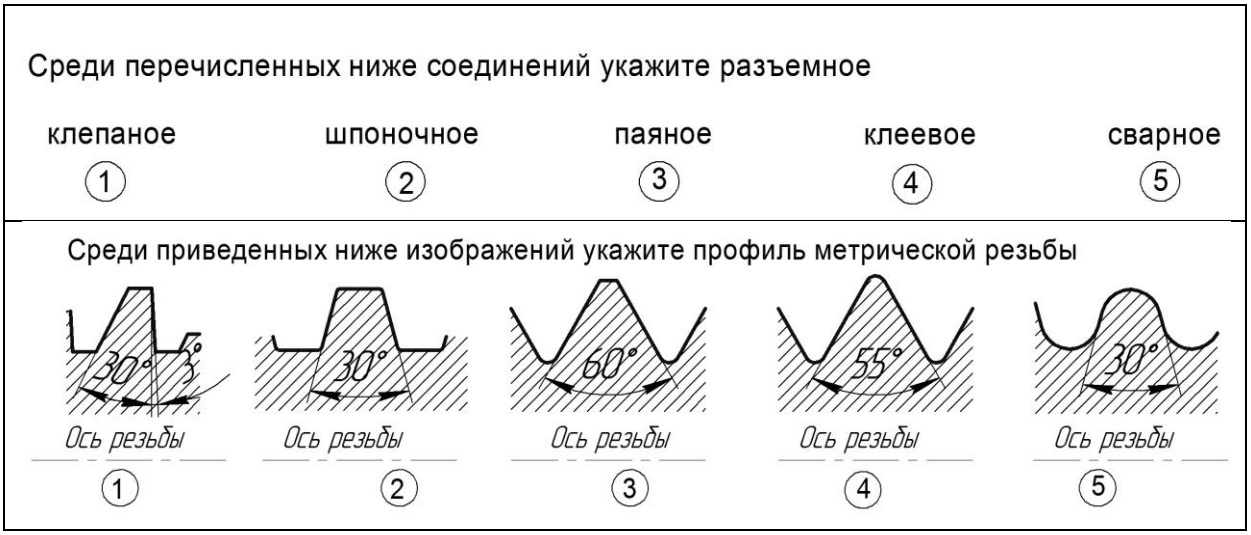


Рис. 1.

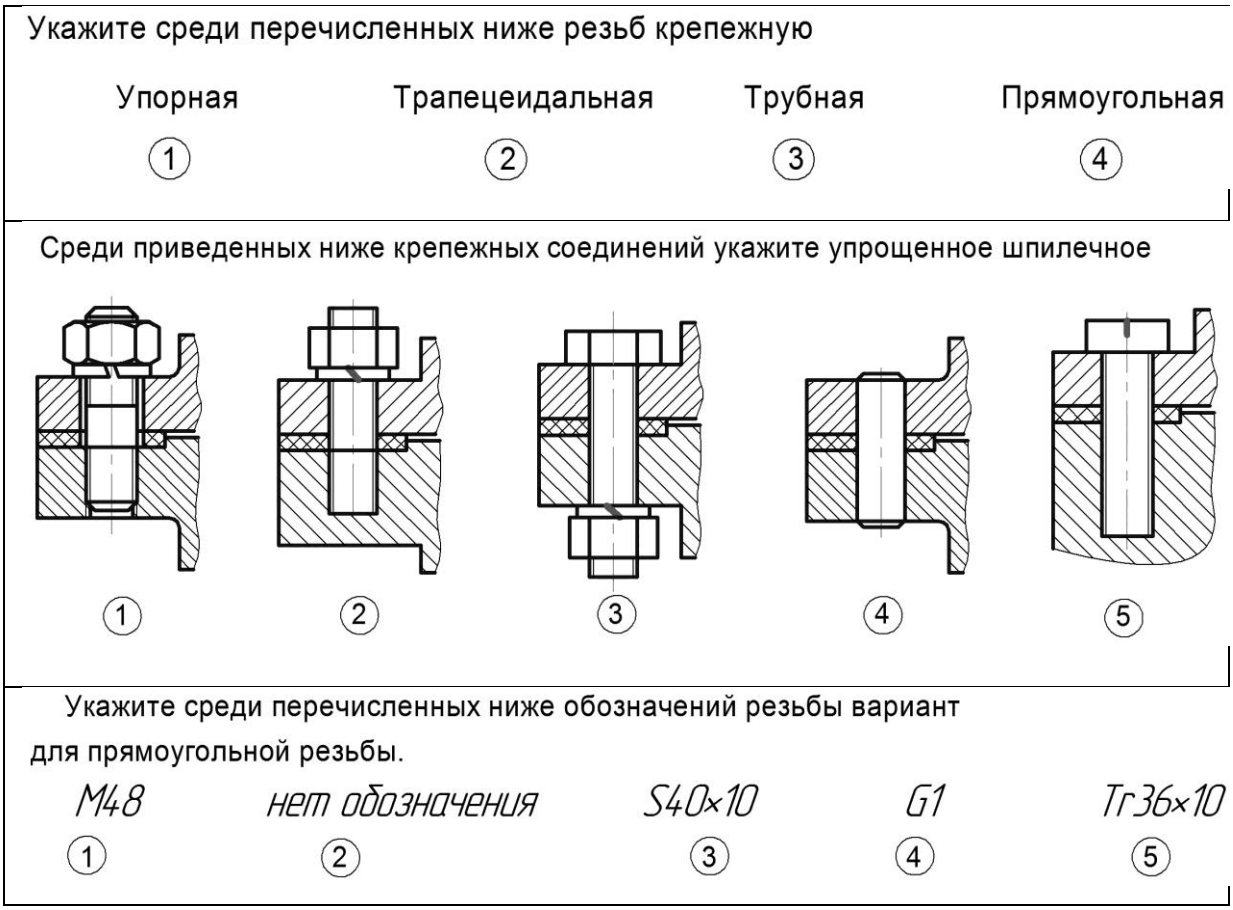


Рис. 1 (продолжение).

2. Запоминание.

Вопросы этой группы имеют легкий и средний уровень сложности. Они могут, например, проверять знание теоретического материала дисциплины в виде определений, устойчивых сочетаний, общепринятых положений и т.д. Допускается инверсный выбор, при котором предлагается указать неверный ответ среди верных (рис. 2).

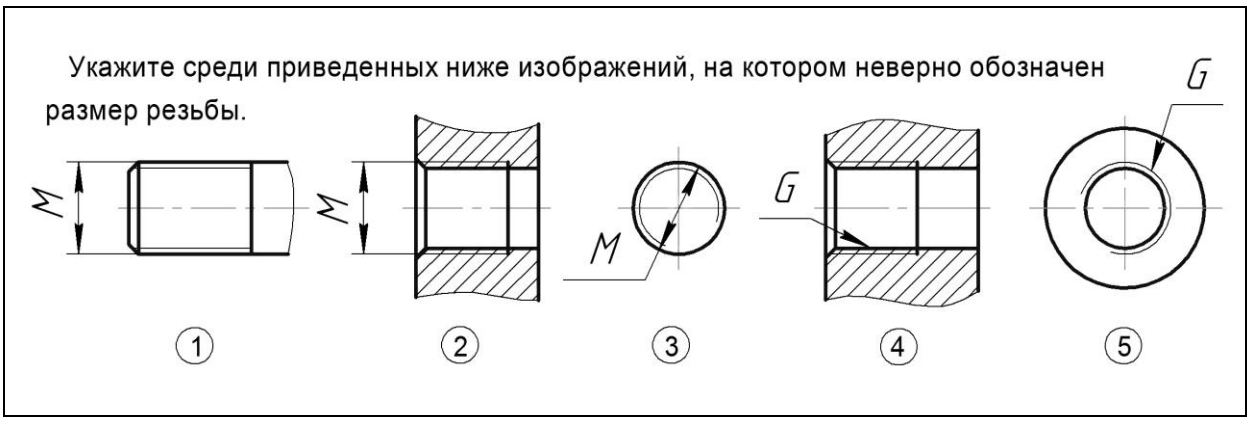


Рис. 2.

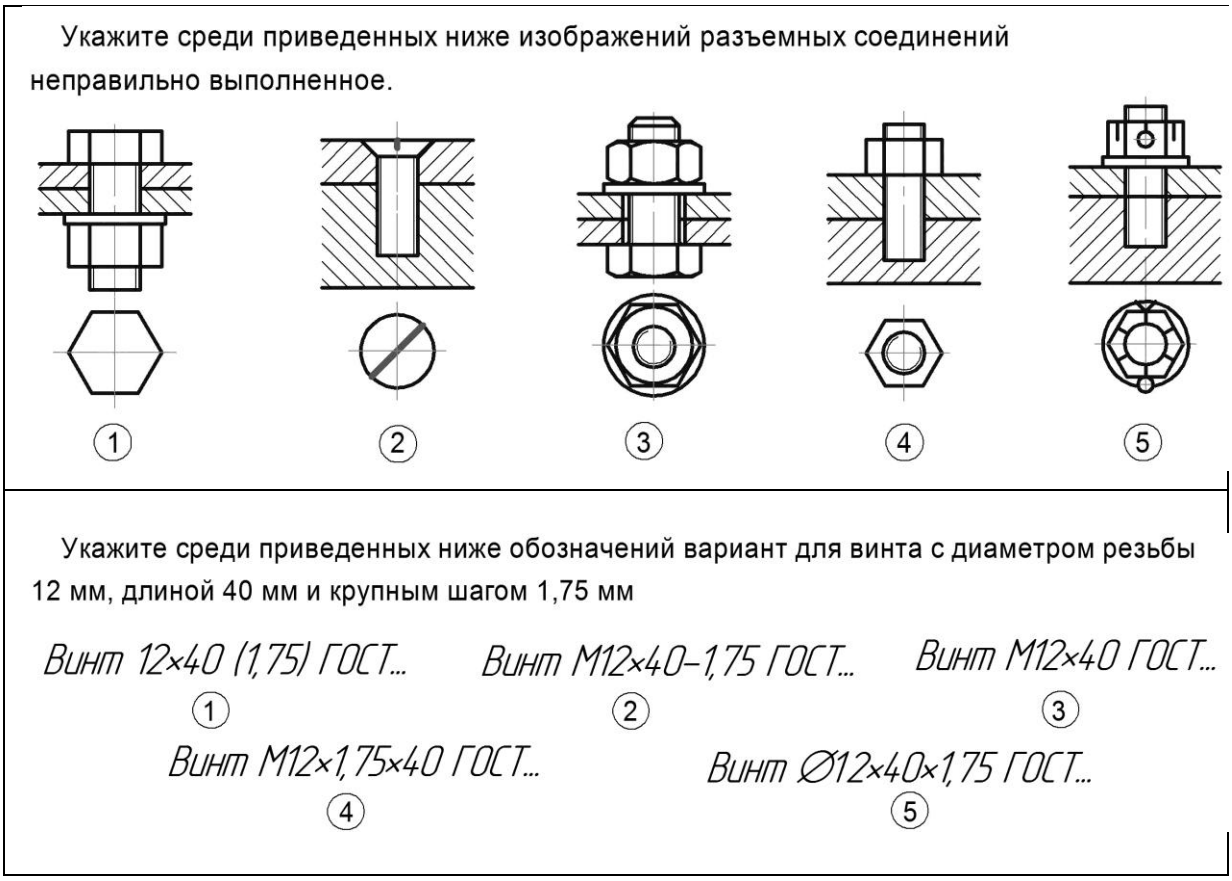


Рис. 2 (продолжение).

3. Применение.

Эта группа вопросов имеет высокую сложность. Например, от испытуемого требуется, выполнив необходимые расчеты выбрать вариант, соответствующий заданному условию (рис. 3).

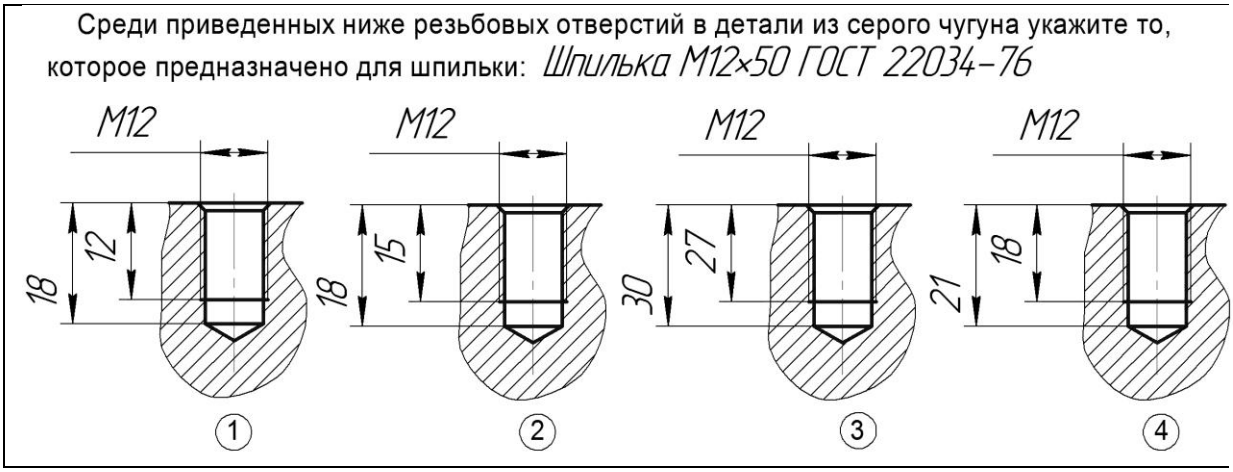


Рис. 3.

В отличие от вышеприведенных вопросов первого уровня, для второго уровня используется открытый тип задания свободного изложения. Это предполагает развернутый ответ на поставленный вопрос, например, с выполнением необходимых видов и простановкой размеров (рис. 4).

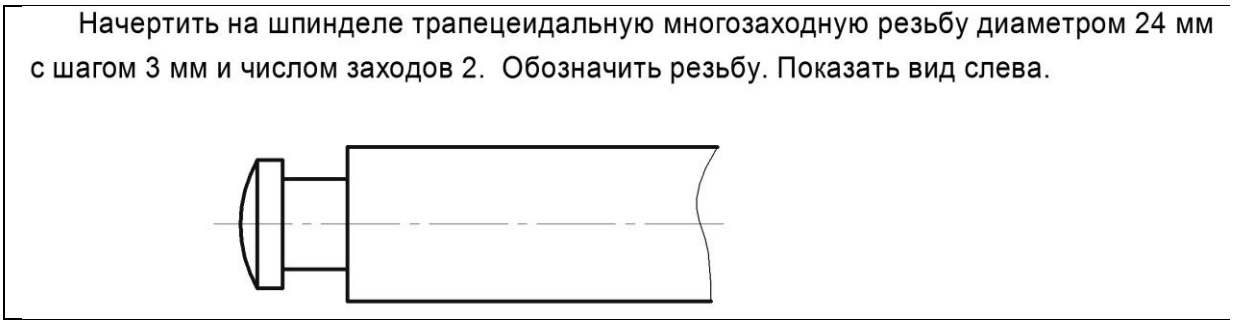


Рис. 4.

Вопросы второго уровня в настоящее время используются только при бумажном тестировании, так как не могут быть оценены существующей автоматической системой проверки знаний. Кроме того, компьютерное тестирование обычно не позволяет осуществить беседу по тестовому материалу с целью выявления хода рассуждений испытуемого. Тем не менее, оно имеет некоторые несомненные достоинства. Например, резко сокращается время, необходимое на проверку и обработку результатов. Формируется детальный отчет о результатах с выявлением разделов дисциплины, которые наиболее трудно усваиваются студентами. Это позволяет целенаправленно провести дополнительные разъяснения и занятия, осуществить дальнейшую корректировку методик обучения.

Разработанная и успешно апробированная на кафедре ИГД компьютерная программа тестирования работает в форме диалога — автоматически в случайном порядке предъявляются заранее подготовленные преподавателем задания и фиксируются ответы на них (рис. 5). Время выполнения теста ограничено (задается преподавателем) и автоматически контролируется. По окончании тестирования формируется отчет с результатами, которые демонстрируется на экране. Аттестация студента тоже происходит автоматически. Отчет записывается в файл в закодированном виде с целью исключения его фальсификации. Имя файла определяется фамилией, именем и отчеством учащегося. Преподаватель имеет возможность декодировать файл с результатами теста с целью их последующего просмотра, вывода на печать и архивации. Размещение тестовой системы на сервере кафедры позволяет студентам проходить пробные тестирования с целью самоконтроля знаний.

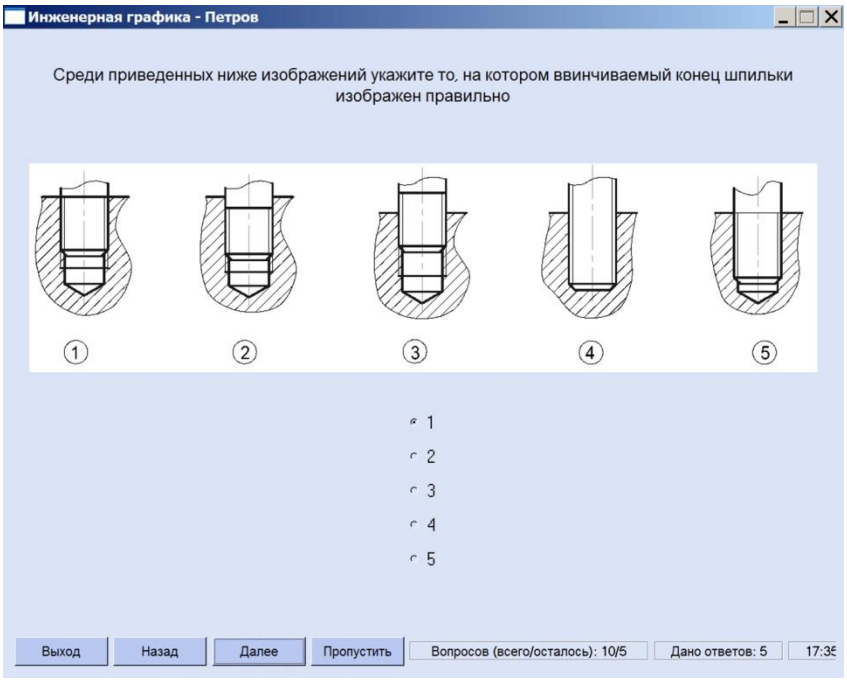


Рис. 5.

Таким образом, тестирование вписывается в традиционную систему контроля знаний в качестве ее полезного развития и дополнения. Применение тестовых методов позволяет осуществить переход от субъективных методов оценки знаний к объективно обоснованным сделать процесс педагогического контроля более эффективным, ориентировать его на современные информационные технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов В.С. «Композиция тестовых заданий». Учебная книга. 3-е изд., доп. М.: Центр тестирования, 2002г. 240 с.
2. Д.В.Волошинов, Л.Б.Иванова, С.А.Юрова. Об особенностях и перспективах преподавания дисциплин инженерно-графического цикла в условиях действия федеральных образовательных стандартов третьего поколения на кафедре прикладной геометрии и дизайна// Современное машиностроение. Наука и образование : материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – с. 35-47.
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. Иванова Н.С., Красильникова Г.А., Маркова Т.В., Самсонов В.В. Проблемы комплексного обучения студентов инженерной и компьютерной графике // 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. 90-99
6. Инженерная графика. Разъемные соединения: Учеб. Пособие/ Ю.Я. Андрейченко [и др.] — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 90 с.
7. Машиностроительное черчение: справочник / Г.Н. Попова, С.Ю. Алексеев, А.Б. Яковлев. — Изд. 6-е, перераб. и доп. — Санкт-Петербург: Политехника, 2013. — 482 с.
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, I.S. Smirnova

SPECIAL DETAILS OF PROGRESS CHECK DEVELOPING FOR TECHNICAL DRAWING

St. Petersburg Polytechnical University, Russia

Abstract

This article deals with test tasks for students knowledge verification, which allow optimize learning process at third generation educational standards. Advantages and disadvantages are discussed. Authors put attention on special details of progress check for technical drawing and show several examples. Automatic knowledge verification with computer is discussed.

Keywords: knowledge verification, progress check, technical drawing

REFERENCES

[1] Avanesov B.C. «Kompozicija testovyh zadanij». Uchebnaja kniga. 3-e izd., dop. M.: Centr testirovanija, 2002g. 240 p. (rus)

[2] D.V.Voloshinov, L.B.Ivanova, S.A.Jurova. Ob osobennostjah i perspektivah prepodavanija disciplin inzhenerno-graficheskogo cikla v uslovijah dejstvija federal'nyh obrazovatel'nyh standartov tret'ego pokolenija na kafedre prikladnoj geometrii i dizajna// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie : materialy 2-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii / pod.red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – p. 35-47. (rus)

[3] Efremova N.F. Sovremennye testovye tehnologii v obrazovanii. Ucheb. posobie. – M.: Logos, 2003. (rus)

[4] Ivanov B.S. Principy i tehnologija testirovanija studentov: Uchebno-metodicheskoe posobie/ Pod red. V.N. Kozlova. SPb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2005. 80 p. (rus)

[5] Ivanova N.S., Krasil'nikova G.A., Markova T.V., Samsonov V.V. Problemy kompleksnogo obuchenija studentov inzhenernoj i komp'juternoj grafike // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. — SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013.— p. 90-99 (rus)

[6] Inzhenernaja grafika. Raz'emnye soedinenija: Ucheb. Posobie/ Ju.Ja. Andrejchenko [i dr.] — SPb.: Izd-vo SPbGTU, 2001. 90 p. (rus)

[7] Mashinostroitel'noe cherchenie: spravochnik / G.N. Popova, S.Ju. Alekseev, A.B. Jakovlev. — Izd. 6-e, pererab. i dop. — Sankt-Peterburg: Politehnika, 2013. — 482 p. (rus)

[8] Organizacija samostojatel'noj raboty studentov po inzhenernoj grafike testovymi metodami: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. k.p.n.: spec. 13.00.02 / Dumickaja Natal'ja Gennad'evna; [Mosk. ped. gos. un-t]. - Moskva: 2003. - 16 p. (rus)

[9] Samsonov Vladimir Viktorovich. Inzhenernaja grafika. Testovye zadanija k razdelu raz'emnye soedinenija [Jelektronnyj resurs]: metodicheskoe posobie / V.V. Samsonov, T.A. Nikitina; Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politehnicheskij universitet, Institut metallurgii, mashinostroenija i transporta, Kafedra inzhenernoj grafiki i dizajna. — Jelektron. tekstovye dan. — Sankt-Peterburg, 2014. (rus)

[10] Chekmarev A.A. Inzhenernaja grafika (mashinostroitel'noe cherchenie): uchebnik dlja studentov vuzov obuchajushhihsja po napravleniju podgotovki diplomirovannyh specialistov vyssh. obrazovanija v mashinostroenii. Moskva. INFRA-M, 2012. — 396 p. (rus)

УДК.621.735.79

М.М.Радкевич[1], Е.Н.Крупкина[2]

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ ПО ПРОГРАММЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОБУЧЕНИЯ "КОЛЛЕДЖ - ВУЗ"

[1]Михаил Михайлович Радкевич д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: radmich@mail.ru

[2] Елена Николаевна Крупкина старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail:elena/krupkina@gmail.com

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы связанные с особенностью непрерывной подготовки, формирования профессиональных знаний студентов. Изложен опыт непрерывного образования, накопленный в течение более двадцати лет сотрудничества между СПбГПУ и Техническим колледжем СПб..

Ключевые слова: непрерывная подготовка, профессиональные знания, колледж, ВУЗ. требования.

На сегодняшний день сложно ориентироваться в современной системе постоянно меняющегося законодательства в области образования: школа, ЕГЭ, колледж, университет, экзамены, вступительные испытания и т.п. Куда пойти учиться? Как сдать ЕГЭ и получить аттестат об окончании школы? Какую форму образования выбрать своему ребёнку? Где будет работать дипломированный выпускник? Как получить качественное, востребованное образование? Именно эти вопросы встают перед школьниками выпускных классов и их родителями. Давайте попробуем разобраться с проблемой, проанализировав некоторые аспекты получения высшего профессионального образования с практической точки зрения.

Система образования в России проходит период трансформации, поэтому требуется не только обобщение накопленного опыта в системе профессионального образования, но и широкий поиск альтернативных

образовательных вариантов, новых форм и технологий организации процесса подготовки высококвалифицированных специалистов.

Непрерывное профессиональное образование - это инновационный, альтернативный путь получения достойного образования.

Впервые концепция непрерывного профессионального образования была представлена на форуме ЮНЕСКО в 1965 году. По мнению родоначальника концепции «непрерывного образования» крупного теоретика П. Ленгранда непрерывное образование означает продолжающийся всю жизнь процесс, в котором важную роль играет интеграция как индивидуальных, так и социальных аспектов человеческой личности и её деятельности.

Глоссарий терминов ЮНЕСКО дает развернутое понимание непрерывного образования: неограниченное ни во времени (по срокам), ни в пространстве (по месту обучения), ни по методам обучения, оно объединяет всю деятельность и ресурсы в области образования и направлено на достижение гармоничного развития личности и прогресса в преобразовании общества.

В энциклопедии профессионального образования 1999 года «непрерывное образование» обозначено как целенаправленное получение человеком знаний, умений и навыков в течение всей жизни в учебных заведениях и путем организованного самообразования.

В предложенной трактовке непрерывного образования была воплощена гуманистическая идея: в центре всех образовательных программ стоят интересы и потребности человека. А общество должно создавать условия для полного развития способностей каждой отдельной личности. Целесообразность многоуровневого непрерывного образования рассматривается, прежде всего, в связи с профессиональной деятельностью человека. Система непрерывного образования представлена как *иерархия образовательных звеньев* в системе получения образования.

Таким образом, для максимально полного удовлетворения личностью своих профессиональных потребностей необходимо непрерывное параллельное профессиональное образование, направленное на профессиональный рост, удовлетворение потребностей производства, развитие личности.

В России широкую известность система непрерывного образования получила с конца 90-х годов. Российскому гражданину сложно было понять суть концепции образования, отличного от стандартных форм: либо школа, либо техникум, либо институт. На сегодняшний день система непрерывного (параллельного) профессионального образования полностью доказала своё преимущество в профессиональном росте личности и востребованности специалистов на рынке труда [1].

Параллельное профильное обучение «колледж – вуз» является звеном непрерывного профессионального образования «школа – колледж – вуз -

предприятие». Оно основывается на создании единого образовательного пространства, интегрирующего элементы среднего и высшего профессионального образования. Непрерывное образование существенно расширяет возможности для социопрофессиональной мобильности, для повышения эффективности трудовой деятельности.

Новые социально-экономические условия, складывающиеся в нашей стране, предъявляют исключительно высокие требования к профессиональной готовности специалиста. Целями среднего профессионального образования являются:

- Подготовка кадров, опережающая потребности рынка труда.
- Выпуск специалистов, ориентированных на новые, перспективные и эффективные технологические процессы с учётом многообразия и расширения сфер деятельности в экономике страны.
- Привлечение к образовательному процессу на ранних стадиях потенциальных работодателей.
- Продолжение обучения в высшем учебном заведении по ускоренной программе, которая входит в основу непрерывного (параллельного) профессионального образования «школа – колледж – вуз».

Кафедра «Технология конструкционных материалов и материаловедение» Института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета уже много лет (с 1991 года) сотрудничает с Санкт-Петербургским техническим колледжем (СПбТК) по системе непрерывного (профильного) профессионального образования. Вот как это выглядит на практике.

1. Учащиеся обучаются в колледже по очной форме обучения на базе 9 классов школы (основного среднего образования) в течение 4 или 5 лет в зависимости от специальности.
2. Параллельно с обучением в колледже производится углублённая подготовка учащихся преподавателями Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по дисциплинам ВПО по согласованным учебным планам.
3. По окончании колледжа выпускники получают диплом о среднем профессиональном образовании по выбранной профессии в учреждении СПО.
4. Желающие получить высшее профессиональное образование по профилю, соответствующему или родственному полученной в учреждении СПО специальности, в случае успешной сдачи вступительного профильного экзамена, зачисляются в вуз, в частности в СПбГПУ, участвуя в конкурсе.
5. Далее студенты продолжают повышать свой профессиональный и образовательный уровень в вузе по ускоренной

образовательной программе бакалавриата, обучаясь в СПбГПУ в течение 3 лет.

Наличие углублённой подготовки учащихся специалистами вуза еще на стадии их обучения в колледже позволяет осуществить более грамотный профессиональный отбор будущих студентов ИММиТ СПбГПУ.

Кроме того, обучаясь в колледже, учащиеся получают полное представление о профессии, и это делает их профессиональный выбор глубоко осознанным, ответственным, что существенно уменьшает отсев студентов на старших курсах университета.

Есть и другой аспект. В связи с тем, что Россия перешла на международную систему обучения: бакалавр (4 года) и магистр (6 лет), - система непрерывного профессионального образования становится наиболее актуальной, учитывая еще и следующие обстоятельства:

- Сегодня от молодого специалиста при устройстве на работу требуют наличие опыта и трудового стажа. Где взять трудовой стаж и опыт работы выпускнику вуза? Поэтому, пройдя традиционное обучение сроком 4-6 лет, выпускник вуза вынужден устраиваться на работу на низкооплачиваемые должности, не соответствующие его уровню образования.
- Наличие же диплома о среднем профессиональном образовании с большим количеством часов по практике (см. сравнительную таблицу), во-первых, играет в пользу дипломированного выпускника вуза, во-вторых, решает проблему трудового стажа, так как выпускник колледжа имеет возможность, при желании, трудоустроиться и нарабатывать опыт, продолжая обучение в университете по очно-заочной (вечерней) форме.

Сравнительная таблица данных по практике

Наименование практики	**СПбТК**	**СПбГПУ**	**СПбТК**	**СПбГПУ**
	час		недель	
Практика для получения первичных профессиональных навыков (учебная)	345	30	17,0	2
Практика по профилю специальности (технологическая или производственная)	67	45	7,0	3
Практика преддипломная (в СПбТК) или производственная (в СПбГПУ)	8	45	4,0	3
Всего	420	120	28	8

Резюмируя все вышесказанное, можно выделить следующие преимущества параллельного (непрерывного) образования. К моменту окончания вуза студенты обладают серьезными преимуществами перед сверстниками: выпускники программы непрерывного образования владеют огромным запасом знаний, умений и профессиональных навыков, полученных в процессе практической работы по выбранной специальности или профилю. После получения диплома о СПО выпускник колледжа может продолжить обучение уже на этапе высшего профессионального образования по ускоренной программе обучения. Такая возможность очень ценится как учащимися, так и их родителями. Данные образовательные программы способствуют сокращению сроков обучения и затрат на подготовку специалиста (сэкономленное на становление профессионала с высшим образованием и опытом практической работы время может составить 2-3 года, в зависимости от выбранной профессии), а в процессе обучения у студентов формируется комплексный, целостный подход к знаниям [2,3]. Преимуществом обучения по данной программе является то, что у учащихся уже на раннем уровне закладывается профессиональный интерес, и в дальнейшем они осознанно выбирают профессию, заранее имея о ней представление.

Непрерывное профессиональное образование – это комплекс государственных, частных образовательных учебных заведений, обеспечивающих преемственность и взаимосвязь всех звеньев начального, среднего, высшего профессионального образования, с учётом общественных и экономических потребностей, личных образовательных устремлений и возможностей. Это одно из перспективных средств достижения поставленной цели и карьерного роста. Именно непрерывное (параллельное) обучение открывает дорогу молодому специалисту и даёт возможность миновать трудности постоянно меняющегося и совершенствующегося законодательства в области образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие социального партнерства профессиональных образовательных учреждений и работодателей Санкт-Петербурга. – СПб. : 2014. Правительство СПб. Комитет по образованию. 50 с.
2. 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.
3. 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. 20-21 июня 2013 года, Санкт-Петербург – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 1205 с.

M. M. Radkevich, E.N. Krupkina

BACHELOR'S PROGRAMME FEATURES CONTINUING EDUCATION College-University "

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

This article contains information about the feature of continuous training, professional skills of students. Presents continuing education experience gained during more than twenty years of collaboration between Stu and Technical College St. Keywords: continuous training, professional knowledge, College, and University. requirements.

REFERENCES

[1] Development of social partnership of professional educational institutions and employers. Spb. 2014. the Government of St. Petersburg. The Education Committee. 50 p. (rus.)
[2] 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 scientifically-practical Conference. 14-15 June 2011, St. Petersburg-St. Petersburg: Polytechnic University, 2011.- 410 p. (rus.)
[3] Afanasiev, I. E. Knyazeva student-oriented education in continuing education "School-University" Modern engineering. Science and education: the materials of the international scientifically-practical Conference. 20-21 June 2013, St. Petersburg-St. Petersburg: izdatel'stvo Polytechnic, 2013.-1205 p. (rus.)

УДК 621.01

Ю.А. Семенов [1], Н.С. Семенова [2]

СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКИХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

[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

Рассматривается опыт преподавания раздела теории механизмов и машин «Статика механизмов» в СПбГПУ. Приведены примеры статического анализа замкнутых кинематических цепей с одной и с несколькими степенями подвижности. Рассмотрены векторный метод определения сил, метод размыкания кинематической цепи и метод, основанный на принципе возможных перемещений.

Ключевые слова: статическая модель, векторный метод определения сил, метод размыкания кинематической цепи

Постановка задачи

Механизмы предназначены не только для получения требуемых движений выходных звеньев, но и для передачи сил. При неудачном выборе геометрических параметров кинематической схемы механизм может оказаться неработоспособным из-за недопустимо больших усилий, возникающих в его кинематических парах. Поэтому уже на стадии кинематического синтеза, т.е. до разработки деталей и узлов конструкции, должны быть проанализированы условия передачи сил механизмом.

Исследование геометрических условий передачи сил называется *статическим анализом механизма*. Этот анализ ведется с помощью упрощенной *статической модели*, учитывающей только уравновешивающие усилия (обобщенные движущие силы, удерживающие механизм в состоянии равновесия), рабочие нагрузки и реакции связей. Целью статического ана-

лиза является определение обобщенных уравновешивающих сил и реакций связей.

Активные силы и реакции связей, возникающие при движении плоских механизмов, образуют в общем случае пространственную систему сил. Реакции связей являются силами, распределенными по поверхностям соприкосновения конструктивных элементов, образующих кинематическую пару. В рамках жестких моделей в курсе ТММ невозможно определить законы их распределения. Поэтому при расчетах ограничиваются определением главных векторов и главных моментов сил реакций в каждой кинематической паре.

Если механизм имеет w степеней подвижности и содержит $P = \sum_{s=1}^{5} p_s$ кинематических пар, то общее число неизвестных при статическом расчете $n_н = w + 6P$. Здесь p_s – число кинематических пар $s-$ой подвижности. Для определения неизвестных усилий составляются уравнения равновесия для каждого из N подвижных звеньев механизма; их число $n_y = 6N$. Из структурной формулы «нормального» механизма $w = \sum_{s=1}^{5} sp_s - 6(N - P)$ следует, что $n_н - n_y = \sum_{s=1}^{5} sp_s = S \neq 0$,

т.е. в общей постановке задача статического анализа неразрешима.

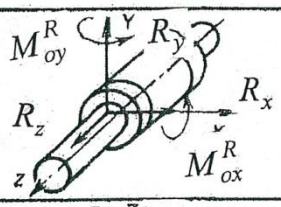
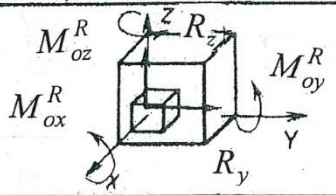
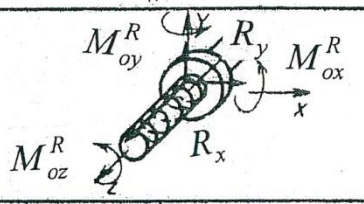
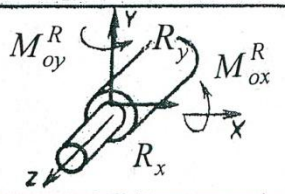
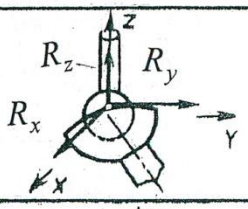
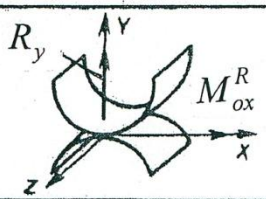
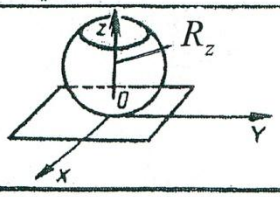
Для уменьшения числа неизвестных необходимы дополнительные предположения о физических свойствах кинематических пар или звеньев механизма, т.е. уточнение его статической модели. Одно из возможных уточнений – предположение об идеальности связей, осуществляемых кинематическими парами. С физической точки зрения предположение об идеальности эквивалентно предположению об отсутствии сил трения в кинематических парах. Гипотеза об идеальности пары $r-$ого класса ($s + r = 6$) накладывает на 6 компонент сил реакций и моментов $6 - r$ условий идеальности. Для некоторых видов кинематических пар эти условия приведены в табл. 1.

Как правило, в плоском механизме имеется v избыточных связей, а, иногда, и η лишних подвижностей; в этом случае $n_н - n_y = v - \eta \neq 0$, т.е. полный статический расчет механизма, даже при идеальных связях, оказывается невыполнимым. В таких случаях возможны следующие способы корректной постановки задачи:

1.*Условное понижение класса некоторых кинематических пар*, основанное на тех или иных конструктивных особенностях. Так, если в цилиндрическом шарнире учесть осевые зазоры, то его можно рассматривать как двухподвижную цилиндрическую пару. Цилиндрические шарниры, вы-

полненные с малым отношением длины к его диаметру, могут при расчете рассматриваться как трехподвижные сферические пары. Аналогичные предположения могут быть сделаны и для коротких ползунов. Возможность условного понижения класса кинематических пар в каждом конкретном случае устанавливает конструктор.

Таблица 1

Тип кинематической пары	Неизвестные компоненты реакций идеальной пары	Условия идеальности
Вращательная пара 5-го класса (одноподвижная)		$M_{0z}^R = 0$
Поступательная пара 5-го класса (одноподвижная)		$R_x = 0$
Винтовая пара 5-го класса (одноподвижная)		$M_{0z}^R + \frac{p}{2\pi} R_z = 0$
Цилиндрическая пара 4-го класса (двухподвижная)		$M_{0z}^R = 0;$ $R_z = 0$
Сферическая пара 3-го класса (трехподвижная)		$M_{0x}^R = 0;$ $M_{0y}^R = 0;$ $M_{0z}^R = 0$
Пара 2-го класса (четырехподвижная) типа цилиндр - цилиндр		$M_{0y}^R = 0;$ $M_{0z}^R = 0;$ $R_x = R_z = 0$
Пара 1-го класса (пятиподвижная) типа шар - плоскость		$M_{0x}^R = M_{0y}^R = 0;$ $M_{0z}^R = 0;$ $R_x = R_y = 0$

2. *Определение неизвестных усилий, лежащих в плоскостях движения звеньев.* Эти компоненты реакций и обобщенные движущие силы могут быть определены, поскольку они входят в независимую систему уравнений, не содержащую лишних неизвестных.

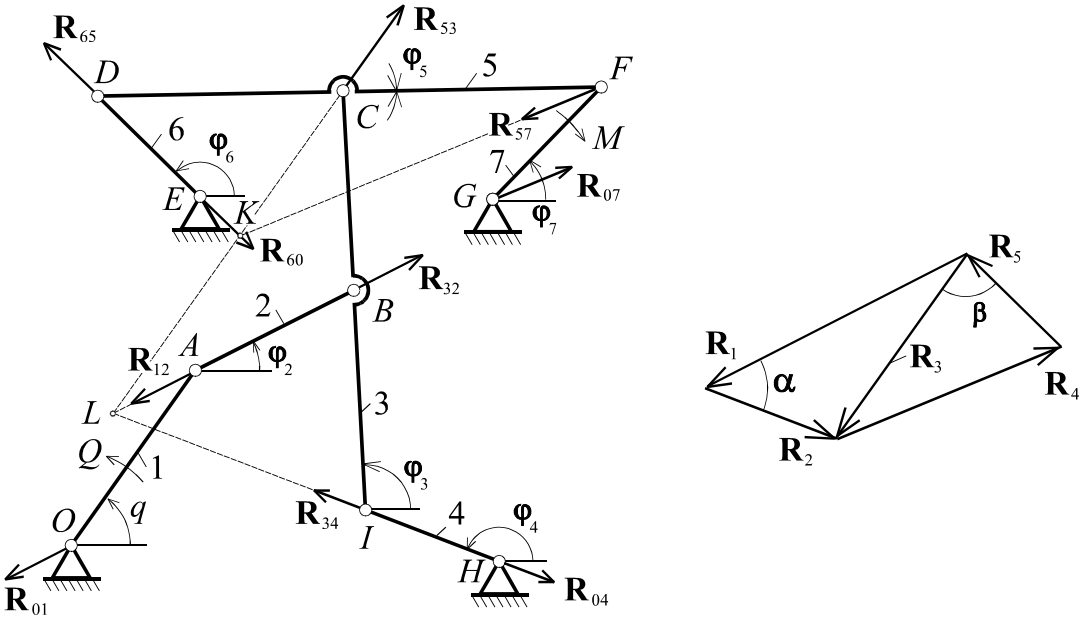
Следует отметить, что в обоих подходах определяется *лишь часть неизвестных* усилий; остальные неизвестные силы не малы – они просто не могут быть определены в рамках жесткой модели механизма. Кстати, при первом способе возможно построение нескольких статических моделей. Наверное, поэтому в ТММ чаще всего используется второй способ построения статических моделей.

Методы определения сил в рычажных механизмах

Рассмотрим некоторые методы нахождения реакций в кинематических парах и обобщенных уравновешивающих сил, которые редко используются в ТММ.

1. *Векторный метод определения сил*

Статический расчет механизма может производиться совместным решением векторных уравнений равновесия, составленных для каждого звена в отдельности. В качестве примера определим реакции в кинематических парах рычажного механизма, показанного на рис. 1, *а*, и уравновешивающий момент Q, если к выходному звену 7 в заданном положении приложен нагрузочный момент M.



а) б)

Рис.1.

Пусть известны следующие геометрические параметры механизма: входная координата q, длины звеньев и координаты неподвижных шарниров. Сначала из системы уравнений геометрического анализа

$$\left.\begin{aligned}
\ell_{AB}\cos\varphi_2 - \ell_{BI}\cos\varphi_3 - \ell_{HI}\cos\varphi_4 &= x_H - \ell_{OA}\cos q,\\
\ell_{AB}\sin\varphi_2 - \ell_{BI}\sin\varphi_3 - \ell_{HI}\sin\varphi_4 &= y_H - \ell_{OA}\sin q,\\
\ell_{CI}\cos\varphi_3 + \ell_{HI}\cos\varphi_4 + \ell_{CF}\cos\varphi_5 - \ell_{GF}\cos\varphi_7 &= x_G - x_H,\\
\ell_{CI}\sin\varphi_3 + \ell_{HI}\sin\varphi_4 + \ell_{CF}\sin\varphi_5 - \ell_{GF}\sin\varphi_7 &= y_G - y_H,\\
\ell_{CI}\cos\varphi_3 + \ell_{HI}\cos\varphi_4 - \ell_{DC}\cos\varphi_5 - \ell_{ED}\cos\varphi_6 &= x_E - x_H,\\
\ell_{CI}\sin\varphi_3 + \ell_{HI}\sin\varphi_4 - \ell_{DC}\sin\varphi_5 - \ell_{ED}\sin\varphi_6 &= y_E - y_H
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

при заданной сборке звеньев определяются групповые координаты: $\varphi_2 - \varphi_7$.

Векторные уравнения равновесия подвижных звеньев механизма имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
&\mathbf{R}_{01} + \mathbf{R}_{21} = 0, && Q + \left|\mathbf{l}_{OA}\times\mathbf{R}_{21}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{32} + \mathbf{R}_{12} = 0, && \left|\mathbf{l}_{AB}\times\mathbf{R}_{32}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{43} + \mathbf{R}_{23} + \mathbf{R}_{53} = 0, && \left|\mathbf{l}_{CB}\times\mathbf{R}_{23}\right|_z + \left|\mathbf{l}_{CI}\times\mathbf{R}_{43}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{04} + \mathbf{R}_{34} = 0, && \left|\mathbf{l}_{HI}\times\mathbf{R}_{34}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{35} + \mathbf{R}_{65} + \mathbf{R}_{75} = 0, && \left|\mathbf{l}_{DC}\times\mathbf{R}_{65}\right|_z + \left|\mathbf{l}_{CF}\times\mathbf{R}_{75}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{06} + \mathbf{R}_{56} = 0, && \left|\mathbf{l}_{ED}\times\mathbf{R}_{56}\right|_z = 0,\\
&\mathbf{R}_{07} + \mathbf{R}_{57} = 0, && -M + \left|\mathbf{l}_{GF}\times\mathbf{R}_{57}\right|_z = 0.
\end{aligned}$$

Если ввести обозначения (см. рис. 1, *б*):

$$\begin{aligned}
&\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_{01} = \mathbf{R}_{12} = \mathbf{R}_{23}, \quad \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_{04} = \mathbf{R}_{43},\\
&\mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_{07} = \mathbf{R}_{75}, \quad \mathbf{R}_5 = \mathbf{R}_{06} = \mathbf{R}_{65},\\
&\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_{35} = -\mathbf{R}_4 - \mathbf{R}_5,
\end{aligned} \qquad (2)$$

то уравнения равновесия моментов перепишутся в форме

$$
\begin{aligned}
&Q - \left| \mathbf{l}_{OA} \times \mathbf{R}_1 \right|_z = 0, \\
&\left| \mathbf{l}_{CB} \times \mathbf{R}_1 \right|_z + \left| \mathbf{l}_{CI} \times \mathbf{R}_2 \right|_z = 0, \\
&\left| \mathbf{l}_{DC} \times \mathbf{R}_5 \right|_z + \left| \mathbf{l}_{CF} \times \mathbf{R}_4 \right|_z = 0, \\
&-M - \left| \mathbf{l}_{GF} \times \mathbf{R}_4 \right|_z = 0.
\end{aligned} \qquad (3)
$$

Из записанных выше уравнений следует, что векторы $\mathbf{l}_{AB}$ и $\mathbf{R}_1$, $\mathbf{l}_{HI}$ и $\mathbf{R}_2$, $\mathbf{l}_{ED}$ и $\mathbf{R}_5$ коллинеарны, т.е.

$$
\mathbf{R}_1 = \mu_1 \mathbf{l}_{AB}, \quad \mathbf{R}_2 = \mu_2 \mathbf{l}_{HI}, \quad \mathbf{R}_5 = \mu_5 \mathbf{l}_{ED},
$$

где μ_1, μ_2 и μ_5 – коэффициенты пропорциональности.

С учетом (2) и (3) уравнения равновесия моментов для шестизвенной группы Ассура примут следующий вид

$$
\left.
\begin{aligned}
\mu_1 a_1 + \mu_2 a_2 &= 0, \\
\mu_1 b_1 + \mu_2 b_2 + \mu_5 b_3 &= 0, \\
\mu_1 c_1 + \mu_2 c_2 + \mu_5 c_3 &= 0,
\end{aligned}
\right\}, \qquad (4)
$$

где

$$
\begin{aligned}
a_1 &= \left| \mathbf{l}_{CB} \times \mathbf{l}_{AB} \right|_z = \ell_{CB} \ell_{AB} \sin(\varphi_2 - \varphi_3); \\
a_2 &= \left| \mathbf{l}_{CI} \times \mathbf{l}_{HI} \right|_z = \ell_{CI} \ell_{HI} \sin(\varphi_4 - \varphi_3); \\
b_1 &= -\left| \mathbf{l}_{CF} \times \mathbf{l}_{AB} \right|_z = \ell_{CF} \ell_{AB} \sin(\varphi_5 - \varphi_2); \\
b_2 &= -\left| \mathbf{l}_{CF} \times \mathbf{l}_{HI} \right|_z = \ell_{CF} \ell_{HI} \sin(\varphi_5 - \varphi_4); \\
b_3 &= \left| \mathbf{l}_{DC} \times \mathbf{l}_{ED} \right|_z - \left| \mathbf{l}_{CF} \times \mathbf{l}_{ED} \right|_z = \ell_{DF} \ell_{ED} \sin(\varphi_6 - \varphi_5); \\
c_1 &= \left| \mathbf{l}_{GF} \times \mathbf{l}_{AB} \right|_z = \ell_{GF} \ell_{AB} \sin(\varphi_7 - \varphi_2); \\
c_2 &= -\left| \mathbf{l}_{GF} \times \mathbf{l}_{HI} \right|_z = \ell_{GF} \ell_{HI} \sin(\varphi_7 - \varphi_4); \\
c_3 &= -\left| \mathbf{l}_{GF} \times \mathbf{l}_{ED} \right|_z = \ell_{GF} \ell_{ED} \sin(\varphi_6 - \varphi_7).
\end{aligned}
$$

Из линейной системы уравнений (4) найдем коэффициенты пропорциональности

$$
\mu_1 = -\frac{a_2 b_2 M}{J} =; \quad \mu_2 = \frac{a_1 b_3 M}{J}; \quad \mu_5 = \frac{(b_1 a_2 - a_1 b_2) M}{J},
$$

где якобиан системы уравнений геометрического анализа

$$J = a_1(b_3c_2 - b_2c_3) + a_2(b_1c_3 - b_3c_1). \qquad (5)$$

Тогда модули реакций соответственно равны

$R_1 = R_{01} = R_{12} = R_{23} = \mu_1 \ell_{AB}$; $R_2 = R_{01} = R_{12} = R_{23} = \mu_2 \ell_{AB}$;

$R_5 = R_{65} = R_{06} = \mu_5 \ell_{ED}$; $R_3 = \sqrt{R_1^2 + R_1^2 - 2R_1R_2\cos\alpha}$;

$R_4 = \sqrt{R_3^2 + R_5^2 - 2R_3R_5\cos\beta}$, где $\alpha = \varphi_2 - \varphi_4 + \pi$;

$\beta = \pi - \arcsin(R_1 \sin\alpha / R_3) + \varphi_6 - \varphi_4$. .

Уравновешивающий момент из первого уравнения системы (3) равен

$$Q = \mu_1 \ell_{OA} \ell_{AB} \sin(q - \varphi_2).$$

2. Метод размыкания кинематической цепи

Этот метод базируется на условном размыкании некоторых кинематических пар с тем, чтобы кинематическая цепь приобрела структуру «дерево». Метод применим для всего механизма в целом и для отдельных структурных групп. При этом уравнения равновесия составляются в форме уравнений моментов относительно осей шарниров, и уравнений проекций сил на оси, соответствующие линейным координатам.

В качестве примера определим уравновешивающий момент Q и реакции в кинематических парах механизма, изображенного на рис. 1, *а*.

Условно разомкнем механизм в шарнирах H, E и G для того, чтобы кинематическая цепь приобрела структуру «дерево» (рис. 2), а действие связей заменим соответствующими проекциями реакций.

Для определения этих сил и уравновешивающего момента составим уравнения равновесия открытой кинематической цепи:

$$\sum M_I = R_{04x}(y_I - y_H) + R_{04y}(x_H - x_I) = 0,$$
$$\sum M_F = R_{07x}(y_F - y_G) - R_{07y}(x_F - x_G) - M = 0,$$

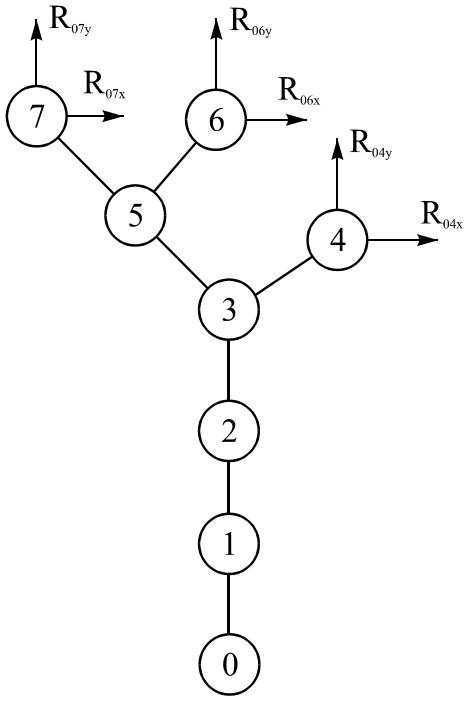


Рис.2.

$$\sum M_D = R_{06x}(y_D - y_E) + R_{06y}(x_E - x_D) = 0,$$
$$\sum M_C = R_{06x}(y_C - y_E) - R_{06y}(x_C - x_E) + R_{07x}(y_C - y_G) + R_{07y}(x_G - x_C) - M = 0,$$
$$\sum M_B = R_{04x}(y_B - y_H) + R_{04y}(x_H - x_B) - R_{06x}(y_E - y_B) + R_{06y}(x_B - x_E) -$$
$$- R_{07x}(y_G - y_B) + R_{07y}(x_G - x_B) - M = 0,$$
$$\sum M_A = R_{04x}(y_A - y_H) + R_{04y}(x_H - x_A) - R_{06x}(y_E - y_A) - R_{06y}(x_A - x_E) -$$
$$- R_{07x}(y_G - y_A) + R_{07y}(x_G - x_A) - M = 0,$$
$$\sum M_O = Q + R_{04x}(y_O - y_H) + R_{04y}(x_H - x_O) - R_{06x}(y_E - y_O) + R_{06y}(x_E - x_O) -$$
$$- R_{07x}(y_G - y_O) + R_{07y}(x_G - x_O) - M = 0.$$

Из первых шести уравнений равновесия определим проекции реакций

$$R_{04x} = -R_{34x} = \frac{J_{04x}}{J}; \quad R_{04y} = -R_{34y} = \frac{J_{04y}}{J};$$
$$R_{06x} = -R_{56x} = \frac{J_{06x}}{J}; \quad R_{06y} = -R_{56y} = \frac{J_{06y}}{J};$$
$$R_{07x} = -R_{57x} = \frac{J_{07x}}{J}; \quad R_{07y} = -R_{57y} = \frac{J_{07y}}{J},$$

где якобиан системы групповых уравнений

$$J=\begin{vmatrix} y_I-y_H & x_H-x_I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_F-y_G & x_G-x_F \\ 0 & 0 & y_D-y_E & x_E-x_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_C-y_E & x_E-x_C & y_C-y_G & x_G-x_C \\ y_B-y_H & x_H-x_B & y_B-y_E & x_E-x_B & y_B-y_G & x_G-x_B \\ y_A-y_H & x_H-x_A & y_A-y_E & x_E-x_A & y_A-y_G & x_G-x_A \end{vmatrix}. \qquad (6)$$

Из последнего уравнения равновесия найдем

$$Q=-R_{04x}(y_O-y_H)-R_{04y}(x_H-x_O)+R_{06x}(y_E-y_O)-R_{06y}(x_E-x_O)+$$

$$+R_{07x}(y_G-y_O)-R_{07y}(x_G-x_O)+M.$$

3. Метод определения сил, основанный на принципе возможных перемещений

Условия равновесия механизма (механической системы с идеальными связями) могут быть получены с помощью принципа возможных перемещений, в соответствии с которым суммарная работа всех активных сил на любом возможном перемещении должна равняться нулю.

При исследовании условий равновесия приходится решать два вида задач: а) при заданных силах определять положения равновесия; б) при заданном положении равновесия определять активные силы, приложенные к звеньям механизма

Определим уравновешивающий момент в рычажном механизме, показанном на рис. 1, *а*.

Дадим входной координате q малое перемещение δq; при этом выходное звено получит перемещение $\delta\varphi_7$, величина которого, с точностью до малых второго порядка, $\delta\varphi_7=(d\varphi_7/dq)\delta q$.

Приравняем нулю возможную работу рабочего момента и момента Q: $\delta A=Q\delta q-M\cdot\delta\varphi_7=0$. Тогда получим

$$Q=Md\varphi_7/dq=M\varphi_7'=M\cdot J_Q/J,$$

где якобиан системы групповых уравнений (1):

$$J = \begin{vmatrix} -\ell_{AB}\sin\varphi_2 & \ell_{BI}\sin\varphi_3 & \ell_{HI}\sin\varphi_4 & 0 & 0 & 0 \\ \ell_{AB}\cos\varphi_2 & -\ell_{BI}\cos\varphi_3 & -\ell_{HI}\cos\varphi_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\ell_{CI}\sin\varphi_3 & -\ell_{HI}\sin\varphi_4 & -\ell_{CF}\sin\varphi_5 & 0 & \ell_{GF}\sin\varphi_7 \\ 0 & \ell_{CI}\cos\varphi_3 & \ell_{HI}\cos\varphi_4 & \ell_{CF}\cos\varphi_5 & 0 & -\ell_{GF}\cos\varphi_7 \\ 0 & -\ell_{CI}\sin\varphi_3 & -\ell_{HI}\sin\varphi_4 & \ell_{DC}\sin\varphi_5 & \ell_{ED}\sin\varphi_6 & 0 \\ 0 & \ell_{CI}\cos\varphi_3 & \ell_{HI}\cos\varphi_4 & -\ell_{DC}\cos\varphi_5 & -\ell_{ED}\cos\varphi_6 & 0 \end{vmatrix},$$

где J_Q – определитель, получаемый при замене шестого столбца в определителе J на столбец $\left(\ell_{OA}\sin q,\ \ -\ell_{OA}\cos q,\ \ 0,\ \ 0,\ \ 0,\ \ 0\right)^T$.

Принцип возможных перемещений применим также для определения реакций освобождающих связей. Для этого механизм последовательно освобождается от одной из связей. При этом на единицу увеличивается его число степеней свободы. В результате появляется новое возможное перемещение, которое раньше не допускалось этой связью. Действие связи заменяется соответствующей реакцией, которую включают в состав активных сил. Далее подсчитывается работа всех действующих активных сил на новом возможном перемещении системы. Приравняв нулю возможную работу этих сил, получим уравнение для определения искомой реакции.

Отметим, что указанный метод определения сил (активных или реакций связей) имеет важное преимущество перед остальными методами: каждая из неизвестных сил определяется независимо от остальных решением одного уравнения. Задачи на равновесие звеньев механизма решаются также *графическим*, *погруппным* методами и *методом неопределенных множителей Лагранжа*. Со статическим расчетом многоподвижных рычажных механизмов можно ознакомиться в $[4-9]$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Структурный анализ механизмов. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2. С. 3-14.
2. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Геометрический анализ плоских рычажных механизмов // Теория механизмов и машин. – 2004. Т. 1. № 3 С. 26-41.
3. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Особенности кинематического анализа механизмов с внутренними входами // Теория механизмов и машин. 2004, Т. 2. 4 С. 30-39.
4. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Теория механизмов и машин. Сборник задач и заданий. Изд-во Политехн. ун-та, 2011, с. 208.
5. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Статика механизмов. // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. № 8. С. 47-58.
6. *Пейсах Э.Е., Нестеров В.А.* Система проектирования плоских рычажных механизмов. М.: Машиностроение, 1988. - 232 с.

7. Теория механизмов и машин / *Коловский М.З., Евграфов А.Н., Семенов Ю.А., Слоущ А.В*. –учебник, 4-е изд.– М.: Академия, 2013. – 560 с.
8. *Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V.* Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. p. 394.
9. *Евграфов А.Н., Петров Г.Н.* Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. №2. С. 50-63.
10. *А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н. Петров*. Теория механизмов и машин: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 248 р.
1. 11. *Семенов Ю.А., Семенова Н.С.* Геометрический анализ плоских рычажных механизмов//3-я Международная научно-практическая конференция « Современное машиностроение. Наука и образование». СПб, 20-21 июня 2013 г. С. 157-167.
11. *Holzman/Meyer/Schumpich***.** Technische Mechanik./Teil 1.Statik. – B.G. Teubner Stuttgart, 1990. – 182 s.

Yu.A.Semenov, N.S. Semenova

STATIC ANALYSIS OF PLANAR MECHANISMS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Teaching experience of the static analysis section of the theory of mechanisms and machines course at Saint-Petersburg State Technical University is presented. Examples of the static analysis of the closed kinematic links with one and with several degrees of freedom are shown. Vector method of calculating forces, group method, method of disconnection of a kinematic link and method based on a principle of virtual displacements are demonstrated.

*Key words***:** function the static model, the vector method of determination of strength, method of breaking kinematic chain

REFERENCES

[1] Semenov Y.A, Semenova N,S. Structural analysis mechanisms. // Theory of mechanisms and machines. 2003. So 1. No. 2. P. 3-14 (rus).
[2] Semenov Y.A, Semenova N,S. Geometric analysis of flat planar mechanisms // Theory of mechanisms and machines. - 2004. So 1. № 3. P. 26-41 (rus).
[3] Semenov Y.A, Semenova N,S. Features kinematic analysis of mecha-

nisms with internal inputs // Theory of mechanisms and machines. 2004, So 2. 4 P. 30-39 (rus).
[4] Semenov Y.A, Semenova N,S. Theory of mechanisms and machines. A collection of problems and tasks. Publishing house Politechn. University, 2011, 208 p (rus).
[5] Semenov Y.A, Semenova N,S. Statics mechanisms. // Theory of mechanisms and machines. 2006. So 4. № 8. P. 47-58 (rus).
[6] Pesach E.YE., Nesterov VA. System design of flat planar mechanisms. M: Mashinostroenie, 1988. - 232 p (rus).
[7] Theory of mechanisms and machines / Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V -a textbook, 4th ed.- M: the Academy, 2013. - 560 p. (rus).
[8] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000. p. 394
[9] Evgrafov A.N., G.N. Petrov. Geometric and kinetostatics analysis of flat lever mechanisms of the second class. // Theory of mechanisms and machines. 2003. So 1. No. 2. P. 50-63 (rus).
[10] A.N. Evgrafov, M.S. Kolovsky, G.N. Petrov. Theory of mechanisms and machines: textbook. the allowance. - 2-e Izd., Corr. and extra - SPb.: Publishing house Politechn. University, 2009. – 248 p (rus).
[11] Semenov Y.A, Semenova N.S. Geometric analysis flat ry-Chernyh mechanisms//3rd international scientific-practical conference " Modern machine-building. Science and education". St.Petersburg, 20-21 June 2013 P. 157-167 (rus).
[12] Holzman/Meyer/Schumpich**.** Technische Mechanik./Teil 1.Statik. – B.G. Teubner Stuttgart, 1990. – 182 p.

МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.01

П.А. Андриенко[1], В.И. Каразин[2], И.О. Хлебосолов[3]

О КОМПЛЕКСНОМ ПОДХОДЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ ИСПЫТАНИЯМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

[1]Павел Александрович Андриенко – к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845; E-mail: andrienko-p@mail.ru

[2]Владимир Игоревич Каразин – д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845; E-mail: tmm-russia@mail.ru

[3]Игорь Олегович Хлебосолов – к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845; E-mail: tmm-russia@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы формирования лабораторного оборудования, совмещающего испытательные воздействия, имитирующие реальные условия эксплуатации блоков навигационных систем.

Ключевые слова: испытательное оборудование, акустические стенды, виброротационные стенды, электропневмогенератор.

Создание навигационных систем включает в себя различные стадии расчетов, моделирования, лабораторных и натурных испытаний. Лабораторные испытания в общем объеме составляют существенную долю, увеличение которой приводит к повышению надежности объекта испытания и снижению его цены. Большие возможности компьютерных программ, позволяющих осуществлять виртуальные нагружения и имитацию условий эксплуатации, используются на всех стадиях разработки прибора. Достоверность такого моделирования определяется двумя критериями. Во-первых, это адекватность построенной модели натуре, а во-вторых, - свой-

ства исследовательской программы, в основу которой положены определенные математические и физические законы, благодаря которым указанная выше адекватность может нарушиться.

Лабораторные испытания наиболее эффективны и необходимы на стадии экспериментальной обработки элементов прибора и прибора в целом, а также на стадии отработки и совершенствования технологии изготовления, монтажа, компоновки и размещения фиксирующих и крепежных элементов и т.д. Компьютерное моделирование и лабораторные испытания необходимы в общем цикле разработки и дополняют друг друга.

Испытательное оборудование, существующее издавна, включает в себя вибростенды, центрифуги, копры, стенды линейных ускорений, акустические камеры и климатические камеры (температура, давление, пыль и т.д.) [1, 2]. Стремление к объединению известных воздействий в лабораторных стендах позволяет не только сократить затраты времени на комплексные испытания приборов, но и воспроизвести дополнительные воздействия, которые формируются от взаимодействия движений, в результате чего возникают гироскопические эффекты и кориолисовы ускорения. В некоторых случаях, благодаря этому, удается более точно имитировать заданные режимы полета.

Испытания на центрифугах на воздействия линейных ускорений осуществляются с того времени, когда изобрели акселерометр с подвижной массой. На центрифугах же осуществлялась и градуировка этих приборов.

В центробежных стендах объект испытаний закреплялся на роторе центрифуги, а требуемые перегрузки определялись частотой вращения ротора (шпинделя). В линейных стендах требуемые перегрузки создавались линейными двигателями, либо работой расширяющегося газа. Основными параметрами, определяющими габариты и мощность этих стендов, являются объем и масса объекта испытаний.

Развитие электронной базы в сторону миниатюризации элементов и расширения их функциональных возможностей привело к значительному увеличению количества задач, решаемых навигационными блоками. А значит, увеличилось и количество параметров, подлежащих проверке методами компьютерного моделирования и методами лабораторных испытаний на соответствующих стендах.

Значительное количество электронных элементов, новые способы соединения токоведущих систем, оригинальные методы закрепления монтажных плат, использование новых металлических и неметаллических материалов, а также различные формы корпусов и оснований. Это и многое другое не является однозначно математически моделируемыми элементами, а поэтому однозначно требует проверки на испытательных стендах с комплексными воздействиями. К тому же требования к надежности работы различных систем объектов испытаний серьезно возросли.

Появились предпосылки для усложнения лабораторных стендов, позволяющие расширить функциональные возможности оборудования для проведения новых видов исследований. В состав некоторых стендов вводятся колебательные системы. Пример такой системы, основанной на использовании механических пружин, приведен в [3]. Объект массой m закреплен между двумя упругими элементами, жесткостью c_1 и c_2.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний системы, при использовании упругих элементов с линейной характеристикой (цилиндрических пружин), имеет вид:

$$m\ddot{x} + c_1 x + c_2 x = 0. \quad (1)$$

Общее решение этого уравнения:

$$x = C_1 \sin(kt) + C_2 \cos(kt), \quad (2)$$

где t – время; $k = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{m}}$ – частота свободных колебаний.

Амплитудное значение ускорения объекта испытаний зависит от частоты свободных колебаний k, которая определяется постоянными параметрами системы c_1, c_2 и m.

Для решения некоторых задач испытаний появилась необходимость использования электромагнитных вибровозбудителей в составе центрифуги. В этих случаях жесткость колебательной системы уже не является постоянной величиной, но она подбирается таким образом, чтобы испытания проводились на ее линейном участке. Примеры подобных ротационных стендов приведены в [4, 5, 6]. Введение дополнительных агрегатов увеличивало потребляемую мощность испытательных стендов. Требовались средства, позволяющие при ограниченной мощности воспроизвести требуемый диапазон ускорений. В составе стендов стали появляться разгрузочные устройства, как механические, так и пневматические.

Экономия мощностей может быть достигнута при использовании уравновешивающих и компенсирующих центробежные силы устройств. Последние могут быть механическими, пневматическими, пневмогидравлическими, а также пассивными или активными – снабженными системами управления с обратными связями.

Один из наиболее рациональных способов воспроизведения относительных движений на платформе центрифуги, в том числе и виброперемещение, это использование резонансного эффекта [7]. Он достигается изменением жесткости упругого подвеса подвижной массы.

В свою очередь одним из способов организации упругого подвеса является использование пневматических пружин [8]. В этом случае уравне-

ние свободных колебаний примет вид:

$$m\ddot{x} + F_1(x) + F_2(x) = 0, \tag{3}$$

где $F_1(x)$ и $F_2(x)$ –характеристика упругости сжатого воздуха левой и правой полостей цилиндра соответственно.

В общем виде упругую характеристику можно представить в виде:

$$F(x) = S_{\text{П}}\left[\frac{p_{\text{а}0}V_0^{\gamma}}{(V_0 - S_{\text{П}}x)^{\gamma}} - p_{\text{в}}\right],$$

где $S_{\text{П}} = \pi\dfrac{d^2}{4}$ – площадь поршня, d – диаметр поршня, V_0 – начальный объем цилиндра, γ – показатель политропы, $p_{\text{в}}$ – внешнее давление, $p_{\text{а}0} = p_{\text{и}0} + p_{\text{в}}$ – начальное абсолютное давление в цилиндре, $p_{\text{и}0}$ – начальное избыточное давление воздуха.

Окончательно дифференциальное уравнение свободных колебаний объекта имеет вид:

$$m\ddot{x} + S_{\text{П}}\left[\frac{p_{\text{и}0} + p_{\text{в}}}{\left(1 - \dfrac{x}{h_0}\right)^{\gamma}} - p_{\text{в}}\right] - S_{\text{П}}\left[\frac{p_{\text{и}0} + p_{\text{в}}}{\left(1 - \dfrac{-x}{h_0}\right)^{\gamma}} - p_{\text{в}}\right] = 0. \tag{4}$$

Как видно, регулировку упругих характеристик левой и правой полостей, можно осуществить путем изменения давления $p_{\text{и}0}$. Амплитуда колебаний, как и в случае использования упругих элементов с линейной характеристикой, задается начальным отклонением поршня цилиндра из положения равновесия на требуемую величину x_0.

Очевидно, полученное уравнение (4) нелинейно. Для его решения можно применить приближенные аналитические методы, например, метод гармонического баланса. На основании этого метода можно показать, что решение имеет вид:

$$x(t) = a_1(k_1)\cos(k_1 t), \tag{5}$$

Для определения ускорения необходимо взять дважды производную от (4) по времени:

$$x(t) = -a_1(k_1)k_1^2\cos(k_1 t). \tag{6}$$

Откуда модуль амплитуды ускорения:

$$X_{\max} = a_1(k_1)k_1^2. \tag{7}$$

Полученные выражения позволяют построить поверхность-номограмму, по которой можно выбрать реализуемую комбинацию параметров амплитуда-ускорение-частота. На рис. 1 приведен пример подоб-

ной номограммы в диапазонах перемещений, ускорений и частот соответственно: 0,1 – 0,5 м; 2000 – 5000 м/с^2; 10 – 40 Гц.

Использование указанной зависимости позволяет выбрать параметры левой и правой полостей такими, что колебания системы будут происходить с собственной частотой, то есть в резонансном режиме.

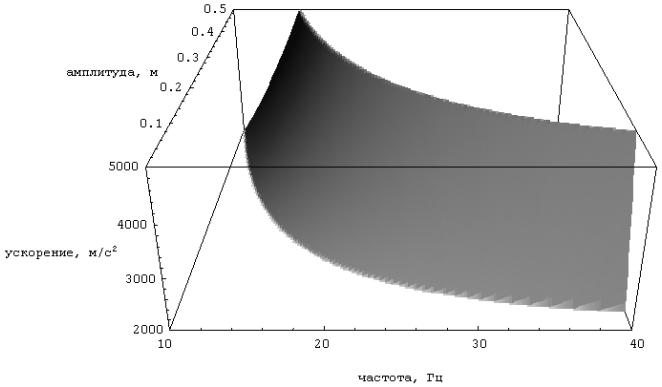


Рис. 1. Пример номограммы «амплитуда-ускорение-частота»

Появление многофункциональных приборов, включающих в себя компенсированные акселерометры, интеграторы и другие блоки обработки и преобразования сигналов, сформировало новую идеологию процесса испытаний. Это явилось причиной стремления к использованию лабораторных стендов, способных воспроизводить комплексные воздействия в широком диапазоне изменения испытательных воздействий.

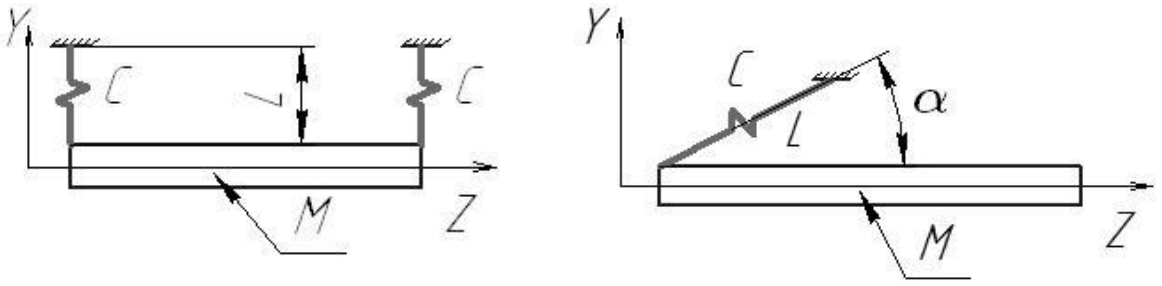
Потребность в воспроизведении вибрационного воздействия на фоне ускорения возникла еще в 80-х годах прошлого столетия. Однако, по ряду причин эти работы не получили дальнейшего развития несмотря на значительное количество авторских свидетельств и некоторых экспериментальных наработок. Возрождение интереса к указанному оборудованию происходит на новом техническом уровне с большими возможностями в части использования типового оборудования, систем управления и вычислительной техники с современным программным обеспечением.

Комбинация вибрационного и акустического воздействия реализована в стенде [9], 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.

Еще одним примером комбинированного испытания может быть совмещение акустического давления с точечным периодическим силовым воздействием в заданном диапазоне частот. Использование оригинального электропневмомеханического генератора позволяет одновременно воспроизводить оба воздействия в широком диапазоне частот. Возможность из-

менения расстояния от источника воздействия до объекта испытания, а также применение нескольких генераторов в различных точках объекта испытаний, расширяет диапазон регулирования параметров имитационного воздействия. В некоторых случаях указанные испытания проводят для выявления резонансных зон в объекте испытаний. Поэтому предъявляются 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. 2, *а* и рис. 2, *б*.

Расчетные зависимости пространственного низкочастотного подвеса приведены ниже и позволяют определить собственные частоты подвеса. Исходными параметрами являются масса объекта испытаний M, длина тросов $L_{тр}$, их диаметр $d_{тр}$ и количество n.



а) *б*)

Рис. 2. Расчетная схема подвеса

Собственная (поперечная, вдоль оси Z) частота подвеса изделия $f_{поп}$ определяется по формуле физического маятника:

$$f_{поп} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L_{тр}}}, \tag{8}$$

где g – ускорение свободного падения.

Собственная продольная (вдоль оси Y) частота $f_{пр}$ определяется выражением:

$$f_{пр} = \sqrt{\frac{E \cdot S_{тр} \cdot \cos\alpha \cdot n}{L_{тр} \cdot M_{тр}}}, \tag{9}$$

где E – модуль Юнга материалов тросов, $S_{тр}$ – площадь поперечного сечения тросов, α – угол наклона подвеса.

Особенность точечного динамического воздействия, как было сказано выше, заключается в способе воспроизведения этого воздействия. Электропневмогенератор снабжен комбинацией относительно подвижных дисков, в которых по окружности расположены сопла Лаваля. Сопла, в соответствии с теорией [10], обеспечивают максимальную скорость истечения

струи газа, требуемую для достижения эффекта периодического механического воздействия на объект испытаний. Фрагмент узла относительно подвижных дисков приведен на рис. 3.

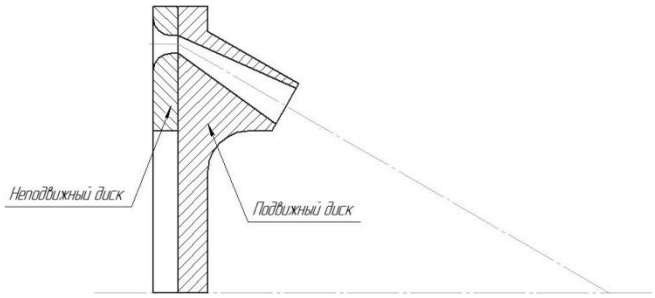


Рис. 3. Фрагмент узла дисков электропневмогенератора

Исходными данными для расчета в этом случае являются рабочее давление воздуха в пневмогенераторе $P_р$, объемный расход воздуха Q, плотность воздуха ρ=1,29 кг/м^3, показатель адиабаты k=1,4, скорость звука в воздухе $v_{зв}$=322 м/с.

Если сечение отверстия, откуда истекает струя, имеет постоянный диаметр, то скорость струи определяется выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot P_р \left[1 - \left(\frac{P_{вых}}{P_р}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \cdot \left(\frac{P_{вых}}{P_р}\right)^{\frac{1}{k}}}{(k-1)\cdot \rho}}, \qquad (10)$$

где $P_{вых}$ –давление на выходе из насадка.

Вид зависимости скорости истечения струи воздуха из отверстия постоянного сечения от давления приведен на рис. 4, *а*. Если истечение струи происходит из сопла Лаваля, то скорость такой струи не ограничивается критическим режимом истечения. Вид такой зависимости приведен на рис. 4, *б*.

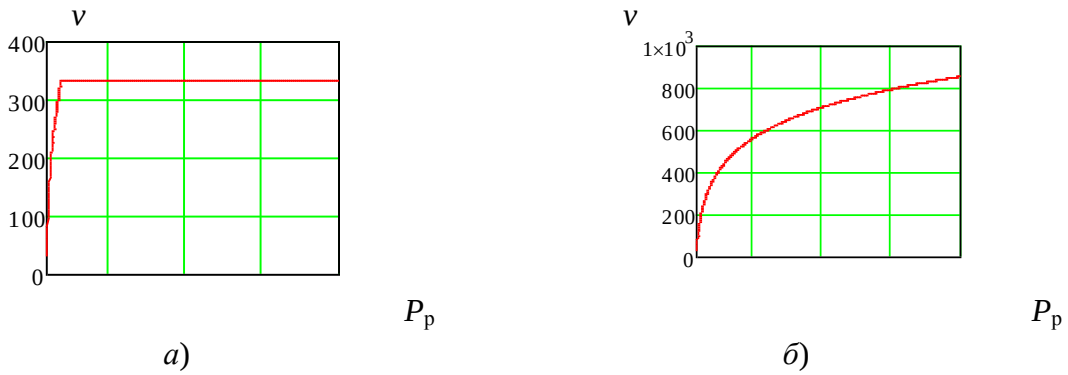


Рис. 4. Вид зависимости скорости истечения газа от рабочего давления *а*) из насадка; *б*) из сопла Лаваля

Зависимость приведена для докритического и критического режимов истечения.

Сила удара струи воздуха из насадка определяется по формуле профессора Никонова [11]:

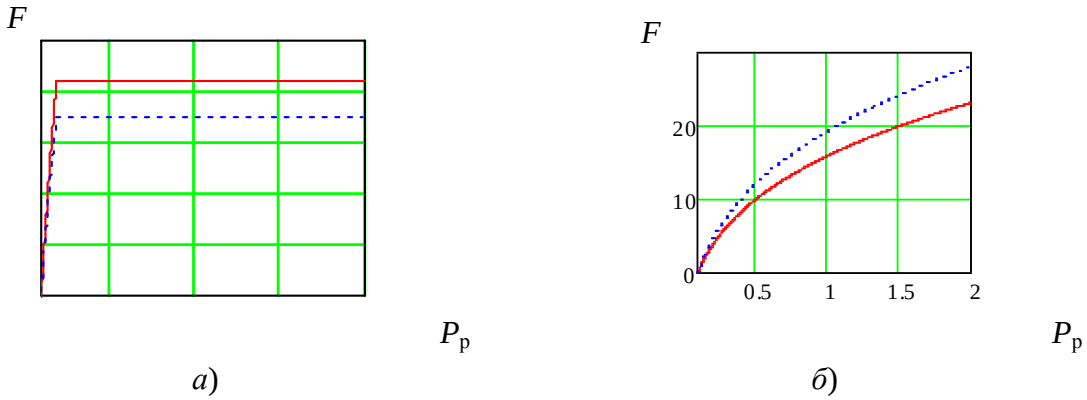
$$F = \left(1{,}06 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{l}{d_0}\right) \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S\,, \qquad (11)$$

где l – расстояние от насадка до поверхности объекта испытаний, d_0 – диаметр насадка, S – площадь поперечного сечения насадка.

В случае, если струя направлена под углом α к поверхности, зависимость (11) приобретает вид:

$$F = \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \sin\alpha\,. \qquad (12)$$

Примерный вид зависимостей (11) и (12) показан на рис. 5.



а) *б*)

Рис. 5. Вид зависимости силы удара струи от рабочего давления
а) из насадка; *б*) из сопла Лаваля

Очевидно также, что сила удара струи линейно зависит от расстояния между насадком и поверхностью объекта испытаний.

Дальнейшие параметры ударного импульса регулируются количеством и формой отверстий подвижного и неподвижного дисков пневмовибратора (рис. 3). Можно получить импульсы требуемой скважности. Частота воздействия при этом может варьироваться от нескольких герц, до нескольких килогерц.

В заключение следует отметить, что в процессе удовлетворения требований промышленности к моделированию и имитации различных комбинированных воздействий приходится решать групповые задачи создания механической части, привода и программного управления генераторов воздействий, а также системы обмена информацией и обработки данных для обеспечения функционирования обратных связей. Комплексный подход к решению поставленных задач позволяет наиболее полно и качественно обеспечивать задачи испытаний.

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. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, Д.П. Козликин, И.О. Хлебосолов. Воспроизведение линейных ускорений на поступательных стендах.// Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. -СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - С. 128-137.
4. 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.
5. А.Н. Евграфов, В.И. Каразин, И.О. Хлебосолов. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т.1. – № 1. – С. 92-96.
6. Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Динамика инерционного стенда с деформируемыми звеньями. // Испытательные и поверочные стенды. – Л.: ЛГТУ, 1992. с. 32–35.
7. Ксенофонтов А.А., Николаев В.Н., Чернокрылов С.Ю. Динамический стенд многофункционального назначения. // Испытательные и поверочные стенды. – Л.: ЛГТУ, 1992. с. 29–32.
8. П.А. Андриенко, В.И. Каразин, Д.П. Козликин, И.О. Хлебосолов. Особенности воспроизведения знакопеременных перегрузок.// Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. № 2. С. 133-141.
9. 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.
10. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
11. Нурок, Г.А. Гидромеханизация открытых разработок [Текст] / Г.А. Нурок. – М.: Недра , 1980.–582 с.

P.A. Andrienko, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov

AN INTEGRATED APPROACH TO LABORATORY TESTING OF NAVIGATION SYSTEMS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper considers the issues of formation of laboratory equipment, combining the test impact, simulating real life conditions blocks navigation systems.

Key words: testing equipment, acoustic stands, vibrostation stands, electropneumatic generator.

REFERENCES

[1] Ispytatel'naja tehnika: Spravochnik: V 2 kn. / ; Pod red. V. V. Kljueva.— Moskva : Mashinostroenie, 1982. Kn. 1 / G. S. Batuev, A. S. Bol'shih, V. S. Golubkov i dr. — 1982 .— 528 p. (rus.)

[2] Ballisticheskie ustanovki i ih primenenie v jeksperimental'nyh issledovanijah / N. A. Zlatin [i dr.]; pod red. N. A. Zlatina, G. I. Mishina.— M. : Nauka, 1974 .— 344 p. (rus.)

[3] P.A. Andrienko, V.I. Karazin, D.P. Kozlikin, I.O. Khlebosolov. Vosproizvedenie linejnyh uskorenij na postupatel'nyh stendah.// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. -SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011. - Pp. 128-137. (rus.)

[4] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Smirnov G.A. Rotornye stendy dlja vosproizvedenija parametrov dvizhenija. // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGTU. – SPb.: SPbGTU. – 1999. № 3(17). – p. 89 – 94.

[5] A.N. Evgrafov, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov. Vosproizvedenie parametrov dvizhenija na rotacionnyh stendah // Teorija mehanizmov i mashin. – 2003. – T.1. – № 1. – Pp. 92-96. (rus.)

[6] Karazin V.I., Khlebosolov I.O. Dinamika inercionnogo stenda s deformiruemymi zven'jami. // Ispytatel'nye i poverochnye stendy. – L.: LGTU, 1992. Pp. 32–35. (rus.)

[7] Ksenofontov A.A., Nikolaev V.N., Chernokrylov S.Ju. Dinamicheskij stend mnogofunkcional'nogo naznachenija. // Ispytatel'nye i poverochnye stendy. – L.: LGTU, 1992. Pp. 29–32. (rus.)

[8] P.A. Andrienko, V.I. Karazin, D.P. Kozlikin, I.O. Hlebosolov. Osobennosti vosproizvedenija znakoperemennyh peregruzok.// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. № 2. Pp. 133-141. (rus.)

[9] P.A. Andrienko, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov. Ob ispytanijah na kombinirovannye vozdejstvija.// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. № 2. Pp. 142-149.

[10] Lojcjanskij, L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. M.: Drofa, 2003. – 840 p.

[11] Nurok, G.A. Gidromehanizacija otkrytyh razrabotok [Tekst] / G.A. Nurok. – M.: Nedra , 1980.–582 p. (rus.)

УДК 621.865

А.П. Борина[1], В.А. Терешин[2]

ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВУНОГИМ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА

[1]Анастасия Петровна Борина, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905)285-5112, *E-mail: kamchatka1@rambler.ru*

[2]Валерий Алексеевич Терешин, доцент, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, *E-mail: terva@mail.ru*

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы управления пространственным движением двуногого шагающего аппарата в различных режимах: подъем (спуск) по ступенькам, движение по наклонной поверхности вверх (вниз) и поворот.

Ключевые слова: шагающие аппараты, управление движением, динамическая устойчивость.

Использование двуногого шагающего аппарата представляет основной интерес для движения по заранее неподготовленной местности, когда необходимо двигаться не по прямой ровной дороге, а преодолевать препятствия. Система управления таким аппаратом должна обеспечить обработку информации о местности, принятие решений о характере движения, контроль за их выполнением. На рис.1 показана кинематическая схема двуногого шагающего аппарата и система координат.

В работах [2] и [3] были получены уравнения пространственного движения, исследовались возможности автоматического управления равномерным горизонтальным движением шагающего аппарата с обеспечением устойчивости посредством выбора момента времени окончания шага и места постановки ноги в начале следующего шага.

В статье рассмотрена возможность управления аппаратом при движении по ступенькам, по наклонной поверхности и при повороте. Подъем или спуск по ступенькам отличается от движения по наклонной

поверхности лишь высотой места постановки ноги $y_л$. Управление ходьбой будем осуществлять по способу, аналогичному описанному в работе [3].

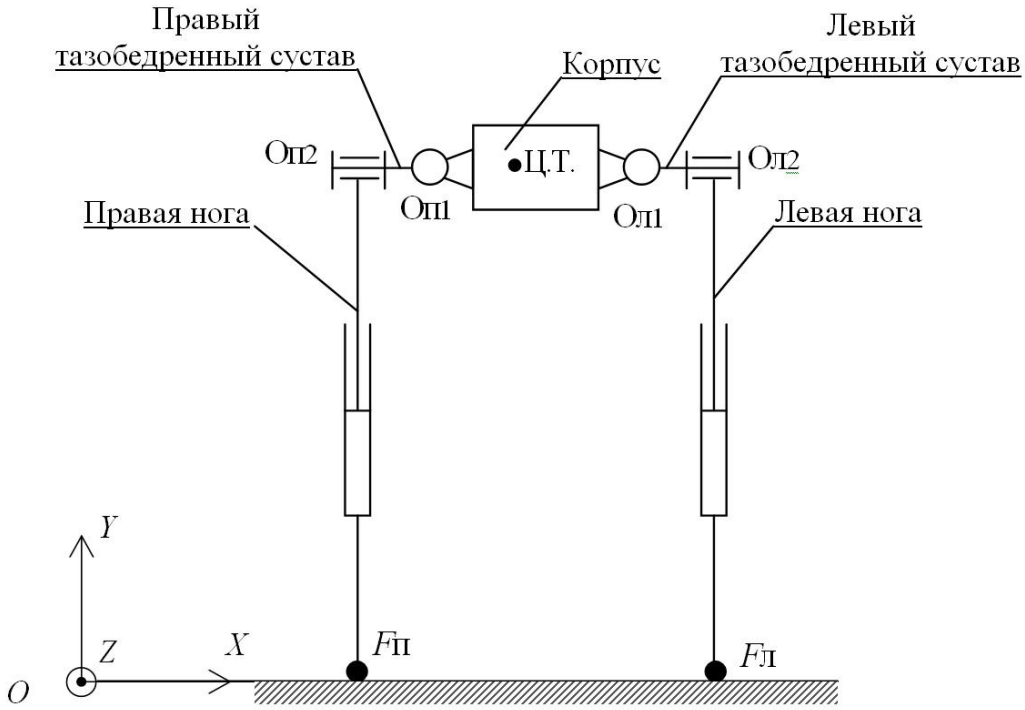


Рис. 1. Кинематическая схема шагающего аппарата

Примем ширину шагов постоянными $z_л = 0{,}25$ м. Момент окончания шага будем определять из условия равенства продольной скорости своему начальному значению.

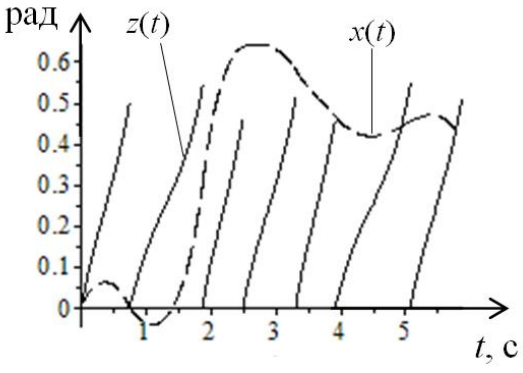


Рис. 2. Законы изменения продольной и поперечной координаты при подъеме и спуске со ступени.

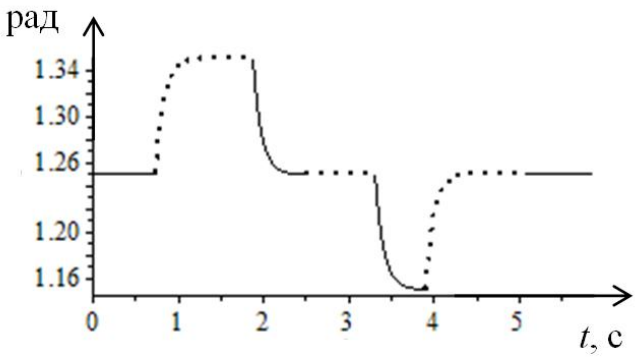


Рис. 3. Закон изменения высоты центра тяжести при подъеме и спуске со ступени.

При заданных начальных условиях и параметрах шагающего аппарата результаты численного решения системы уравнений движения, полученной в работе [2], для подъема на ступень высотой $y_л = 0{,}1$ м и при

спуске со ступени высотой $y_л = -0{,}1$ м будут иметь вид, показанный на рис. 2, 3 и 4.

Из рис. 3 видно, что подъем осуществляется на втором шаге, а спуск на пятом. Продолжительность ходьбы – семь шагов.

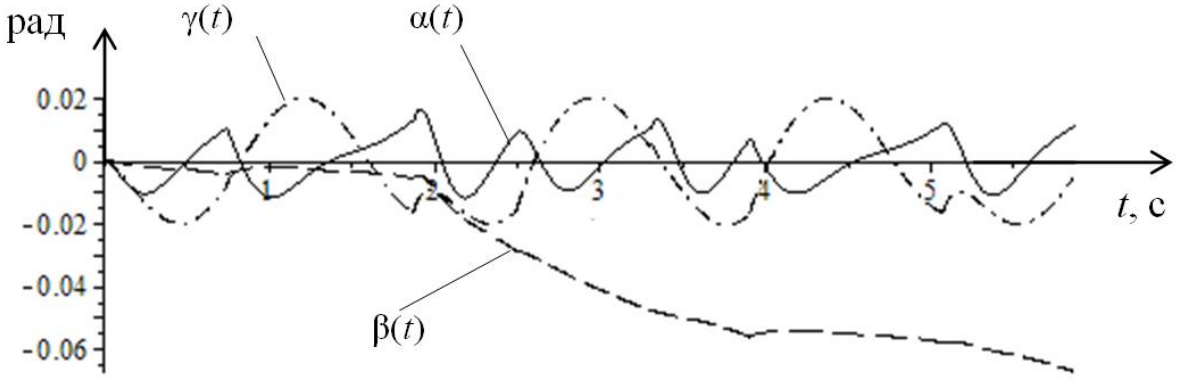


Рис. 4. Законы изменения углов конечных поворотов корпуса аппарата

Рассмотрим режим равномерного спуска по наклонной поверхности. Примем $y_л = 0, -0.01, -0.02, \ldots, -0{,}06$ м. Тогда численные решения системы уравнений движения будут иметь вид, представленный на рис. 5, 6 и 7.

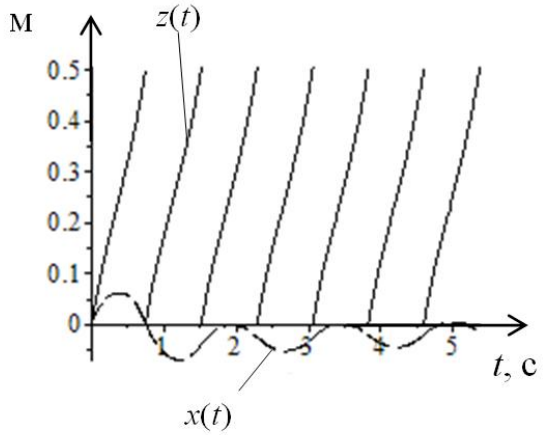


Рис. 5. Законы изменения продольной и поперечной координаты при движении по наклонной поверхности вниз.

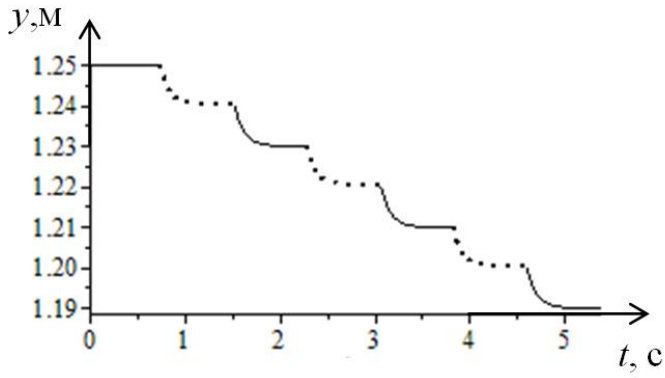


Рис. 6. Закон изменения высоты центра тяжести при движении по наклонной поверхности вниз.

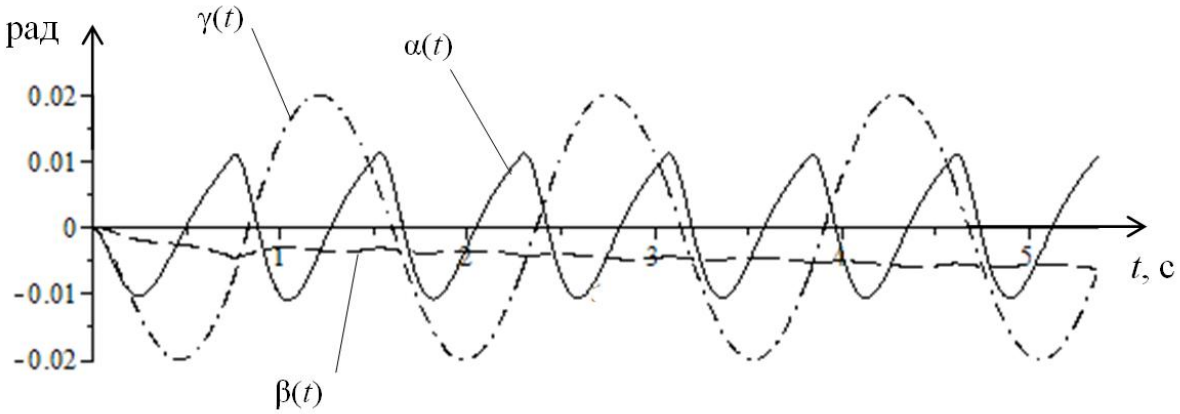


Рис. 7. Законы изменения углов конечных поворотов корпуса аппарата при движении по наклонной поверхности вниз

Рассмотрим случай управления системой при повороте на угол α_y влево (рис. 8).

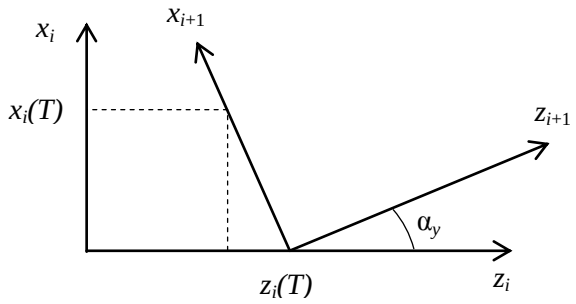


Рис. 8. Поворот системы *XiYiZi* на угол α_y.

Определим продольную $z_i(T)$ и поперечную $x_i(T)$ координаты Ц.Т. корпуса аппарата в момент времени окончания текущего шага T в новой повернутой (i+1)-ой системе координат. Матрица перехода к (i+1)-ой системе из i-ой системы координат, будет иметь следующий вид:

$$H_{i+1,i} = \left[\begin{array}{cccc} cos\,(\alpha_y) & 0 & -sin\,(\alpha_y) & (z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y))sin\,(\alpha_y) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ sin\,(\alpha_y) & 0 & cos\,(\alpha_y) & -(z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y))cos\,(\alpha_y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right].$$

В момент времени T, центр тяжести корпуса в системе i имеет координаты $Ri = \begin{bmatrix} x_i(T) \\ y_i(T) \\ z_i(T) \\ 1 \end{bmatrix}$, определим координаты Ц.Т. в системе (i+1):

$$R_{i+1} = H_{i+1,i} \cdot R_i =$$

$$= \begin{bmatrix} cos\,(\alpha_y) & 0 & -sin\,(\alpha_y) & (z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y))sin\,(\alpha_y) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ sin\,(\alpha_y) & 0 & cos\,(\alpha_y) & -(z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y))cos\,(\alpha_y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i(T) \\ y_i(T) \\ z_i(T) \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} x_i(T)\,cos(\alpha_y) - z_i(T)\,sin(\alpha_y) + z_i(T)\,sin(\alpha_y) + x_i(T)tg(\alpha_y)sin\,(\alpha_y) \\ y_i(T) \\ x_i(T)sin\,(\alpha_y) + z_i(T)\,cos(\alpha_y) - z_i(T)\,cos(\alpha_y) - x_i(T)tg(\alpha_y)cos\,(\alpha_y) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$=$$

$$= \begin{bmatrix} x_i(T)\,cos(\alpha_y) + x_i(T)\dfrac{sin^2\,(\alpha_y)}{cos(\alpha_y)} \\ y_i(T) \\ x_i(T)sin\,(\alpha_y) - x_i(T)\dfrac{sin(\alpha_y)}{cos\,(\alpha_y)}cos\,(\alpha_y) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{x_i(T)}{cos(\alpha_y)} \\ y_i(T) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

Следовательно, в системе (i+1) поперечная и продольная координаты Ц.Т. корпуса аппарата будут иметь вид:

$$x_{i+1} = \frac{x_i(T)}{cos(\alpha_y)}, \quad z_{i+1} = 0.$$

Аналогично запишем выражение для определения скорости Ц.Т. аппарата в системе (i+1):

$$V_{i+1} = A_{i+1,i} \cdot V_i =$$

$$= \begin{bmatrix} cos\,(\alpha_y) & 0 & -sin\,(\alpha_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\,(\alpha_y) & 0 & cos\,(\alpha_y) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_i(T) \\ \dot{y}_i(T) \\ \dot{z}_i(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_i(T)\,cos(\alpha_y) - \dot{z}_i(T)sin\,(\alpha_y) \\ \dot{y}_i(T) \\ \dot{x}_i(T)sin\,(\alpha_y) + \dot{z}_i(T)\,cos(\alpha_y) \end{bmatrix},$$

где $A_{i+1,i}$ – матрица направляющих косинусов, V_i- столбец проекций вектора скорости в момент времени T на оси i-ой системы. Следовательно, проекции поперечной и продольной скоростей в повернутой на угол α_y системе i+1 будут иметь следующий вид:

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i(T)\,cos(\alpha_y) - \dot{z}_i(T)sin\,(\alpha_y),\ \dot{z}_{i+1} = \dot{x}_i(T)sin\,(\alpha_y) + \dot{z}_i(T)\,cos(\alpha_y).$$

Таким образом, управление ходьбой при повороте осуществляется по формулам, полученным в [3], скорректированным с учетом поворота:

$$x_{л} = \frac{x_i(T) \cdot \delta}{2\,cos(\alpha_y)} + \frac{1}{k}\left(\dot{x}_i(T)\,cos(\alpha_y) - \dot{z}_i(T) si\,n(\alpha_y)\right),$$

где δ – коэффициент, обеспечивающий устойчивость в поперечном направлении, T – время окончания текущего шага; $k = \sqrt{g/L}$; L – высота центра тяжести; g – ускорение свободного падения.

Найдем координаты Ц.Т. корпуса аппарата в i-ой системе, пусть она совпадает с глобальной. Запишем матрицу перехода в глобальную систему из повернутой:

$$H_{i,i+1} = \left[\begin{array}{cccc} cos\,(\alpha_y) & 0 & sin\,(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sin\,(\alpha_y) & 0 & cos\,(\alpha_y) & z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right].$$

Столбец координат Ц.Т. в глобальной системе будет иметь вид:

$$R_i = H_{i,i+1} \cdot R_{i+1} =$$

$$= \left[\begin{array}{cccc} cos\,(\alpha_y) & 0 & sin\,(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sin\,(\alpha_y) & 0 & cos\,(\alpha_y) & z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} x_{i+1}\,cos(\alpha_y) + z_{i+1}\,sin(\alpha_y) \\ y_{i+1} \\ -x_{i+1}\,sin(\alpha_y) + z_{i+1}\,cos(\alpha_y) + z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y) \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Следовательно,

$$x_i = x_{i+1}\,cos(\alpha_y) + z_{i+1}\,sin(\alpha_y),$$

$$z_i = -x_{i+1}\,sin(\alpha_y) + z_{i+1}\,cos(\alpha_y) + z_i(T) + x_i(T)tg(\alpha_y).$$

При заданных начальных условиях и параметрах шагающего аппарата результаты численного решения системы уравнений движения, полученной в работе [2], на протяжении шести шагов при повороте на втором шаге на угол $\alpha_y = 0{,}3$ влево будут иметь вид, показанный на рис. 9, 10, 11.

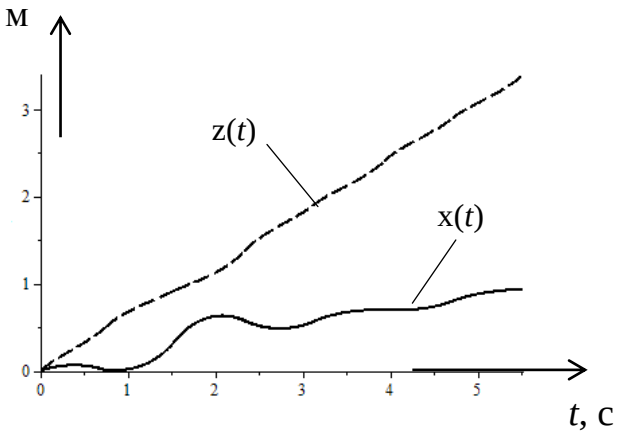


Рис. 9. Законы изменения продольной и поперечной координаты при повороте налево на втором шаге в глобальной системе

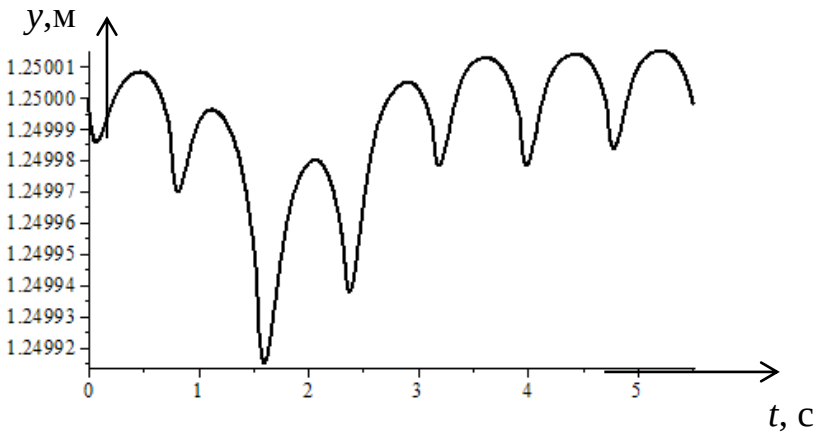


Рис. 10. Высота центра тяжести аппарата при ходьбе с поворотом налево на втором шаге

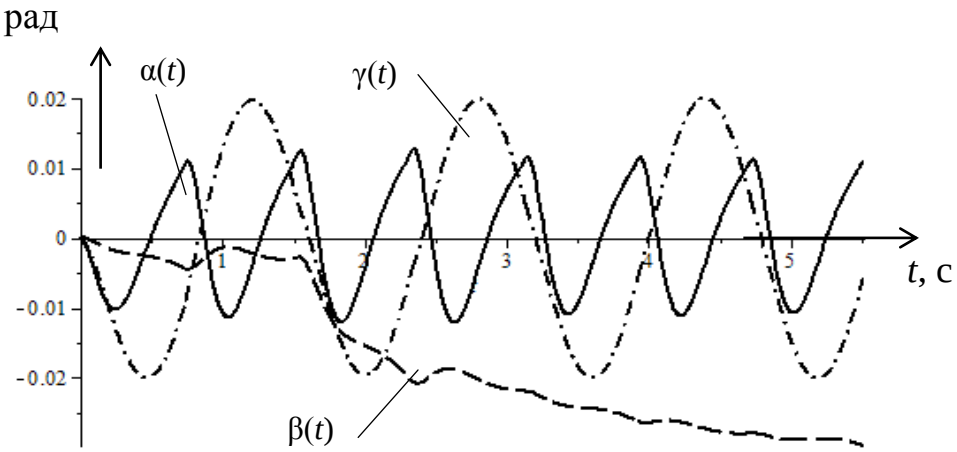


Рис. 11. Законы изменения углов конечных поворотов корпуса аппарата при повороте налево

Разрывность координаты z обусловлена параллельным переносом начала отсчета в конце каждого шага в точку x=0, y=0, z=$z(T)$. Высота центра тяжести стабилизируется приводами длин ног и при возмущениях второго порядка малости и идеальных регуляторах по расчетам получается практически постоянной.

В силу малости полученных углов конечных поворотов α, β и γ их вполне можно считать углами вращения вокруг осей x, y и z соответственно. Угол β в данной модели не регулируется и его малость на семи шагах была достигнута начальными условиями. Углы α и γ стабилизируются движущими моментами, приложенными к осям О2 и О1 соответственно. Управление величиной угла поворота вокруг вертикальной оси предложено реализовать с помощью навстречу направленных движущих моментов [3], приложенных к осям ОЛ2 и ОП2 во время двухопорной фазы ходьбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий В.В. Динамика двуногой ходьбы. – Изв. АН СССР, МТТ, 1975, № 3, с. 3-14;
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 Политехн. 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. Андриенко П.А., Козликин Д.П., Хисамов А.В., Хлебосолов И.О. О применении бесконтактных систем измерения в центробежных стендах. Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 623-630.
6. Петров Г.Н.Компьютерное моделирование механических систем в среде «Model Vision». Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. Т. 6. № 91. С. 239-244.

7. Теория механизмов и машин: учеб. пособие/А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н. Петров. -2-е изд., испр. и доп. -СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. -248 с.
8. S. Bertrand, O. Bruneau, F.B. Ouezdou, S. Alfayad, Closed-form solutions of inverse kinematic models for the control of a biped robot with 8 active degrees of freedom per leg, Mechanism and Machine Theory 03 (2012) 117-140.
9. V. Parenti-Castelli, S. Venanzi, Clearance influence analysis on mechanisms, Mechanism and Machine Theory 12 (2005) 1316-1329.
10. Andreas Pott, Andrés Kecskeméthy, Manfred Hiller, A simplified force-based method for the linearization and sensitivity analysis of complex manipulation systems, Mechanism and Machine Theory 11 (2007) 1445-1461.
11. Nicola Sancisi, Vincenzo Parenti-Castelli, A sequentially-defined stiffness model of the knee, Mechanism and Machine Theory 46 (2011) 1920-1928.
12. Tomomichi Sugihara, Simulated Regulator to Synthesize ZMP Manipulation and Foot Location for Autonomous Control of Biped Robots, Climbing and Walking Robots (2010) 201-211.

A.P.Borina, V.A. Tereshin

CONTROL BIPED WALKERS USING EQUATIONS OF THE INVERTED PENDULUM

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to control spatial movement of biped walker in different modes walk: up (down) the steps, movement on sloping ground up (down) and turning.

Key words: walking machines, movement control, dynamic stability.

REFERENCES

[1] Beletsky V.V. Dinamica dvunogoi hod`by. – Izv. AN SSSR, MTT, 1975, № 3, p. 3-14. (rus)
[2] Borina A.P., Tereshin V.A. Reshenie zadachi o prostranstvennom dvizhenii staticheski neustoichivogo shagaushego apparata. Sovremennoe mashinostroenie. Nauks i obrazovanie: materialy nauchno-prakticheskoi konferensii s mezhunarodnym uchastiem. 20 – 21 iunya 2013 goda, Sankt-Peterburg. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013, S. 631-641. (rus)

[3] Borina A.P., Tereshin V.A. Pryamolineinoe ravnomernoe dvizhenie antropomorfnogo robota. Sovremennoe mashinostroenie. Nauks i obrazovanie: materialy nauchno-prakticheskoi konferensii s mezhunarodnym uchastiem. Institut metallurgii, mashinostroeniya I transporta SPbGPU CH.1. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014, S. 160-162. (rus)
[4] Borina A.P., Tereshin V.A. Prostranstvennoe dvizhenie shagaushego apparata pod deistviem upravlaushih vozdeistvii so storony nogi. Sovremennoe mashinostroenie. Nauks i obrazovanie. 2012. № 2. S. 177-188. (rus)
[5] Andrienko P.A., Kozlikin D.P., Hisamov A.V., Hlebosolov I.O. O primenenii beskontaktnih system izmereniya v centrobezhnyh stendah. Sovremennoe mashinostroenie. Nauks i obrazovanie. 2013. № 3. S. 623-630.(rus)
[6] Petrov G.N., Komputernoe modelirovanie mehanicheskih system v srede «Model Vision». Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika i Telekomunikatsii. Upravlenie. 2009. T. 6. № 91. S. 239-244. (rus)
[7] Teoriya mehanizmov i mashin: ucheb. posobie/A.N. Evgrafov, M.Z. Kolovski, G.N. Petrov. -2-e izd., ispr. i dop. -SPb.: Izd-vo Politehn. Un-ta, 2009. -248 s. (rus)
[8] S. Bertrand, O. Bruneau, F.B. Ouezdou, S. Alfayad, Closed-form solutions of inverse kinematic models for the control of a biped robot with 8 active degrees of freedom per leg, Mechanism and Machine Theory 03 (2012) 117-140.
[9] V. Parenti-Castelli, S. Venanzi, Clearance influence analysis on mechanisms, Mechanism and Machine Theory 12 (2005) 1316-1329.
[10] Andreas Pott, Andrés Kecskeméthy, Manfred Hiller, A simplified force-based method for the linearization and sensitivity analysis of complex manipulation systems, Mechanism and Machine Theory 11 (2007) 1445-1461.
[11] Nicola Sancisi, Vincenzo Parenti-Castelli, A sequentially-defined stiffness model of the knee, Mechanism and Machine Theory 46 (2011) 1920-1928.
[12] Tomomichi Sugihara, Simulated Regulator to Synthesize ZMP Manipulation and Foot Location for Autonomous Control of Biped Robots, Climbing and Walking Robots (2010) 201-211.

УДК 621.01

В. П. Верховод

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ И СИНТЕЗ ПРЯМОЛИНЕЙНО-НАПРАВЛЯЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ В СИСТЕМЕ GEOGEBRA

Владимир Павлович Верховод, инженер-конструктор
ОАО ВСЗ
Россия, Выборг
Тел.: (812)201-44, E-mail: VerhovodVP@vsy.ru.

Аннотация

В работе показано использование программы GeoGebra в изучении кинематической геометрии плоских механизмов. Для иллюстрации технического применения кинематической геометрии рассмотрен синтез прямолинейно - направляющих механизмов.

Ключевые слова: кинематическая геометрия, синтез плоских механизмов, прямолинейно-направляющий механизм.

1. Введение

Кинематическая геометрия изучает геометрию кривых и поверхностей образующихся при движении плоских и пространственных фигур. Основы кинематической геометрии положений плоской фигуры в своей плоскости были заложены в исследованиях немецкого ученого Людвига Бурместера (1840-1927). Метод исследования движения звена как движения плоской фигуры оказался исключительно плодотворным в решении многих задач анализа и синтеза плоских шарнирных механизмов.

Одним из предшественников Бурместера в применении математических методов при исследовании плоских шарнирных механизмов был знамени-тый русский математик П. Л. Чебышев (1821-1894). Чебышев при анализе и синтезе шарнирных механизмов использовал созданный им математический аппарат наилучшего приближения функций, который нашел широкое применение во многих разделах математики, физики, теории электри-ческих цепей и т.д. Если Бурместер является основоположником геомет-рических методов синтеза механизмов, то Чебышев по праву считается ос-новоположником аналитических методов синтеза. Эти методы при реше-нии многих задач не исключают а дополняют друг друга.

Первым практическим примером применения аналитических и геометрических методов в синтезе механизмов явилось решение задачи создания прямолинейно-направляющих механизмов – прямил. Необходимость создания таких плоских шарнирных механизмов, преобразующих

круговое движение в прямолинейное возникла еще в период изобретения паровых машин. Механики и математики начали заниматься этой задачей после того как английский механик Джеймс Уатт (1736-1819) при своем усовершенствовании паровой машины Ньюкомена применил один из таких механизмов. Механизм Уатта выполнял прямолинейное движение приближенно, на некотором небольшом участке траектории. Стремление увеличить длину и точность воспроизведения прямолинейной траектории, привела к созданию большого разнообразия прямил - прямило Чебышева, прямило Гарта и т.д. Чебышев получил геометрические параметры своего механизма чисто аналитическим путем. Другие ученые применяли как аналитические методы расчета, так и геометрические построения.

Рассмотрим некоторые вопросы кинематической геометрии и покажем применение методов кинематической геометрии при синтезе прямолиней-но-направляющих механизмов.

Сначала кратко остановимся на основных принципах кинематической геометрии плоскопараллельного перемещения плоской фигуры (звена механизма) [1-6]. Все геометрические построения будут выполняться в интерактивной геометрической системе моделирования GeoGebra. Использование данной системы для изучения кинематической геометрии уже рассматривалось в работе [7]. Получить основные сведения о системе GeoGebra можно на сайте http://www.geogebra.org

2. Три положения подвижной плоскости и полюсный треугольник

Различают соседние (т.е. находящиеся на конечном расстоянии) и бесконечно близкие положения звена механизма (плоской фигуры). Не останавливаясь на элементарном случае двух соседних положений, рассмотрим три произвольных соседних положения плоской фигуры - S_1, S_2 и S_3 [рис. 1]. Плоская фигура будет изображать звено механизма AB в трех положениях - A_1B_1 , A_2B_2 и A_3B_3. Перемещение фигуры из положения S_1 в положение S_2 можно получить поворотом с центром вращения в точке P_{12}, из положения S_2 в положение S_3 - поворотом с центром вращения в точке P_{23} и из положения S_1 в положение S_3 – поворотом с центром вращения в точке P_{13}. Точки P_{12}, P_{23}, и P_{13} – так называемые полюса конечного перемещения, а треугольник построенный на этих точках – полюсный треугольник. На рисунке также показаны некоторые оси симметрии, например оси a_{23} и b_{23} перпендикулярны отрезкам A_2A_3 и B_2B_3 и делят их пополам.

Полюс P_{23} находится на пересечении данных осей симметрии. Аналогичным образом находятся положения полюсов P_{12} и P_{13} На рисунке также показаны углы $\phi_{12}/2$ и $\phi_{23}/2$ при вершинах полюсного треугольника. Эти углы, как и не показанный на рисунке угол $\phi_{13}/2$, связаны простой зависимостью с углами поворота фигуры из одного положения в другое.

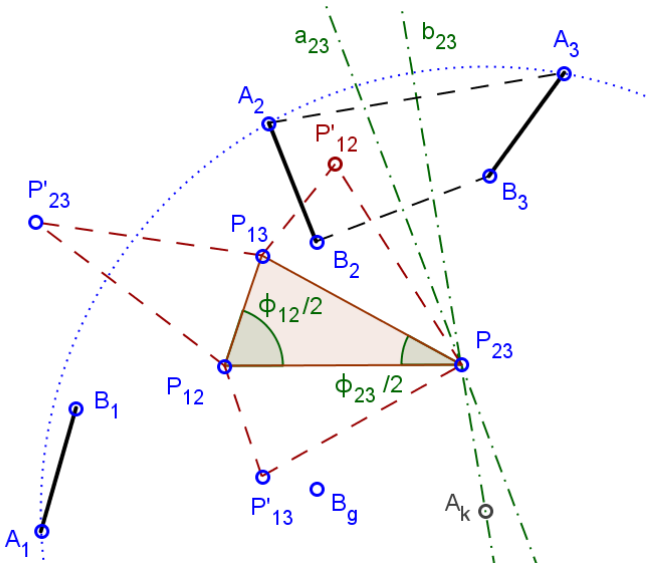


Рис. 1. Три положения звена механизма с полюсным треугольником

Для полюсного треугольника справедлива следующая теорема.

Теорема 1 о полюсном треугольнике. *Внутренние и, соответственно, внешние углы полюсного треугольника для трех соседних положений плоской фигуры равны половинам соответствующих углов вращения:*

$$\angle P_{13}P_{12}P_{23} = \frac{\phi_{12}}{2};\ \angle P_{12}P_{13}P_{23} = \frac{\phi_{13}}{2};\ \angle P_{12}P_{23}P_{13} = \frac{\phi_{23}}{2}$$

Приведем пример, иллюстрирующий важное свойства полюсного треугольника.

Пример. Задан полюсный треугольник, по выбранной точке A_1 в S_1 установить ее положения A_2 в S_2 и A_3 в S_3. Для этого, согласно теоремы о полюсном треугольнике, достаточно точку A_1 переместить вокруг полюсов P_{12} и P_{13} на углы ϕ_{12} и ϕ_{13}. Эти углы равны удвоенным значениям углов полюсного треугольника при вершинах P_{12} и P_{13}. Такое построение можно выполнить несколькими способами. Выбран следующий способ:

- зеркально отражая точку A_1 относительно стороны $P_{12}P_{13}$ полюсного треугольника, получаем так называемую основную точку A_g
- отражая основную точку A_g относительно других сторон полюсного треугольника получаем точки A_2 и A_3

Результаты данного построения, после редактирования свойств объектов (цвета и стиля точек и линий) представлены на рис. 2.

Из приведенного примера видно, что каждой точке подвижной плоскости соответствует единственная точка неподвижной в качестве центра вращения, переводящего подвижную точку через три заданных положения. Одно из свойств полюсного треугольника для трех положений звена играет также важную роль при изучении четырех и пяти положений звена механизма.

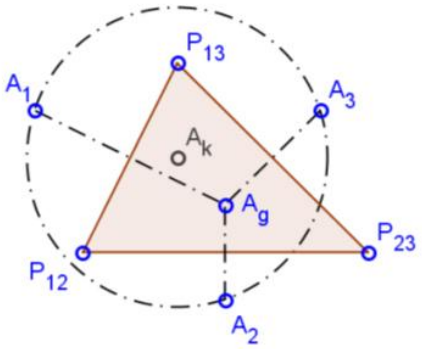


Рис. 2. По заданному полюсному треугольнику определение трех положений точки *A*

Прежде чем сформулировать для этого свойства соответствующую теорему, еще раз отметим, что основную точку A_g можно получить при зеркальном отражении точки A_1 относительно стороны P_{12} P_{13} полюсного треугольника. Отражая основную точку Ag относительно других сторон полюсного треугольника находим точки A_2 и A_3. Круг с центром в точке A_k проходит через соответствующие точки A_1, A_2 и A_3. Точку A_k называют точкой центра (нем: Mittelpunkt).

Пользуясь данными определениями сформулируем следующую теорему для отрезков соединяющих точки центров A_k и B_k.

Теорема 2 о полюсном треугольнике. *Соответствующие отрезки* A_1B_1 *и* A_kB_k *видны из каждого полюса* P_{12}, P_{13}, *а также из полюса* P_{23}^1 *либо под равными иглами, либо под углами, дополняющими друг друга до* $180°$ (рис. 3).

Данная теорема часто применяется при нахождении положений неподвижных шарниров, если известны положения подвижных шарниров и наоборот для определения подвижных шарниров если известны положения неподвижных

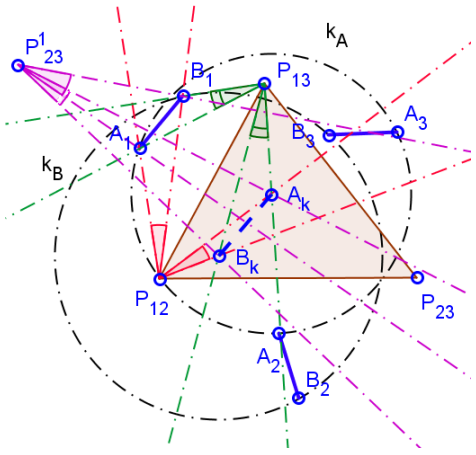


Рис. 3. Три положения звена: отрезки A_1B_1 и A_kB_k видны из полюсов P_{12}, P_{13} и P_{23}^1 под равными углами

3. Проектирование прямолинейно-направляющего мнханизма по трем положениям звена

Схема одной конструкции прямолинейно-направляющего механизма, представляющего собой шарнирный четырехзвенник, изображена на рис. 4.

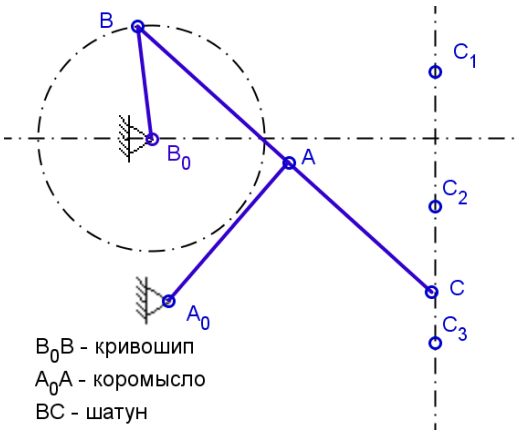


Рис. 4. Схема прямолинейно-направляющего мнханизма

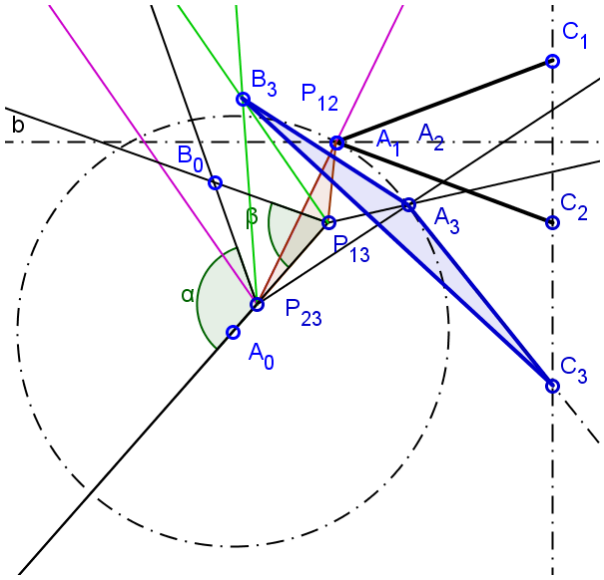


Рис. 5. Нахождение точки *B* и треугольника *ABC* в 3-ом положении звена механизма

Точка *C*, связанная со звеном *AC* (шатуном) шарнирного четырехзвенника, должна двигаться таким образом, чтобы три ее положения C_1, C_2, и C_3 лежали на одной прямой. Примем некоторых упрощающие предположения о положениях звена *AC*, это позволит выполнить все необходимые геометрические построения достаточно простым образом (рис. 5).

Пусть отрезки $C_1C_2=C_2C_3$, проведем серединный перпендикуляр *b* через отрезок C_1C_2, и на нем выберем две совпадающие точки A_1 и A_2. Таким образом, примем, что точка *A* шатуна *AC* в двух положениях занимает одно и тоже положение.

Если произвольно задать положение опорного шарнира A_0, то положение точки A_3 определится однозначно. Зададимся также предварительно положением опорного шарнира B_0. Три положения точки B – B_1, B_2 и B_3 будут лежать на окружности с центром в этой точке. Требуется найти положение подвижного шарнира B в одном из этих положений. Найдем уже известным способом полюсы и построим полюсный треугольник $P_{12}P_{23}P_{13}$.

Будем искать положение точки B например в третьем положении звена механизма, т.е. B_3. По теореме 2 о полюсном треугольнике отрезки A_3B_3 *и* A_0B_0 видны из полюсов P_{23} и P_{13}, либо под равными углами, либо под углами, дополняющими друг друга до 180°.

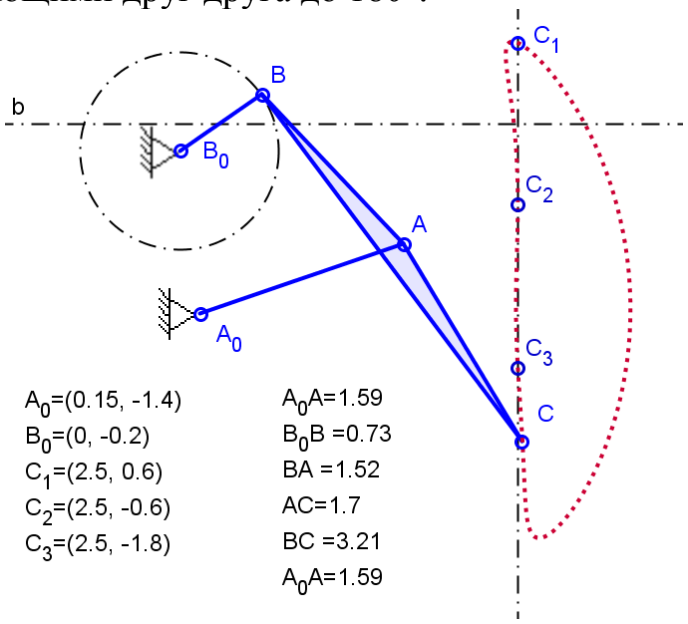


Рис. 6. Схема спроектированного прямолинейно-направляющего механизма. Показана шатунная кривая описываемая точкой C.

Таким образом, соединяя лучами P_{23} с A_0 и B_0 и A_3 строим на стороне P_{23} A_3 угол равный углу $\alpha = \angle B_0 P_{23} A_0$ Аналогичное построение выполним для полюса P_{13}, в результате пересечения данных лучей получим точку B_3 и построим треугольник $A_3B_3C_3$ в плоскости движения шатуна. Радиус круга проходящего через точки B_1, B_2 и B_3 т.е. длина кривошипа определится длиной отрезка B_0B_3.

После нахождения треугольника $A_3B_3C_3$ звена выполним дальнейшие построения и в результате получим следующий прямолинейно-направляющий механизм (рис. 6).

4. Полюсная кривая для четырех положений звена механизма

Рассмотрев теорию трех положений звена механизма перейдем к изучению теории четырех положений. Ранее мы видели, что для трех положений плоской фигуры полюсы P_{12}, P_{13}, и P_{23} можно выбрать совершенно

произвольно – этим определялись углы поворота плоской фигуры и полюсный треугольник. Если задано четыре положения плоской фигуры S_1, S_2 , S_3 и S_4 то они определяют шесть полюсов

$$P_{12},\ P_{13},\ P_{14},\ P_{23},\ P_{24},\ P_{34} \qquad (1)$$

и четыре полюсных треугольника

$$P_{12}P_{23}P_{13};\quad P_{12}P_{24}P_{14};\ P_{13}P_{34}P_{14};\quad P_{23}P_{34}P_{24} \qquad (2)$$

Шесть полюсов можно сгруппировать в три пары так называемых противополюсов (не имеющих одинаковых цифр в индексах)

$$P_{12}\ \text{и}\ P_{34},\ P_{13}\ \text{и}\ P_{24},\ P_{14}\ \text{и}\ P_{23} \qquad (3)$$

Четырехугольник, образованный двумя парами противополюсов, назовем противополюсным четырехугольником.

В случае четырех положений звена имеем три противополюсных четырехугольника

$$(P_{13},P_{24};P_{14},P_{23}),\quad (P_{12},P_{34};P_{13},P_{24}),\quad (P_{14},P_{23};P_{12},P_{34}) \qquad (4)$$

Как показал Бурместер [1,2], из шести полюсов можно выбрать произвольно две пары противополюсов, пятый полюс может быть выбран только на так называемой полюсной кривой проходящей через четыре выбранных противополюса, после этого положение шестого полюса будет полностью определено.

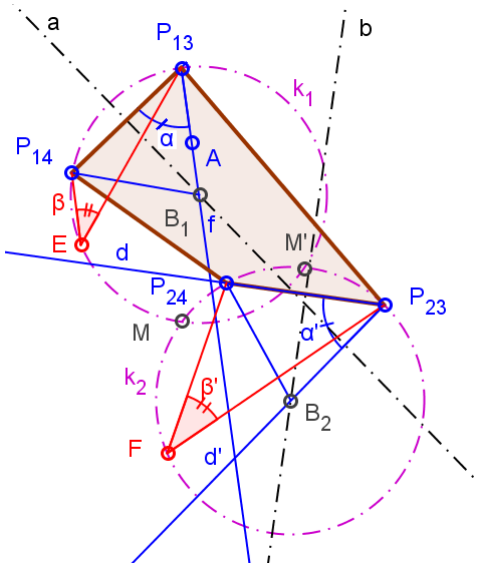


Рис. 7. Противополюсный четырехугольник и точки M и M' в пересечения кругов k_1 и k_2

Для полюсной кривой справедлива следующая теорема

Теорема. *Полюсная кривая является геометрическим местом всех тех точек, из которых противоположные стороны противополюсного четырехугольника видны под равными углами или углами, дополняющими друг друга до 180°.*

Полюсную кривую построим, воспользовавшись этой теоремой.

Возьмем за исходный пункт построения противополюсный четырехугольник $P_{13}P_{14}P_{24}P_{23}$. Проведем серединные перпендикуляры через стороны $P_{13}P_{14}$ и $P_{23}P_{24}$. (рис. 7). Произвольно выберем точку A и проведем луч f через точку A и P_{13}, проведем также луч d через полюса P_{23} и P_{24}. Обозначим угол $\angle P_{14}P_{13}f$ через α и повернем луч d вокруг полюса P_{23} на угол $\alpha = \alpha'$. Найдем точки пересечения лучей f и d с серединными перпендикулярами – точки B_1 и B_2. Проведем окружности k_1 и k_2 с центрами в точках B_1 и B_2.Круг k_1 проходит через полюса P_{13} и P_{14}, а круг k_2 - через полюса P_{24} и P_{23}.

Если взять на окружности k_1в любом месте точку E, а на окружности k_2 в любом месте точку F, то углы под которыми видны стороны $P_{13}P_{14}$ и $P_{23}P_{24}$ противополюсного четырехугольника равны: $\beta = \beta'$.

Отсюда следует, что точки M и M′ пересечения кругов k_1 и k_2 лежат на полюсной кривой.

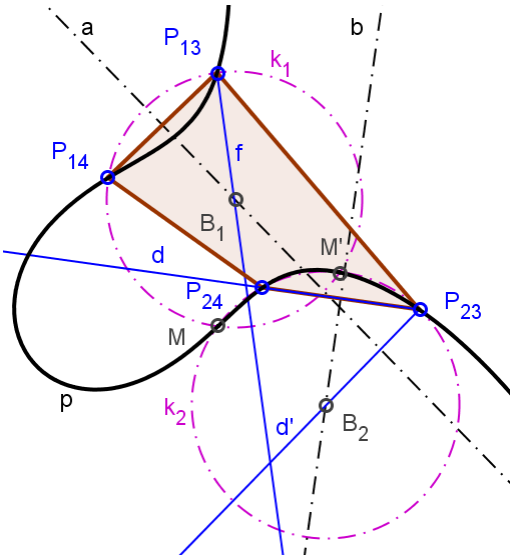


Рис. 8. Полюсная кривая *p*, определяемая противополюсным четырехугольником $P_{13}P_{14}P_{24}P_{23}$

Полюсную кривую (рис. 8) в результате следующих команд:

Locus[M,A]

Locus[M′,A]

При другом расположении полюсов полюсная кривая p может распасться на две кривые – p_1 и p_2 (рис. 9). Полюсная кривая относится к так на-

зываемым фокальным кривым [8-10]. Фокальные кривые могут быть получены как некоторые сечения конуса второго порядка.

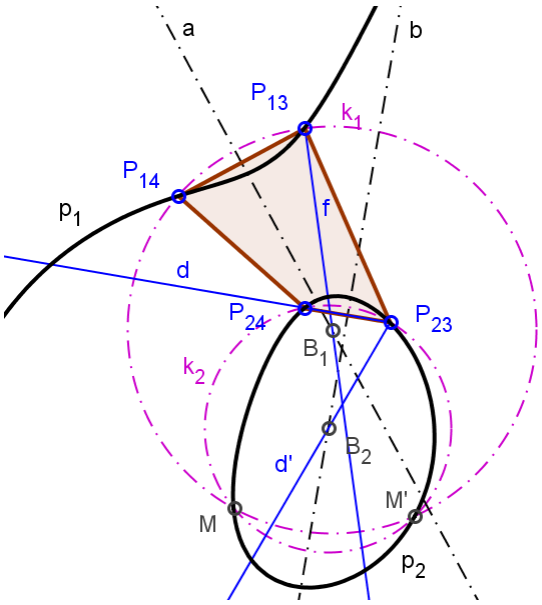


Рис. 9. Полюсная кривая p, определяемая противополюсным четырехугольником $P_{13}P_{14}P_{24}P_{23}$ распалась на две кривые- p_1 и p_2.

5. Кривая центров и кривая круговых точек

Полюсная кривая определяет возможное расположение полюсов для четырех положений плоского механизма. Следует также рассмотреть, как будут располагаться на плоскости центры шарниров механизма. Для решения этой задачи Бурместер [1,2] ввел следующие понятия: кривая круговых точек (Kreispunktcurve) и кривая центров (Mittelpunktcurve). Точка A_1 плоской фигуры S_1 называется круговой, если ее положения A_2, A_3 и A_4 лежат на одной окружности. Геометрическое место круговых точек A_1 в S_1 называется кривой круговых точек, а геометрическое место центров M тех окружностей, на которых лежат четыре положения круговой точки, называется кривой центров. Кривая круговых точек лежит в подвижной плоскости, а кривая центров – в неподвижной, относительно которой движется плоская фигура (звено механизма).

Между точками кривой центров m и кривой круговых точек k имеется взаимно однозначное соответствие, и с точки зрения практических приложений достаточно знать свойства одной из этих кривых. Ниже при решении задач синтеза механизмов мы будем использовать только кривую центров.

6. Применение кривой центров для синтеза прямолинейно-направляющего механизма по четырем положениям звена

В качестве примера применения кривой центров вернемся к синтезу прямолинейно-направляющего механизма. В разделе 3 мы рассмотрели синтез по трем положениям звена, теперь сделаем это для четырех положений, оставив прежними следующие условия:

а) точка С, связанная с шатуном шарнирного четырехзвенника, должна двигаться так, чтобы четыре ее положения C_1, C_2, C_3, и C_4 лежали на одной прямой.

б) точка А шатуна в двух положениях A_1 и A_2 должна занимать совпадающие позиции.

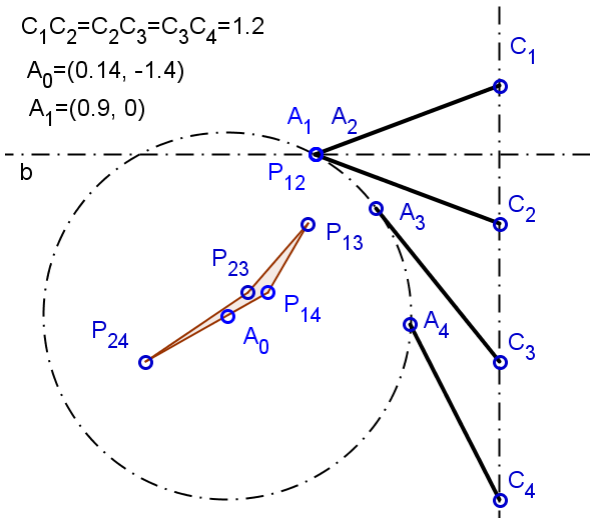


Рис. 10. Четыре положения шатуна прямолинейно-направляющего механизма и противополюсный четырехугольник

По прежнему примем равенство отрезков $C_1C_2=C_2C_3=C_3C_4$. Проведем серединный перпендикуляр b через отрезок C_1C_2 и на нем выберем две совпадающие точки A_1 и A_2, Если произвольно задать положение опорного шарнира A_0, то положение точек A_3 и A_4 определится однозначно. Требуется найти положение опорного шарнира B_0, который должен лежать на кривой центров.

Найдем уже известным способом полюсы и возьмем за основу построения кривой центров противополюсный четырехугольник $P_{13}P_{14}P_{24}P_{23}$ (рис. 10). Кривая центров полученная в результате построения, проходит через шесть полюсов и точку A_0 опорного шарнира (рис. 11).

Произвольно выберем на кривой центров точку B_0, это будет положение неподвижного шарнира кривошипа. Четыре положения точки В – B_1, B_2, B_3 и B_4 будут лежать на окружности с центром в этой точке. Геометрически легче всего найти положение точки В во втором положении звена механизма; по теореме 2 из раздела 2 отрезки A_2B_2 и A_0B_0 видны из полюсов P_{23} и P_{24}, либо под равными углами, либо под углами, дополняющими друг друга до 180° (рис. 12).

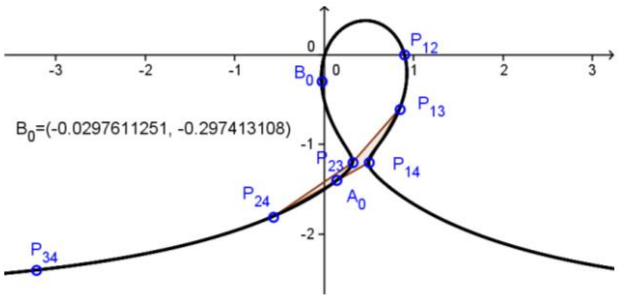


Рис. 11. Кривая центров для четырех положений прямолинейно-направляющего механизма Положение точки B_0 на кривой выбрано произвольно.

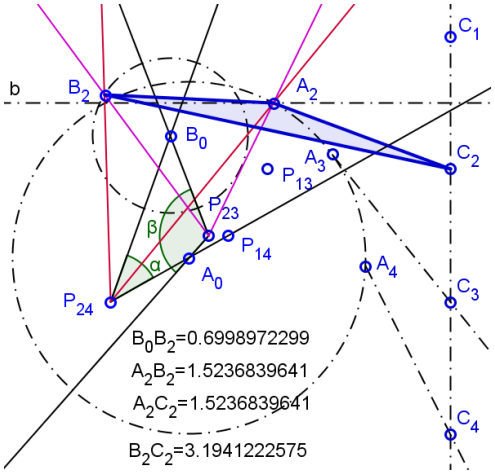


Рис. 12. Нахождение точки B и треугольника ABC во 2-ом положении звена механизма

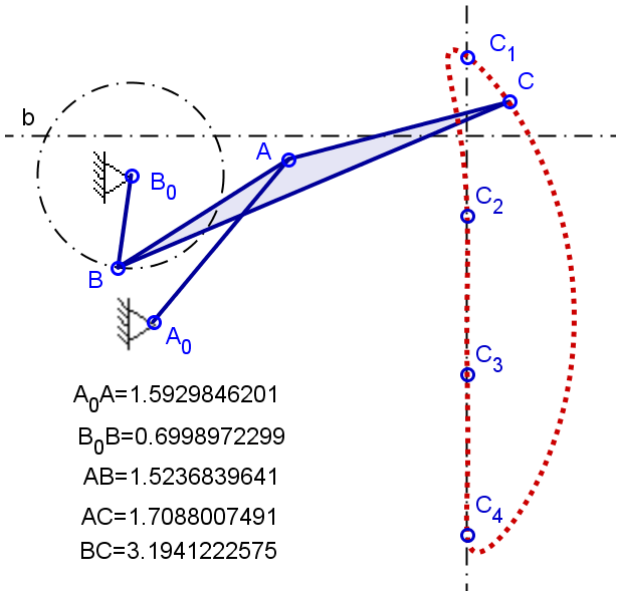


Рис. 13. Прямолинейно-направляющий механизм и его шатунная кривая

Таким образом, соединяя лучами P_{24} с A_0 и B_0 и A_2, строим на стороне P_{24} A_2 угол, равный углу $\alpha = \angle B_0 P_{24} A_0$. Аналогичное построение выполним для полюса P_{23}, в результате пересечения соответствующих лучей получим точку B_2 и построим треугольник $A_2B_2C_2$ в шатунной плоскости. Радиус круга проходящего через точки B_1, B_2, B_3 и B_4 т.е. длина кривошипа определится длиной отрезка A_2B_2.После построения треугольника $A_2B_2C_2$ и определения длины кривошипа выполним дальнейшие построения и в результате получим следующий прямолинейно-направляющий механизм (рис. 13) Меняя положение точки B_0 на кривой центров можно получить механизм с более благоприятными для практики параметрами угла передачи, длин звеньев и т.д.

Заключение

В данной работе показано применение системы GeoGebra для решения задач кинематической геометрии и синтеза прямолинейно-направляющих механизмов при заданных трех и четырех конечно удаленных положениях звена. На практике, при проектировании, часто бывает достаточно знать не более четырех положений звена механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burmester L. Über die Geradfuhrung durch das Kurbelgetriebe Civilingenieur. 1877. B.23 S. 227-250 und S.319-342
2. Burmester L. Lehrbuch der Kinematik, Verlag Von Arthur Felix, Leipzig, Germany,1888.
3. Müller R. Einfürung in die theoretische Kinematik, Berlin, Springer, 1932.
4. Бейер Р. Кинематический синтез механизмов. Киев. Машгиз, 1959.- 318с.
5. Лихтенхельдт В. Синтез механизмов. – М.: Наука 1964 г., 228 с.
6. Артоболевский И.И., Левитский Н.И., Черкудинов С.А., Синтез плоских механизмов. – М.: ФМ. 1959.- 1084с.
7. Верховод В.П. Изучение кинематической геометрии плоских механизмов в системе GeoGebra. //Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы третьей международной научно-практической конференции 20-21 июня 2013 года. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 659-669.
8. Геронимус Я.Л, Геометрический аппарат теории синтеза плоских механизмов. – М.: ФМ. 1962. - 400 с.
9. Hilton H. Plane algebraic curves. Oxford, The Clarendon Press, London, 1920, 388 pp.
10. Salmon G. Analytische Geometrie der Kegelschnitte, Druck und Verlag Von Teubner, Leipzig und Berlin, Germany, 1915.

V. P. Verhovod

KINEMATIC GEOMETRY AND SYNTHESIS OF STRAIGHT-LINE LINKAGE MECHANISM IN GEOGEBRA

Vyborg, Shipyard, Russia.

Abstract

The article shows how to use GeoGebra program to study the kinematic geometry of planar mechanisms. To illustrate the technical application of the kinematic geometry of the considered synthesis of straight-line linkages mechanisms.

Key words: kinematic geometry, synthesis of planar mechanisms, straight-line linkage mechanis.

REFERENCES

[1] Burmester L. Über die Geradfuhrung durch das Kurbelgetriebe Civilingenieur. 1877. B.23 S. 227-250 und S.319-342
[2] Burmester L. Lehrbuch der Kinematik, Verlag Von Arthur Felix, Leipzig, Germany,1888.
[3] Müller R. Einfürung in die theoretische Kinematik, Berlin, Springer, 1932.
[4] Bejer R. Kinematicheskij sintez mekhanizmov. Kiev. Mashgiz, 1959.- 318 p. (rus.)
[5] Lichtencheldt W. Sintez mekhanizmov. – M.: Nauka 1964 г., 228 p. (rus.)
[6] Artobolevskij I.I., Levitskij N.I., Cherkudinov S.A. Sintez ploskikh mekhanizmov. - M.: Fm. 1959.- 1084 p. (rus.)
[7] Verkhovod V.P. Izuchenie kinematicheskoj geometrii ploskikh mekhanizmov v sisteme GeoGebra. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka I Obrazovanie. Materialy 3-ej mezd konf. 20-21 iuny 2013 gd Izd-vo SpbGPU 2013 p. 659-669. (rus.)
[8] Geronimus Ya.L., Geometricheskij apparat teorii sinteza ploskikh mekhanizmov. - M.: Fm. 1962.- 400 p. (rus.)
[9] Hilton H. Plane algebraic curves. Oxford, The Clarendon Press, London, 1920, 388 pp.
[10] Salmon G. Analytische Geometrie der Kegelschnitte, Druck und Verlag Von Teubner, Leipzig und Berlin, Germany, 1915.

УДК 621.865.8

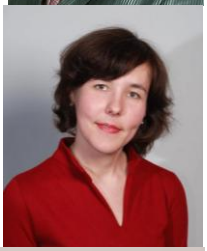
В.М.Герасун[1], В.В.Жога[2], И.А.Несмиянов[3],
Н.С.Воробьёва[4], В.В.Дяшкин-Титов[5]

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА*

[1]Владимир Морисович Герасун, д.т.н., профессор
Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: Gerasun@ro.ru.

[2]Виктор Викторович Жога, д.ф-м.н., профессор
Волгоградский государственный технический университет
Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)24-80-99, E-mail: Zhoga@vstu.ru.

[3]Иван Алексеевич Несмиянов, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)41-12-39, E-mail: ivan_nesmiyanov@mail.ru.



[4]Наталья Сергеевна Воробьёва, к.т.н., доцент
Волгоградский государственный аграрный университет
Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: vorobva@inbox.ru.

[5]Виктор Владимирович Дяшкин-Титов, аспирант,
Волгоградский государственный аграрный университет, Россия, г. Волгоград
Тел.: (8442)41-18-49, E-mail: c_43.52.00@mail.ru.

Аннотация

Получены зависимости, позволяющие определить усилия в приводных звеньях манипулятора-трипода при статических режимах его работы.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-08-00387 и №12-08-00301-а

Представлены зависимости усилий в звеньях манипулятора при изменении длины первого звена и разных углах наклона поворотного основания.

Ключевые слова: манипулятор, механизм параллельной структуры, силовой анализ.

Основным направлением использования механизмов параллельной структуры является машиностроение, где на их базе создаются испытательные стенды, тренажеры, упаковочное и металлорежущее оборудование [1,7]. Однако практически отсутствуют исследования, посвященные манипуляторам параллельной структуры, устанавливаемым на мобильные роботы. Такие робототехнические комплексы предназначены для выполнения различных технологических операций при ликвидации аварий природного и техногенного характера, а также автоматизации трудоемких процессов в сельскохозяйственном производстве.

Конструкция манипулятора – трипода с поворотным основанием, устанавливаемая на мобильных роботах представлена на рис. 1. Основу манипулятора составляет пространственный приводной трёхстержневой механизм в виде треугольной пирамиды с управляемыми звеньями переменной длины в качестве исполнительных звеньев [4]. Механизм содержит три звена 2, 3, 4, концы которых закреплены с помощью специальных двухподвижных шарниров на поворотном основании 1, что позволяет изменять геометрию механизма, а следовательно зону обслуживания. Противоположные концы звеньев соединены специальным шарнирным узлом 6, обеспечивающим пересечение геометрических осей этих звеньев в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов от внешних нагрузок. В результате образуется пространственная структура повышенной жёсткости с высокими динамическими характеристиками. Поворотное основание 1 имеет возможность поворачиваться за счёт звена переменной длины 5, причём шарниры его крепления на раме 7 могут перемещаться, что даёт возможность изменять зону обслуживания манипулятора в требуемом диапазоне.

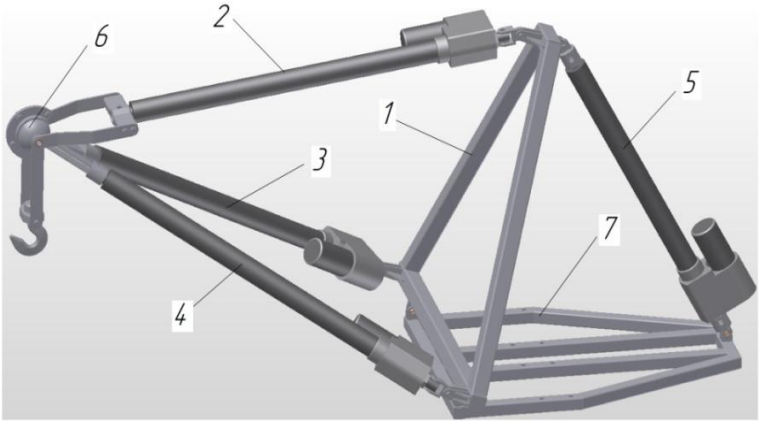


Рис. 1. Конструкция манипулятора – трипода

Отмеченное ранее разнообразие условий работы, требует индивидуального подхода к созданию таких манипуляторов, однако вопросы их теории разработаны недостаточно [2,3,10]. Поэтому исследования, посвященные выбору рациональных геометрических, кинематических и силовых параметров предлагаемой конструкции манипулятора, являются актуальными.

Для определения параметров манипулятора необходима информация о характере изменения нагрузок на его элементы при перемещении исполнительного устройства в объеме зоны обслуживания [5,6]. Кроме того, при построении зоны обслуживания манипулятора требуется предварительное исследование особых положений, при которых резко возрастают функции аналогов скоростей и ускорений исполнительного устройства при одновременном увеличении нагрузок на элементы, что приводит к переходу механизма в мертвое положение [9]. Причем анализ только геометрических параметров не дает полной информации о работоспособности манипулятора, так как не учитывает зазоры в соединениях элементов, их жесткость, точность изготовления кинематических пар.

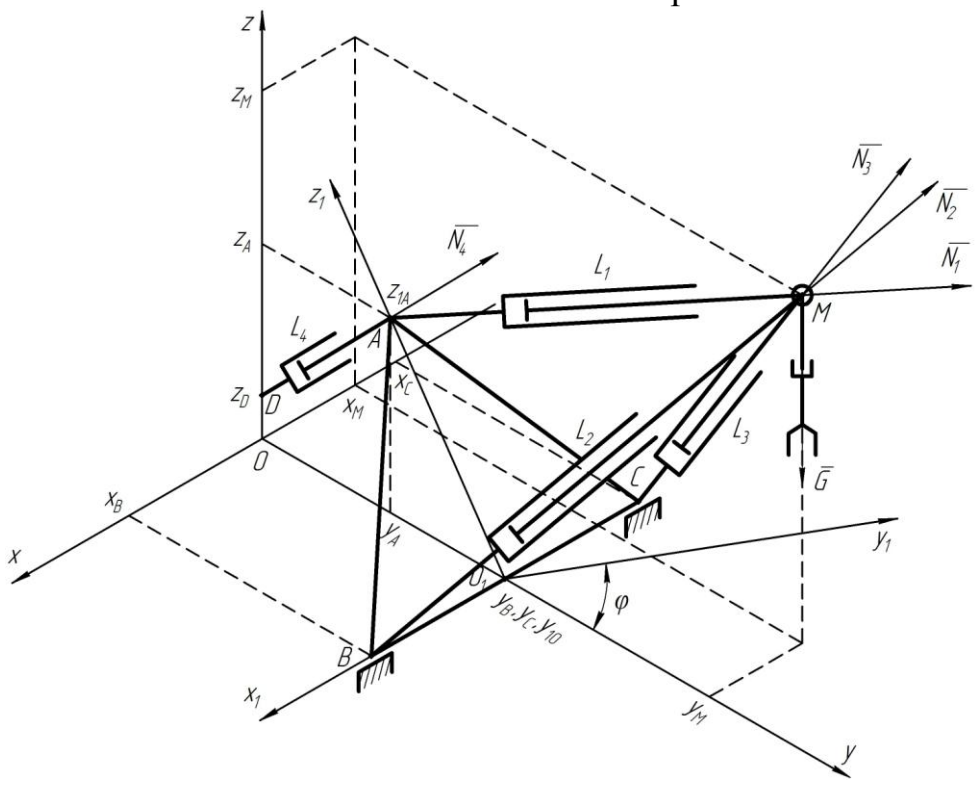


Рис. 2. Расчётная схема манипулятора – трипода

Нагрузки, действующие на звенья манипулятора, зависят от положения грузозахватного устройства (т. *M*). Определяются они из условия его равновесия, под действием пространственной системы сходящихся сил реакций $\overline{N_1}, \overline{N_2}, \overline{N_3}$ звеньев манипулятора и усилия, приложенного к рабоче-

му органу G. Усилие $\overline{N_4}$ в звене L_4 определяется из условия равновесия точки A [8,11].

В качестве обобщенных координат манипулятора принимаются декартовые координаты схвата в абсолютной системе координат $x(t), y(t), z(t)$ и угол $\varphi(t)$ наклона основания манипулятора (рис. 2).

Уравнения связей между обобщенными координатами, длинами звеньев $L_1(t)$, $L_2(t)$, $L_3(t)$, $L_4(t)$ и координатами x_B, y_B их точек крепления имеют вид

$$f_1 = \sqrt{x^2 + (y - y_B + O_1A \cdot \sin\varphi)^2 + (z - O_1A \cdot \cos\varphi)^2} - L_1(t) = 0,$$
$$f_2 = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + z^2} - L_2(t) = 0,$$
$$f_3 = \sqrt{(x + x_B)^2 + (y - y_B)^2 + z^2} - L_3(t) = 0,$$
$$f_4 = \sqrt{(y_B - O_1A \cdot \sin\varphi)^2 + (O_1A \cdot \cos\varphi - z_D)^2} - L_4(t) = 0, \qquad (1)$$

где O_1A, z_D - геометрические параметры основания манипулятора (рис. 1).

Уравнения равновесия точки M, полученные из принципа возможных перемещений в проекциях на оси неподвижной системы координат имеют вид

$$N_1 \frac{x}{L_1} + N_2 \frac{x - x_B}{L_2} + N_3 \frac{x + x_B}{L_3} = 0,$$
$$N_1 \frac{y + O_1A \cdot \sin\varphi - y_B}{L_1} + N_2 \frac{y - y_B}{L_2} + N_3 \frac{y - y_B}{L_3} = 0, \qquad (2)$$
$$N_1 \frac{z - O_1A \cdot \cos\varphi}{L_1} + N_2 \frac{z}{L_2} + N_3 \frac{z}{L_3} - G = 0.$$

А уравнение равновесия точки А в проекции на касательную к её траектории

$$N_1 \frac{(y - y_{\mathbf{B}}) \cdot \cos\varphi + z \cdot \sin\varphi}{L_1} + N_4 \frac{z_D \cdot \sin\varphi - y_{\mathbf{B}} \cdot \cos\varphi}{L_4} = 0. \qquad (3)$$

где N_k, $k = 1,2,3,4$ - усилия в звеньях манипулятора.

На рис. 3-8 представлены графики изменения усилий в звеньях манипулятора.

Расчет усилий производился при предварительно выдвинутом штоке третьего звена и задвинутом штоке второго звена. Затем изменялась длина первого звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и угол наклона поворотного основания $-60° \le \varphi \le 60°$. Поэтому параметр $\xi_1 = L_1 / L_{10}$, изменялся в пределах от 1 до 1,7 необходимых для сохранения геометрической неизменяемости.

Из анализа графиков видно, что усилия в звеньях манипулятора при работе могут изменять знак, т.е. совершается переход от растяжения к сжа-

тию или от сжатия к растяжению. Особенно это проявляется при углах наклона поворотного основания $\varphi > 30°$.

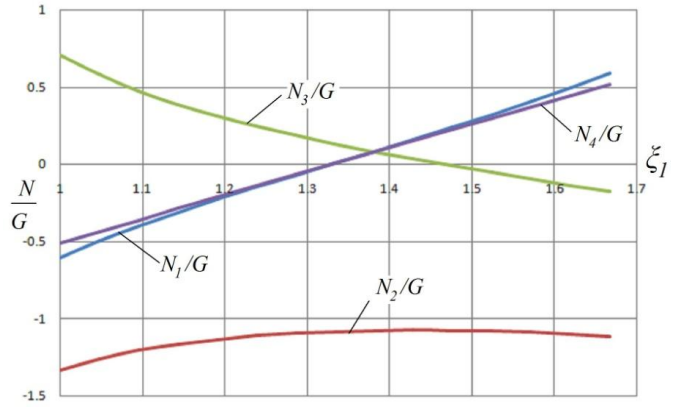


Рис. 3. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\min}, L_{3\max}, \varphi = 60°$

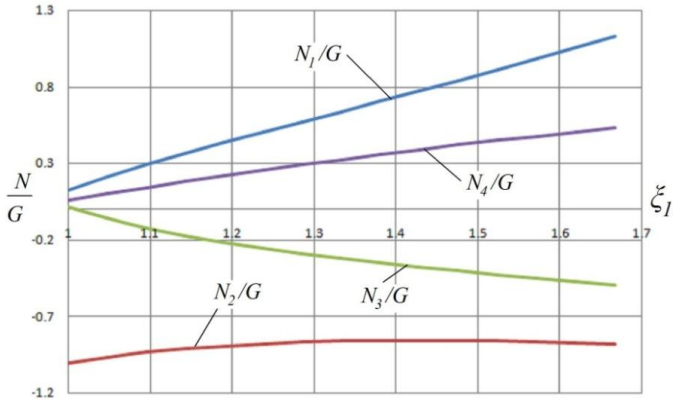


Рис. 4. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\min}, L_{3\max}, \varphi = 30°$

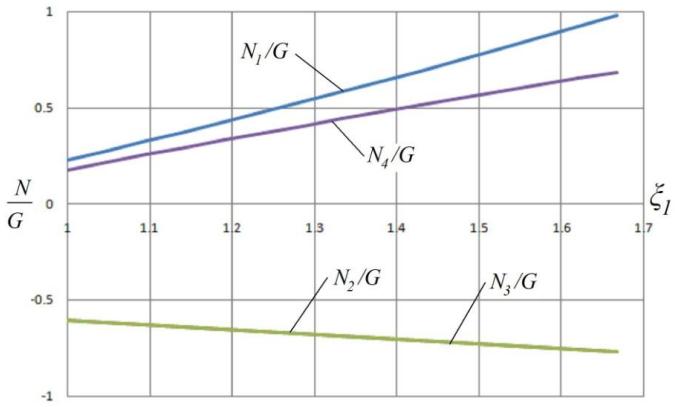


Рис. 5. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\max}, L_{3\max}, \varphi = 30°$

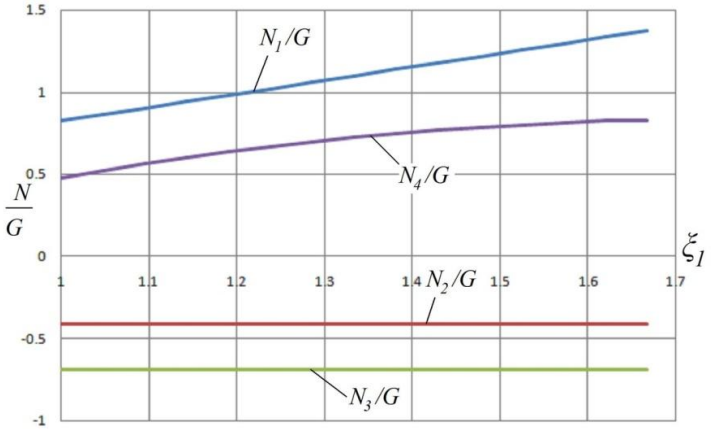


Рис. 6. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\min}, L_{3\max}, \varphi = 0°$

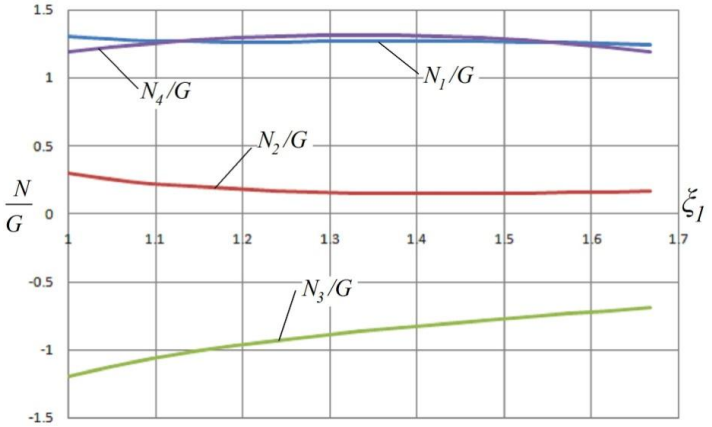


Рис. 7. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\min}, L_{3\max}, \varphi = -30°$

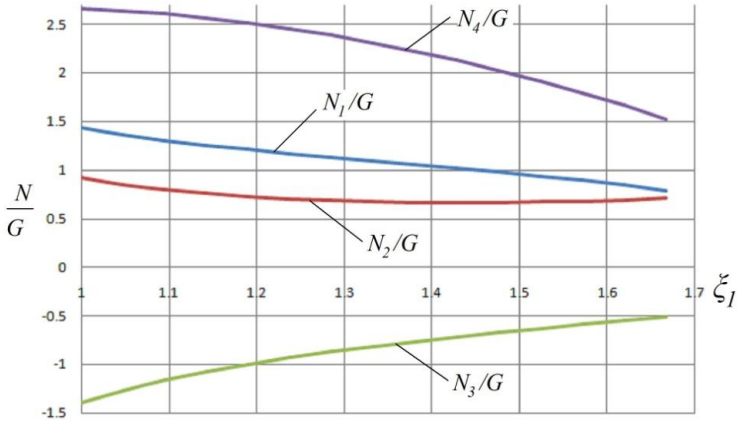


Рис. 8. Изменение усилий в звеньях манипулятора при изменении длины звена $L_{1\min} \le L_1 \le L_{1\max}$ и $L_{2\min}, L_{3\max}, \varphi = -60°$

Полученные результаты о распределении силового потока необходимо учитывать при формировании алгоритмов управления движением исполнительных устройств, а также используются при расчетах на прочность

металлоконструкции манипулятора. Проведенные расчеты показали, что наиболее нагруженными звеньями механизма манипулятора являются звенья L_1 и L_4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазунов В.А, Колискор А.Ш, Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. - М.: Наука, 1991. - 95 с.
2. 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.
3. Исследование устойчивости манипулятора с пространственным исполнительным механизмом / Герасун В.М. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. - С. 680-690.
4. 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.
5. К определению зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода / Герасун В.М. [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. - 2013. - №3. - С. 2-8.
6. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования/ Герасун В.М. [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. - №44. – 24 с.
7. Манипуляционные системы роботов / Корендясев А.И. [и др.]. -М.: Машиностроение, 1989. -472 с.
8. О программных движениях манипулятора-трипода / Жога В.В. [и др.] // 6-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Материалы мультиконференции. - Изд-во ЮФУ, 2013. - Т.2. - С. 146-150.
9. Особые положения трипода в кинематических цепях манипуляторов / Герасун В.М. [и др.] // 4-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления. Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции. Т.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 196-198.
10. Оценка массовых характеристик манипулятора с пространственным механизмом / Герасун В.М. [и др.] // Известия нижневолжского агроинженерного комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: изд-во ВолГАУ, 2013. - №3(31). - С. 175-179.
11. Силовой анализ манипулятора с *l*-координатным исполнительным

механизмом / Герасун В.М. [и др.] // Прогресс транспортных средств и систем-2013: материалы Международной научно-практической конференции. - Волгоград, 2013. - С. 316.

V.M.Gerasun[1], V.V.Zhoga[2], I.A.Nesmiyanov[1],
N.S.Vorobieva[1], V.V.Dyashkin-Titov[1]

FORCE ANALYSIS OF STATIC OPERATION MODES OF MANIPULATOR -TRIPOD

[1]Volgograd State Agrarian University, Russia;
[2]Volgograd State Technical University, Russia.

Abstract

The dependences, allowing to define efforts in drive units of the manipulator-tripod in case of static modes of its operation are received. Dependences of efforts in drive units are received in case of change of length of the first unit and different slope angles of the turning base.

Key words: manipulator, mechanism of parallel structure, force analysis.

REFERENCES

[1] Glazunov V.A., Koliskor A.Sh., Kraynev A.F. Spatial Parallel Structure Mechanisms. – M.: Nauka, 1991. – 96 p. (rus.)
[2] Pointing device research on the basis of the spatial mechanism of parallel structure with four progressive couples / Gerasun V.M, et al. // Extremal robotic technology: collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference. – St. Petersburg, 2013. – P. 81-85. (rus.)
[3] Resistance loading manipulator with spatial executive mechanism research / Gerasun V.M, et al. // Modern Machine-Building. Science and Education. Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference. - St. Petersburg, 2013 - P. 680-690. (rus.)
[4] Kinematical Study of the manipulator-tripod / Gerasun V.M, et al. // Modern Machine-Building. Science and Education. Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference. - St. Petersburg, 2012 - P. 251-258. (rus.)
[5] Mobile manipulator – tripod maintenance zone definition / Gerasun V.M, et al. // Engineering and modern education. 2013.- N3. - P. 2-8. (rus.)

[6] Manipulators for Mobile Robots. Concepts and the Principles of IPM Design / Gerasun V.M, et al. // Preprints of M.V.Keldysh. 2012 . - N44. -24 p. (rus.)
[7] Handling Systems of Robots / Korendesev A.I., et al. - M: Mashinostroenie, 1989. - 472 p. (rus.)
[8] About program movements of the manipulator-tripod / Zhoga V.V., et al. // 6th All-Russian multiconference on control problems: Multiconference materials. - Taganrog, 2013. - Vol.2. - P. 146-150. (rus.)
[9] Special provisions tripod in kinematic circuits of manipulators / Gerasun V.M, et al. // 4th All-Russian multiconference on control problems. Materials of the 4th All-Russian multiconference. - Taganrog, 2011. - Vol.2. – P. 196-198. (rus.)
[10] Assessment of mass characteristics of the manipulator with the spatial mechanism / Gerasun V.M, et al. // News of a nizhnevolzhsky agroengineering complex: science and higher education. – Volgograd, 2013. - N3(31). - P. 175-179. (rus.)
[11] The force analysis of the manipulator with the l-coordinate executive mechanism / Gerasun V.M, et al. // Progress of vehicles and systems-2013: materials of the International scientific and practical conference. - Volgograd, 2013. - P. 316. (rus.)

УДК 621.833.1: 621.01

В. Л. Дорофеев

ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНОГО КОНТУРА, КАК ОСНОВА ПРЯМОГО СИНТЕЗА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Владислав Леонидович Дорофеев, д.т.н., профессор
ГНЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова"
Россия, Москва
Тел.: (495)361-1951, E-mail: vld@ciam.ru.

Аннотация

Рассмотрены вопросы инвариантных преобразований параметров исходного контура зубьев зубчатых колес. На примерах показано, как преобразовать угол исходного контура α_n=20° к углам α_n=0,1° и α_n=60°. Показано, что форма профиля зубьев и переходной поверхности при инвариантных преобразованиях не изменяется. Действующие напряжения и параметры кинетики и кинематики не изменяются. Доказано, что исходный контур это стандартный набор параметров для расчета геометрии зубчатых колес, а не графическое изображение контура зубьев. Даны рекомендации новых наборов данных для исходного контура, позволяющие проектировать высококачественные зубчатые передачи.

Ключевые слова: Исходный контур, параметры исходного контура, синтез зубчатых передач

Рассмотрим пример проектирования зубчатой передачи m=5; z_1=20, z_2=40;b=70 ; x1 = 0,15; x2 = - 0,19 ; T_{2H}=4170нм; n=460 об./мин. При стандартном исходном контуре по ГОСТ 13755-81 [1] и отсутствие погрешностей, форма зубьев, действующие напряжения и кинетическая погрешность будут такими, как показано на рис. 1.

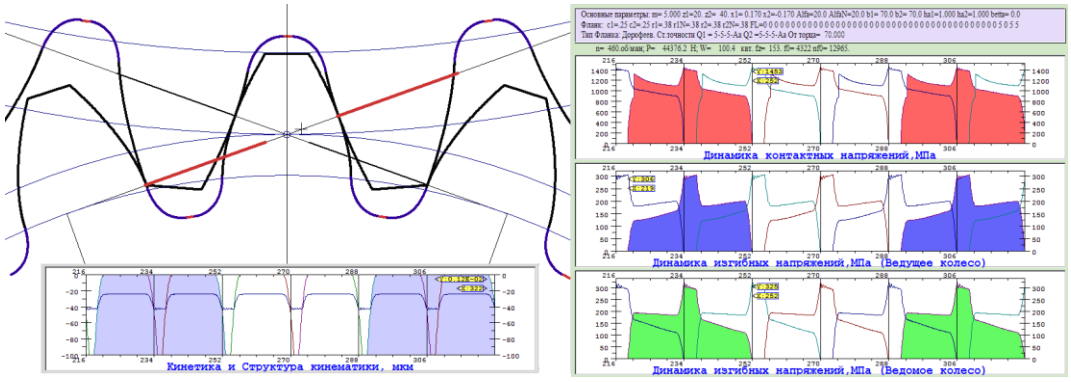


Рис. 1.

Для достижения наивысшей плавности работы поставим цель обеспечить в передачу нагрузки только двумя парами зубьев, т.е. любой фазе зацепления коэффициент перекрытия должен быть ε_α=2. Назначим новые параметры исходного контура, изменив стандартный коэффициент высоты исходного контура, и приняв h^*_{a1} =1.18 ; h^*_{a2} =1,4.

При этих данных толщина зубьев на вершине будет s_{a1}= s_{a2}=*2* мм. Угол зацепления α_w=*20°*.Коэффицикт перекрытия ε_α=*2,01*.

В такой передаче жесткость зацепления постоянна и колеса не имеет колебаний, поэтому уменьшается уровень шума. Кроме этого ставилась задача обеспечить полное закругление впадины между зубьями для обеспечения наиболее высокой изгибной прочности. Радиус закругления впадины при полном закруглении наибольший, что обеспечивает дополнительное уменьшение изгибных напряжений. Все новые назначенные параметры сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых зубчатых колес

№ Рисунка	α_n	x_1	x_2	h^*_{a1}	h^*_{a2}	ρ^*_{f1}	ρ^*_{f2}	c^*	m
2	20°	0.17	-0.17	1.18	1.4	0.26	0.37	0.25	5

Здесь для расчета размеров зубьев с использованием данных таблицы 1 и далее в последующих расчетах можно использовать формулы ГОСТ 16532-83 [1].

Форма зубьев, действующие напряжения и кинетическая погрешность при новых нестандартных параметрах исходного контура будут такими, как показано на рис. 2.

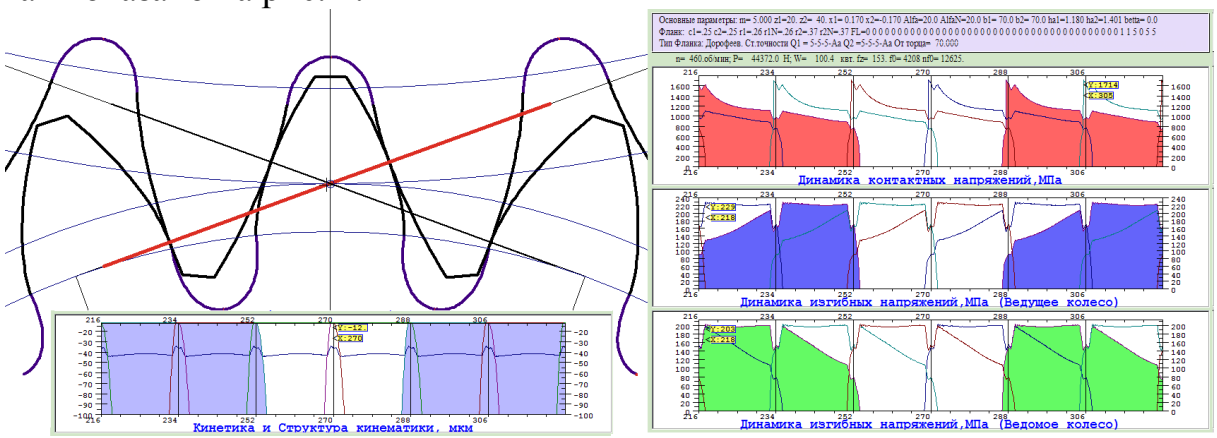


Рис. 2.

Действующие напряжения и кинетическая погрешность при новых нестандартных параметрах исходного контура уменьшились в 1,5 раза.

Отсюда следует, что применение нестандартных параметров исходного контура является высокоэффективным методом повышения несущей способности зубчатых передач.

Возникает вопрос: как измениться несущая способность зубчатой передачи при изменении параметров исходного контура зубьев.

Исследование выполним на контурах с углами исходного контура $\alpha_n=0,1^o$ и $\alpha_n=60^o$. Толщину зубьев на вершине зададим $s_{a1}= s_{a2}=2$ мм. Угол зацепления $\alpha_w=20^o$.

Поскольку эвольвента начинается с основной окружности, то для её сохранения назначим новый модуль с помощью формулы:

$$m_{í} = \frac{d_b}{z \cdot \cos\alpha_{í}} = \frac{m_{è} \cdot \cos\alpha_{è}}{\cos\alpha_{í}}. \qquad (1)$$

Результаты расчета представлены в таблице 2 ниже.

Из формулы для толщины зубьев по дуге начальной окружности определим коэффициенты смещения колес:

$$x_{í} = z \cdot \left[\frac{s_{wè} - d_{wè}\left(\frac{\pi}{2 \cdot z} + inv\alpha_{è} - inv\alpha_{wè} \right)}{d_{wè} \cdot 2 \cdot \tan\alpha_{í}} \right]. \qquad (2)$$

Наружный диаметр зубчатого колеса определяется из решения нелинейного уравнения, при заданной толщине зубьев на окружности вершин - s_{au}:

$$s_{aè} = d_{aí} \cdot \left[\frac{\pi}{2 \cdot z} + \frac{2 \cdot x_{í} \cdot \tan\alpha_{í}}{z} + inv\alpha_{í} - inv(\arccos\left(\frac{d_{bè}}{d_{aí}} \right) \right]. \qquad (3)$$

Откуда коэффициент высоты головки зубьев

$$h^*_{aí} = \frac{d_{aí} - d_{í}}{2 \cdot m_{í}} - x_{í} + \Delta y_{í}. \qquad (4)$$

Коэффициент радиального зазора

$$c^*_{í} = \frac{c^*_{è} \cdot m_{è}}{m_{í}}. \qquad (5)$$

Коэффициент радиуса кривизны переходной кривой

$$\rho^*_{fí} = \frac{\rho^*_{fè} \cdot m_è}{m_í}. \qquad (6)$$

Здесь символом *и* обозначены исходные данные, символом *н* обозначены новые данные и расчетные результаты. Все остальные символы соответствуют ГОСТ 16532-83.

Результаты расчета основных параметров исходного контура представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры исследуемых зубчатых колес

№ Рисунка	α_n	x_1	x_2	h_{a1}	h_{a2}	ρ^*_{f1}	ρ^*_{f2}	c	m
3	0,1°	120.8	135.4	135.49	121.51	0.28	0.39	0.266	4.698
4	60°	-3.83	-7.77	2.246	1.46	0.138	0.197	0.133	9.396

Реально коэффициенты h_{a1} и h_{a2} вычислялись по заданной толщине зубьев на вершине по формулам (3) и (4), поэтому можно предложить более совершенный набор параметров исходного контура, представленный в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры исследуемых зубчатых колес с заменой коэффициента высоты зубьев коэффициентом толщины зубьев на вершине

№ Рисунка	α_n	x_1	x_2	s^*_{a1}	s^*_{a2}	ρ^*_{f1}	ρ^*_{f2}	c	m
3	0,1°	120.8	135.4	0.425	0.425	0.28	0.39	0.266	4.698
4	60°	-3.83	-7.77	0.212	0.212	0.138	0.197	0.133	9.396

Замена коэффициента высоты зубьев коэффициентом толщины зубьев на вершине – это важный результат в проектировании зубчатых передач. Это не только освобождает от контроля заострения зубьев, но и сразу обеспечивает получение оптимальной геометрии зубьев.

Форма зубьев, действующие напряжения и кинетическая погрешность при новых нестандартных параметрах исходного контура будут такими, как показано на рис. 3 и рис. 4.

Исследовались три передачи с углами исходного контура 20°, менее 1°, и более 50°. Однако итоговые результаты получаются одинаковыми, это указывает на то, что формулы (1-6) – это формулы инвариантных преобразований параметров исходного контура.

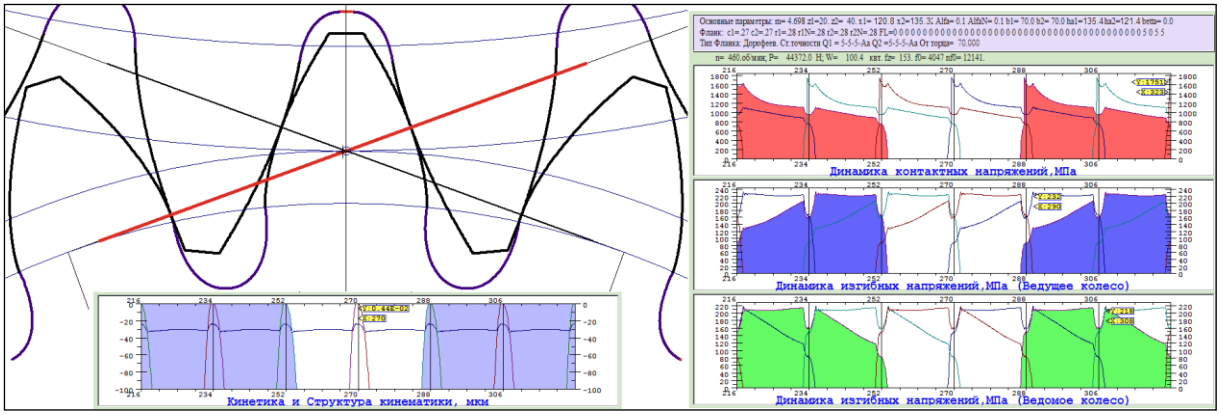


Рис .3.

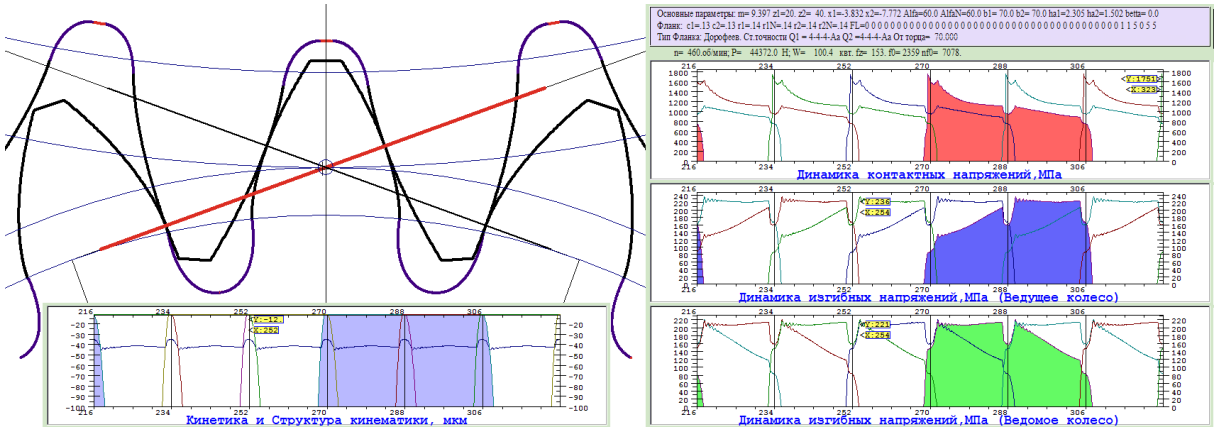


Рис. 4.

Таким образом, ГОСТ 1355-81 [2] не определяет ни форму, ни размеры исходного контура, а зна7чения параметров и коэффициентов исходного контура, предлагаемых в ГОСТ 13755-81, – это частный случай возможных параметров, на основании которых определяются размеры и показатели прочности зубчатых передач. Также в ГОСТ 13755-81 нет определения самого понятия – исходный контур.

Выполненные выше результаты исследований позволяют констатировать, что международный стандарт ISO 53 [3], регламентирует наиболее точное определение исходного контура, как системы исходных данных, для расчета размеров зубьев. Указывается, что стандарт ISO 53 не содержит определений для расчета инструмента. Последнее предупреждение ISO 53 – важно, поскольку часто исходный контур ассоциируется с контуром зубчатого колеса с бесконечно большим числом зубьев или с формой зубьев червячной фрезы для изготовления колес. Эту задачу решает другой стандарт, например, стандарт DIN 3972 – исходный контур для зуборезного инструмента.

Результаты, показанные на рисунках (1-4), выполнены по упрощенной методике. Во-первых, не учитывалось то, что на вершине

зубьев кромка имеет малый радиус кривизны, что значительно увеличивает контактные напряжений в кромочных фазах зацепления; во-вторых, при шлифовании таких колес будет образовываться уступ на профиле, что увеличивает изгибные напряжения; в-третьих, не учтено уменьшение толщины зубьев от бокового зазора. Решением этой проблемы может быть дополнение параметров исходного контура коэффициентами закругления вершины и коэффициентами глубины поднутрения зубьев.

На рис. 5 показаны результаты расчета с учетом погрешности профиля.

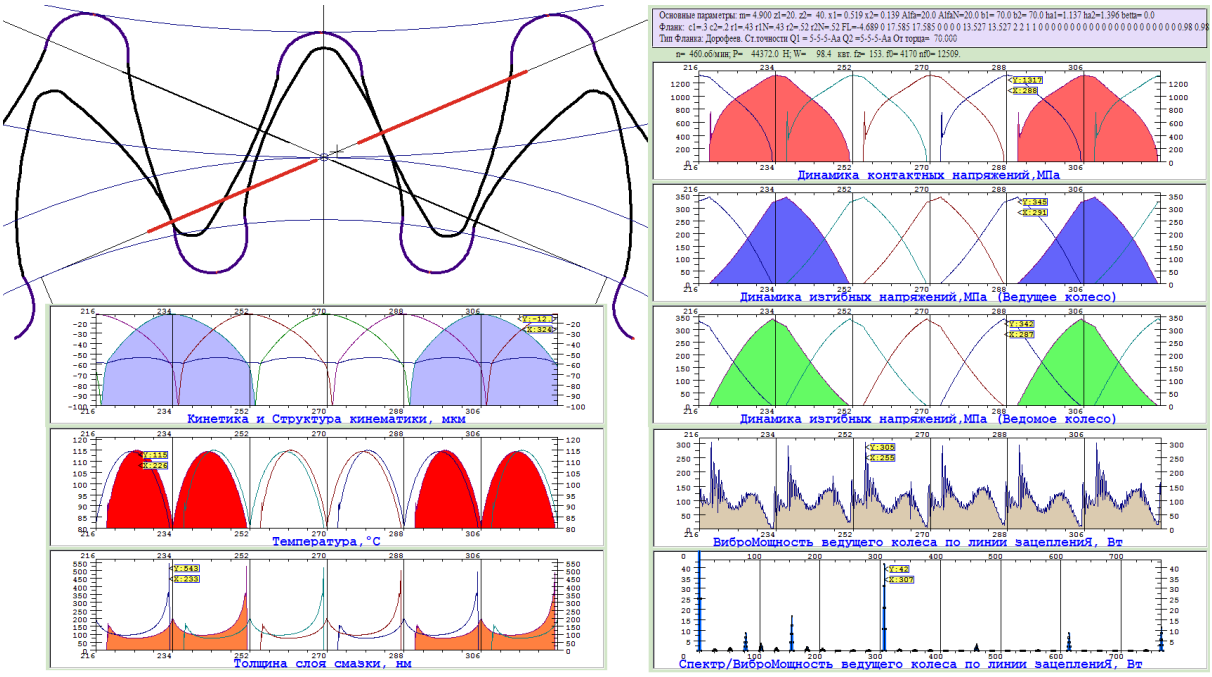


Рис. 5.

Линии погрешности профиля с полями допусков показаны на рис. 6.

Все пары колес, рассчитаны методом прямого синтеза. [5,6], который является развитием метода обобщающих параметров[7,8]. В настоящее время метод прямого синтеза широко применяется для расчета цилиндрических [9,10] и конических [11] зубчатых передач.

По результатам расчета все пары колес отвечают заданным требованиям, как по прочности, так и по плавности работы.

Для проверки того, можно ли изготовить рассчитанную зубчатую передачу. Выполнено моделирование процесса обработки зубчатого колеса методом обкатки (рис.7).

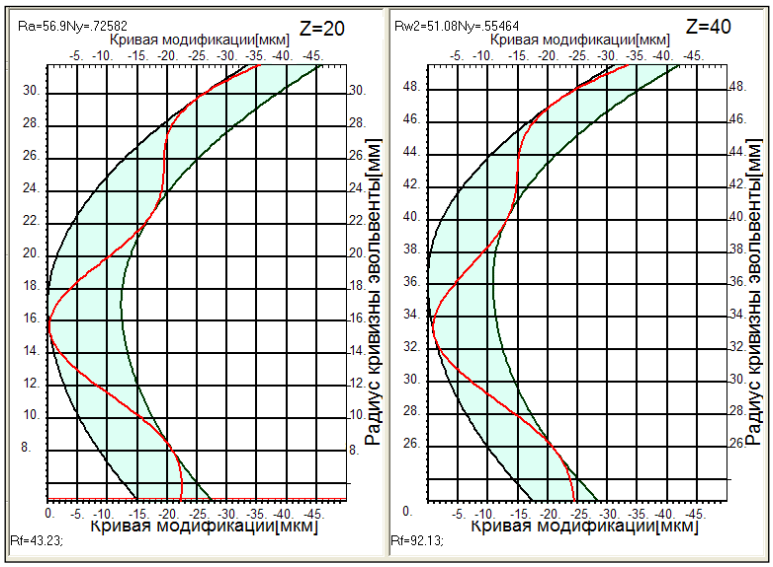


Рис. 6.

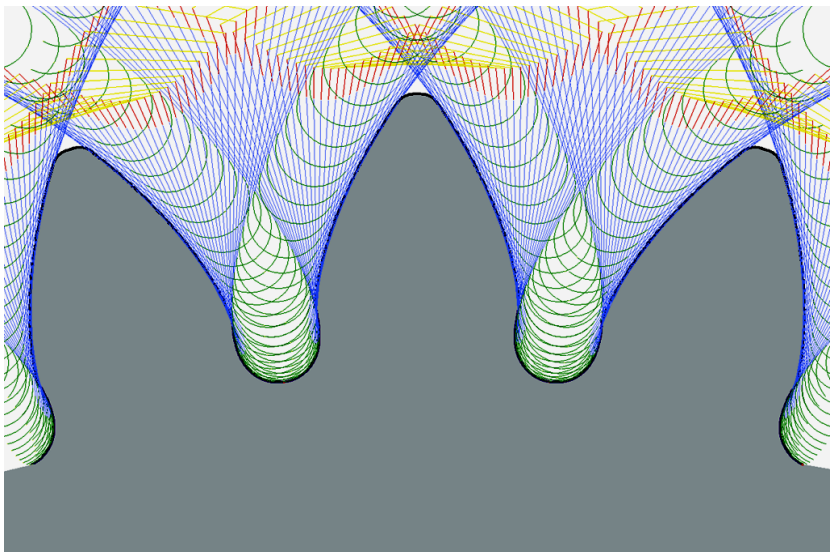


Рис. 7. Моделирование процесса изготовления обкаткой зубчатого колеса, рассчитанного методом прямого синтеза

ВЫВОДЫ

Параметры исходного контура зубьев колес инвариантными преобразованиями можно привести к любому углу профиля, что показано на примерах приведения к углу 0,1° и углу α_n=60°.

Один и тот же профиль зуба может быть получен при параметрах, отличающихся в сто раз.

Метод проектирования прямым синтезом позволяет проектировать высокопрочные, имеющие высокую плавность хода зубчатые передачи вне зависимости от того, какой угол исходного контура задан. В общем

случае при прямом синтезе угол исходного конура зубьев в меньшей степени влияет на форму зубьев по сравнению с традиционным проектированием, при котором влияние угла исходного контура велико.

Дополнение ГОСТ 13755-81 новым набором параметров исходных данных: коэффициентом толщины зубьев на окружности вершин и исключением коэффициента высоты головки зубьев позволит существенно повысить качество проектируемых зубчатых передач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16532-83. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 38 с.
2. ГОСТ 13755-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур. Изд.-во стандартов., 1981, 7с.
3. ISO-53 Cylindrical gears for general and heavy engineering-Standard basic rack tooth profile. ISO 1998. 8pp.
4. DIN 3972 Bezugprofile vor Verzahnwerkzeugen. DIN 1952. 3s.
5. Дорофеев, В.Л. Прямой синтез авиационных эвольвентных зубчатых передач. Ч.1. Проектирование зацепления / В.Л. Дорофеев. – М.: ФГУП ММПП «Салют», 2003. – 22 с.
6. Дорофеев, В.Л., Дорофеев Д.В., Голованов В.В., Гукасян С.Г. Метод полного прямого синтеза авиационных зубчатых передач//Международный форум двигателестроения. Научно-технический конгресс по двигателестроению. НТКД-2014. Часть 2. с.104-108.
7. Вулгаков, Э. Б. Теория эвольвентных зубчатых передач, «Машиностроение», 1995 - 320 с.
8. Вулгаков, Э.Б., Дорофеев. В.Л. . Компьютерное проектирование эвольвентных зубчатых передач в обобщающих параметрах // Конверсия в машиностроении №6, 2002 - стр.148-151.:ил.
9. Кравченко И.Ф., Единович А.Б., Яковлев В.А., Дорофеев В.Л.. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений//Авиационно –космическая техника и технологии, 2008, № 8 (55)-стр.129-134.
10. Дорофеев В. Л., Дорофеев Д.В., Единович А.Б., Корнейчук А. В.. Особенности проектирования редукторов для самых мощных в мире украинско-российских авиационных двигателей.// Вісник Національного Технічного университету «ХШ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». Харків: НТУ «ХПІ». 2010, №27. - стр. 54-61.

11. Дорофеев, В.Л., Дорофеев Д.В., Новиков В.С., Павленко Ю.М. Исследование влияния формы боковой поверхности зубьев конических зубчатых колес с круговыми зубьями на контактные напряжения. //Международный форум двигателестроения. Научно-технический конгресс по двигателестроению. НТКД-2014. Часть 2. с.108-111.

V.L. Dorofeev

INVARIANT PARAMETRES TRANSFORMATION OF BASIC RACK TOOTH PROFILE, AS THE UNDERLYING PRINCIPLE OF DIRECT GEARS SYNTHESIS

State Scientific Center of Russian Federation.
"Central Institute of Aviation Motors" , Moscow, Russia.

Abstract

Results of geometrical designing of gearings with angles of an initial contour 20 °, less than 1 ° and 60 ° are resulted. The method of direct synthesis is applied. Unlike the traditional design technique demanding as input data to set parameters of the instrument, direct synthesis allows to execute calculation or without instrument parameters, or to define them after the projection termination. For check of possibility of manufacturing of tooth gears with parameters repeatedly different from the traditional results executed gears simulation of dynamics. Results can be used designers and for studying by students.

Key words: basic rack tooth profile, invariant parameters transformation, synthesis of gears.

REFERENCES

[1] GOST 16532-83. Peredachi zubchatye cilindricheskie jevol'ventnye vneshnego zaceplenija. – M.: Izd-vo standartov, 1991. – 38 p. (rus.)
[2] GOST 13755-81 Osnovnye normy vzaimozamenjaemosti. Peredachi zubchatye cilindricheskie jevol'ventnye. Ishodnyj kontur. Izd.-vo standartov., 1981, 7 p. (rus.)
[3] ISO-53 Cylindrical gears for general and heavy engineering-Standard basic rack tooth profile. ISO 1998. 8 p.
[4] DIN 3972 Bezugprofile vor Verzahnwerkzeugen. DIN 1952. 3 s.
[5] Dorofeev, V.L. Prjamoj sintez aviacionnyh jevol'ventnyh zubchatyh peredach. Ch.1. Proektirovanie zaceplenija / V.L. Dorofeev. – M.: FGUP MMPP «Saljut», 2003. – 22 p. (rus.)

[6] Dorofeev, V.L., Dorofeev D.V., Golovanov V.V., Gukasjan S.G. Metod polnogo prjamogo sinteza aviacionnyh zubchatyh peredach//Mezhdunarodnyj forum dvigatelestroenija. Nauchno-tehnicheskij kongress po dvigatelestroeniju. NTKD-2014. Vol. 2. pp.104-108. (rus.)
[7] Vulgakov, Je. B. Teorija jevol'ventnyh zubchatyh peredach, «Mashinostroenie», 1995 - 320 p. (rus.)
[8] Vulgakov, Je.B., Dorofeev. V.L. . Komp'juternoe proektirovanie jevol'ventnyh zubchatyh peredach v obobshhajushhih parametrah // Konversija v mashinostroenii №6, 2002 – pp. 148-151.:il. (rus.)
[9] Kravchenko I.F., Edinovich A.B., Jakovlev V.A., Dorofeev V.L.. Jeksperimental'nye i teoreticheskie rezul'taty issledovanija aviacionnyh zubchatyh peredach dlja dvigatelej pjatogo i shestogo pokolenij//Aviacionno –kosmicheskaja tehnika i tehnologii, 2008, № 8 (55)- pp.129-134. (rus.)
[10] Dorofeev V. L., Dorofeev D.V., Edinovich A.B., Kornejchuk A. V. Osobennosti proektirovanija reduktorov dlja samyh moshhnyh v mire ukrainsko-rossijskih aviacionnyh dvigatelej.// Visnik Nacional'nogo Tehnichnogo universitetu «HSh». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk «Problemi mehanichnogo privodu». Harkiv: NTU «HPI». 2010, №27. - pp. 54-61. (rus.)
[11] Dorofeev, V.L., Dorofeev D.V., Novikov V.S., Pavlenko Ju.M. Issledovanie vlijanija formy bokovoj poverhnosti zub'ev konicheskih zubchatyh koles s krugovymi zub'jami na kontaktnye naprjazhenija. //Mezhdunarodnyj forum dvigatelestroenija. Nauchno-tehnicheskij kongress po dvigatelestroeniju. NTKD-2014. Vol. 2. pp. 108-111. (rus.)

УДК 621.833.01

В.Л. Дорофеев [1], В.В. Голованов [2], С. Г. Гукасян [3]

МОДИФИКАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ИЗНОСА КОНТАКТНОЙ ПОВЕХНОСТИ

[1]Владислав Леонидович Дорофеев, д.т.н., профессор
ГНЦ ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова"
Россия, Москва
Тел.: (495)361-1951, E-mail: vld@ciam.ru.

[2]Голованов Виктор Васильевич
Начальник отдела ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»
Россия, Москва
Тел.: 495-362-90-77, E-mail: golovanov_vv@rambler.ru

[3]Гукасян Сурен Гургенович
Начальник сектора ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»
Россия, Москва
Тел.: 495-362-90-77, E-mail: gsg@ciam.ru

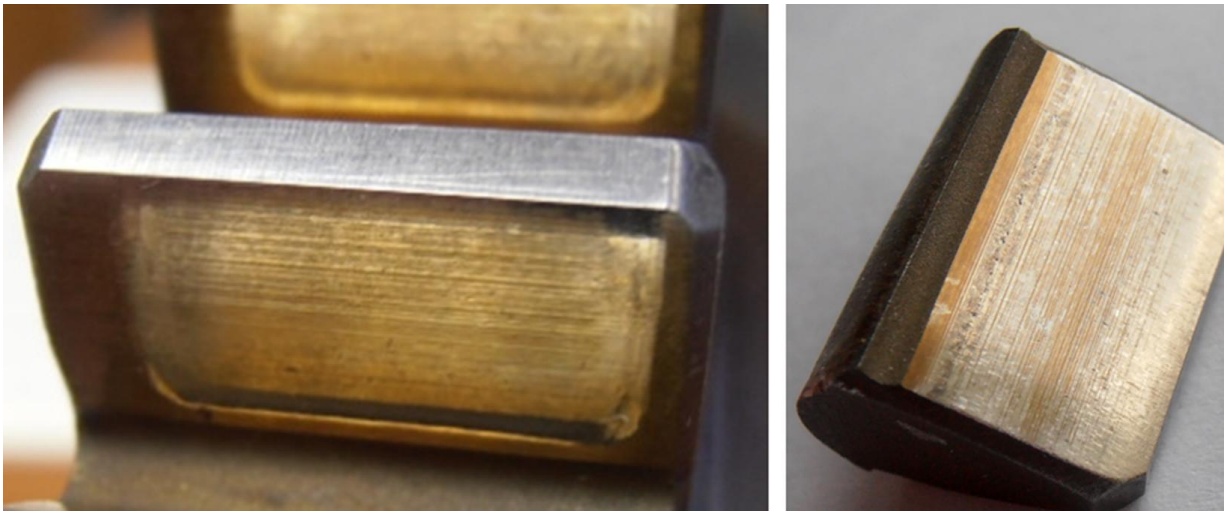
Аннотация

Износ профиля зубьев авиационные зубчатых колес имеет место на головках и ножках зубьев. Показано, что использование вычислительного эксперимента позволяет найти такую линию профиля, при которой зубья контактируют только через слой смазки.

Ключевые слова: зубчатые колеса, износ, контактная поверхность, авиация, модификация, рабочий профиль, зубчатые колеса.

После отработки заданного ресурса зубчатыми передачами авиационного двигателя на центральных участках контактной поверхности зубьев авиационных колес остаются следы механической обработки. Наличие следов механической обработки свидетельствует о том, что толщина масляной пленки на этих участках превышает высоту микронеровностей. На ножках и головках зубьев, где имеет место вход зубьев в зацепления и выход из него имеется износ контактной поверхности (рис. 1). Несмотря на то, что твёрдость поверхности зубьев более 60 HRC, на ножках ведущего колеса износ проявляется как следствие сосредоточенного удара по поверхности из пластического материала. На ножках ведомого колеса износ проявляется как микропиттинг. Одной из причин этого износа может быть

повышенное скольжение эвольвентных профилей зубьев на концах линии зацепления [1], вторая причина рассмотрена ниже.



a) *b)*

Рис.1. На фоне неизношенной центральной поверхности зубьев ведущего a) и ведомого b) колес на ножках зубьев происходит износ кумулятивного характера

Для изучения описанного явления профиль изношенных зубьев измерялся на эвольвентометре фирмы Maag SP-100. Из результатов измерения линии профиля видно (рис. 2), что линия износа имеет не плавный увеличиваться от полюса зацепления к ножкам и головкам зубьев характер, как следует из геометрической теории, а кумулятивный[1] характер. Наличие зон износа похожих на следы пластической деформации косвенно подтверждает это. Однако согласно классической теории пластических деформаций [2] при высоких скоростях деформации предел пластических деформаций смещается в область более высоких контактных напряжений. Вследствие отмеченных противоречий в существующих теориях с результатами экспериментов, только весьма условно можно характеризовать процессы износа и разрушения поверхности ножек и головок зубьев авиационных зубчатых колес, как - связанные с пластическим течением материала. По этой причине в настоящее время нет приемлемой методики расчета контактных напряжений на зубьях при кромочном зацеплении.

Таким образом, требуется другой подход для расчета авиационных зубчатых передач.

Если кинематику зубчатого зацепления рассматривать без учета нагрузок, то перед входом зубьев в зацепление между зубьев пары 2-2 должен быть зазор, как показано на рис. 3.

[1] Кумулятивный от латинского слова cumulatio – увеличивать, стимулировать, накоплять.

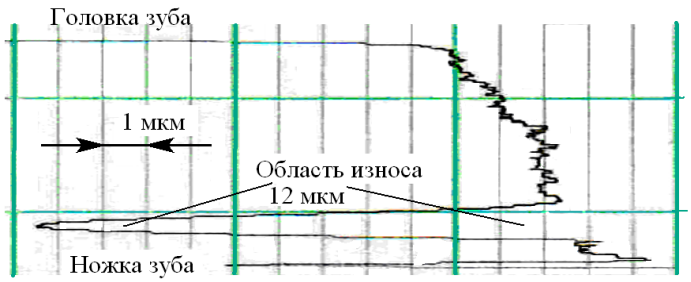


Рис. 2. Эвольвентограмма профиля зубчатого колеса z=49, α=25°, F_{tH}=22909Н. после испытаний

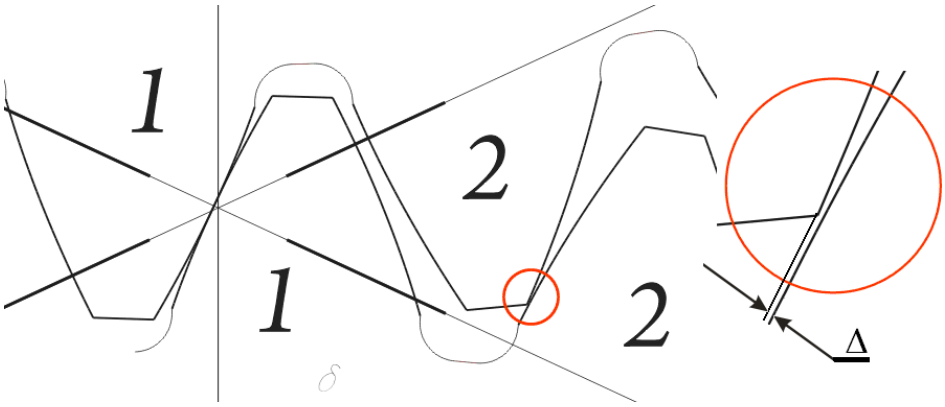


Рис. 3. Схема зацепления зубьев ненагруженной зубчатой передачи

В нагруженной зубчатой передаче зубья деформируются, и пара зубьев 2-2 входит в зацепление вне теоретической линии зацепления. Если на теоретической линии зацепления скольжение сопровождается качением, то в нагруженном состоянии скольжение вершины зубьев протекает без качения, что существенно влияет на степень износа контактирующих. Площадь контакта нагруженных зубьев мала, что по результатам измерения на эвольвентограмме (рис.2), но процессы, протекающие в этой области, характеризуются не только высокими скоростями скольжениями профилей, но и высокими быстротекущими контактными давлениями.

Для оценки процессов, протекающих при кромочном взаимодействии зубьев, сравним скорости скольжения профилей в крайних точках линии зацепления со скоростью касания зубьев в паре 2-2 при входе зубьев в зацепление в направлении теоретической линии зацепления. Эта скорость будет определять также скорость деформирования зубьев после их контакта.

Колеса, зубья которых показаны на рис. 1, имеют m=4,02; z_1=49, z_2=51, x_1=x_2=0. Частота вращения 7500 об./мин. Скорость скольжения в начале теоретической линии зацепления 13,5 м/с. Передаваемая мощность 1773 кВт. Прогиб зубьев в однопарном зацеплении 30 мкм.

Приближенно сближение зубьев, как расстояние между зубьями в кромочной фазе в зависимости от времени, может быть описано уравнением [3]:

$$F(t) = \frac{\rho_{e1}}{\rho_{i2}} \frac{A\sin(\alpha)}{r_{b1}^2} v_{b1}^2 t^2, \quad (1)$$

где ρ_{e1} и ρ_{i2} радиусы кривизны ведущего и ведомого колес в начальной точке теоретической линии зацепления; A - межосевое расстояние, r_{b1} - радиус основной окружности ведущего колеса, α - угол зацепления; v_{b1} - скорость по основной окружности ведущего колеса; t - время от положения зубьев в начале теоретической линии зацепления до текущего положения зубьев.

Принимая, $F(t) = 30 \cdot 10^{-6}$ [м], т.е. равным прогибу зубьев в однопарном зацеплении, из уравнения (1) определим время от первого касания зубьев до выхода их на теоретическую линию зацепления. Подставляя найденное время, производную по времени уравнения (1)

$$v(t) = \frac{d}{dt}\Delta(t) = 2\frac{\rho_{e1}}{\rho_{i2}} \frac{A\sin(\alpha)}{r_{b1}^2} v_{b1}^2 t,$$

получим скорость равную 3 м/с сближения и последующего деформирования зубьев при кромочном контакте. Скорость деформирования 3 м/с много меньше той скорости, при которой при высоких контактных напряжениях зубья материал может сохранять упругие свойства. Зубья будут внедряться друг в друга, пластически деформируясь, как показано на рис. 4. При этом, как следует из характера движения точек контакта, на входе зубьев материал будет удаляться их активной области контакта зубьев (рис.1, a).

Напротив, при выходе зубьев из зацепления (рис. 5), Характер движения точек контакта – иной, при этом пластически деформированный металл перемещается в область активного контакта зубьев, где, уплотняясь, выкрашивается (рис.1, b).

Таким образом, любое эвольвентное зубчатое зацепление будет изнашиваться на участках кромочного зацепления.

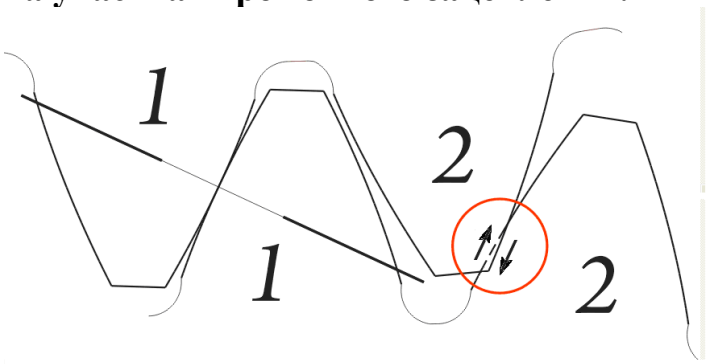


Рис. 4. Схема перемещения пластически деформированных частиц поверхности зубьев при входе в зацепление

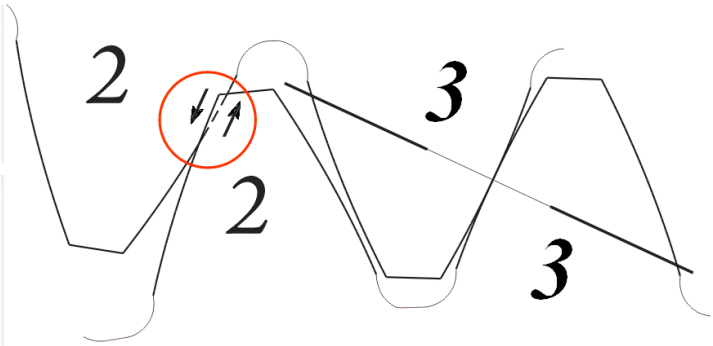


Рис. 5. Схема перемещения пластически деформированных частиц поверхности зубьев при выходе из зацепления

Для определения скорости сближения зубьев в общем виде необходимо решить обратную задачу теории зацепления. Поскольку кромочный контакт зубьев характеризуется наличием угловых точек на вершине зубьев, то при функциональном описании линии профиля будет иметься особенность, заключающаяся в отсутствии производной в этой точке. По этой причине метод решения обратной задачи теории зацепления должен быть построен без применения производных. Это возможно если применить метод нелинейного программирования. Задача сводится к поиску минимума целевой функции, определяющей кратчайшее расстояние между множеством различных точек на профилях смежных зубьев.

Если погрешность профиля $R(\nu)$ выразить функцией угла развернутости эвольвенты, то в фазе зацепления φ целевая функция будет иметь вид:

$$A(\varphi,i) = r_{b1}\sin\Delta_1 + r_{b1}\nu_1(\varphi,i) + +R_1\cos\Delta_1 + r_{b2}\sin\Delta_2 + r_{b2}\nu_2(\varphi,i) + R_2\cos\Delta_2 \qquad (2)$$

где $\Delta_1 = \nu_1^* - \nu_1(\varphi,i)$; $\Delta_2 = \nu_2^* - \nu_2(\varphi,i) + f(\varphi,i)/r_{b2}$; $R_1 = r_{b1}\nu_1^* - f_{z1}(\nu_1^*)$; $R_2 = r_{b2}\nu_2^* + f_{z2}(\nu_2^*)$;

Здесь связь теоретических углов развернутости в точке контакта зубьев ведущего колеса и ведомого устанавливается по формуле $\nu_2(\varphi,i) = [(z_1+z_2)/tg\alpha_{t\omega} - z_1\nu_1(\varphi,i)]/z_2$, а связь угла ν_1 с фазой зацепления – по зависимости

$$\nu_1(\varphi,i) = [\varphi - 2\pi(i-1)/z_1] \times \mathrm{mod}(2\pi N/z_1) + \nu_a + \varphi_a.$$

Остальные обозначения следующие:

$f(\varphi,i)$ – многозначная функция кинематической погрешности;

i – номер пары зубьев, входящей в группу зубьев, находящихся в зацеплении в фазе φ;

$f_{z1}(\nu_1)$ и $f_{z2}(\nu_2)$ – функции прерывных кинематических погрешностей колес;

ν_1, ν_2 - углы развернутости эвольвенты теоретические;

ν_1^*, ν_2^* - углы развернутости эвольвенты фактические;

r_{b1}, r_{b2} – радиусы основных окружностей ведущего и ведомого колес;

ν_a – угол развернутости эвольвенты на вершине зуба;

φ_a – угол заполюсного перекрытия;

z_1, z_2 – числа зубьев ведущего и ведомого колес;

$\alpha_{t\omega}$ - угол зацепления;

N – максимальное число зубьев, находящихся в зацеплении в торцевом сечении.

Для каждой фазы зацепления φ и для каждой пары зубьев i минимальное значение целевой функции будет определять значение кинематической погрешности пары зубьев. При поиске минимума целевой функции (2) варьируемыми параметрами являются углы развернутости эвольвенты ν_1, ν_2, при которых происходит контакт зубьев и значение и значение функции $f(\varphi, i)$, определяющей кинематическое положение колес, в предположении отсутствия зубьев не входящих в i-тую пару.

Совокупность функций для всех пар зубьев определит многозначную функцию кинематической погрешности. В отличие от простой кинематической погрешности – многозначная состоит из финитных перекрывающихся функций, каждая из которых определяет положение точки контакта пары относительно номинального положения.

На рис. 6. показан пример расчёта функции кинематической погрешности зубчатой передачи с вышеуказанными параметрами при φ = 234 градуса, i=2. Для зубчатых колёс без погрешности функции прерывных кинематических погрешностей колес определяются следующим образом:

$$\forall(\nu \le \nu_a)\ f_z(\nu) = f_{ff}(\nu) + F_p(Z),$$

$$\forall(\nu > \nu_a)\ f_z(\nu) = f_z(\nu_a) - \frac{r_a \cos(arctg(\nu_a) - \nu_a}{\nu},$$

где $f_{ff}(\nu)$ - функция погрешности профиля смещенная так, что $f_{ff}(\nu_d) = 0$;

ν_d -угол развернутости эвольвенты по начальной окружности;

$F_p(Z)$ - погрешность углового положения Z-того зуба, измеренная по начальной окружности и смещенная так, что $F_p(Z)_{Z=1} = 0$.

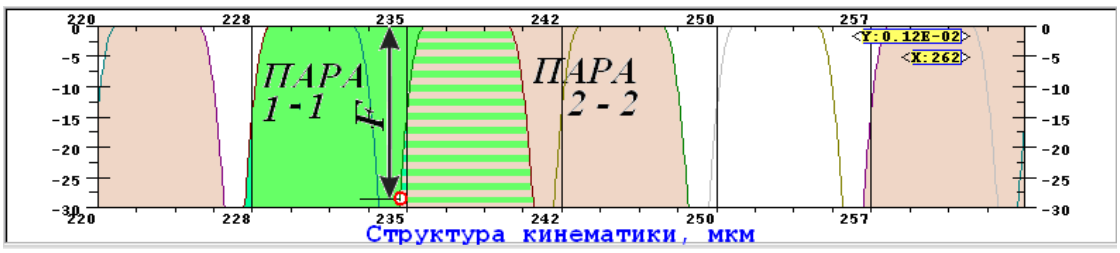


Рис. 6. График, определяющий положение каждой пары зубьев в зависимости от угла поворота ведущего колеса (График соответствует зубчатым колесам без погрешности)

Начальное значение $\varphi = 0$ соответствуют положению зубьев в полюсе зацепления. Символом ***F*** отмечено положение точки входа зуба в зацепление, изображенное на рис. 3.

При радиальном биении колес и погрешности профилей зубьев (степень точности 7-0-7) график многозначной кинематической погрешности или иначе структуры кинематики имеет вид, показанный на рис. 7. Можно видеть, какое влияние на образование циклическопогрешности оказывает кинематическая погрешность.

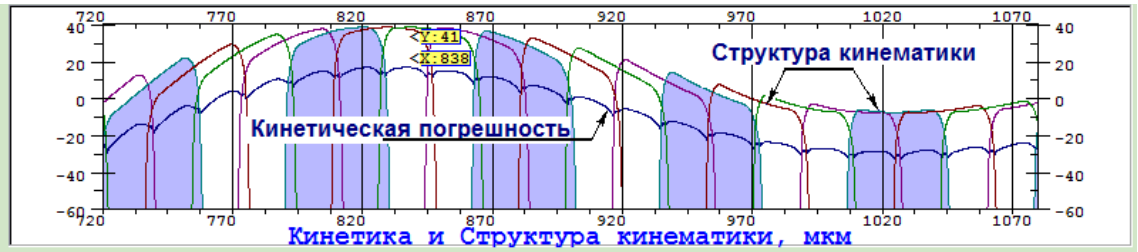


Рис. 7. График, определяющий положение каждой пары зубьев за один оборот ведущего колеса (График соответствует зубчатым колесам, степень точности 7- 0–7 по ISO 1328)

Проф. Кудрявцев В.Н. в работе [4] указал на то, что в настоящее время нет достаточно точных функциональных связей между изнашиванием зубьев и кинематическими параметрами в зоне контакта, приведенными радиусами кривизны, контактными напряжениями, условиями смазки. И в этой связи он отметил, что для расчета зубчатых передач, изменения, геометрии которых в процессе эксплуатации пренебрежимо малы, и возможно обеспечить непрерывный масляный слой между контактирующими зубьями, приемлем метод расчета, изложенный в работе [5], в геометрической основе которого лежит решение обратной задачи теории зацепления.

Принято считать, что авиационные зубчатые передачи практически не изнашиваются. Но как видно из экспериментальных исследований (рис.1), авиационные зубчатые колеса, не изнашиваясь в большей части профиля, имеют износ на ножках и головках зубьев. Таким образом, метод [5] можно применить, но не для эвольвентных зубчатых передач, а для передач, в которых условия входа зубьев в зацепление будут такими, что условия отсутствия износа будут выполнимы.

Синтез таких зубчатых передач рассмотрим на примере зубчатой передачи, с указанными выше параметрами.

В отличие от ГОСТ 21354-87 по программе AEROFLANK, разработанной на основе методики [5], рассчитываются контактные напряжения и другие показатели не в одной точке, а непрерывно во всех фазах зацепления. Это позволяет выполнить проектирование зубчатой передачи так, чтобы не только в полюсе зацепления была обеспечена контактная прочность, но в фазах зацепления зубьев колес, в том числе и в фазах входа

зубьев в зацепление и выхода их него. Поскольку результаты расчёта получаются в таком же виде, как и в натурном эксперименте, то эту методику называют вычислительным экспериментом. На рис.8 показан результат вычислительного эксперимента по определению контактных напряжений, мгновенной температуры и толщины слоя смазки зубчатой передачи с колесами, имеющими идеальный эвольвентный профиль зубьев.

Как следует из расчёта, при входе зубьев в зацепление толщина слоя смазки уменьшается до нуля, что и является причиной износа зубьев.

Рис. 8. Участок профиля ведущего зуба, который дважды за цикл зацепления входит в контакт

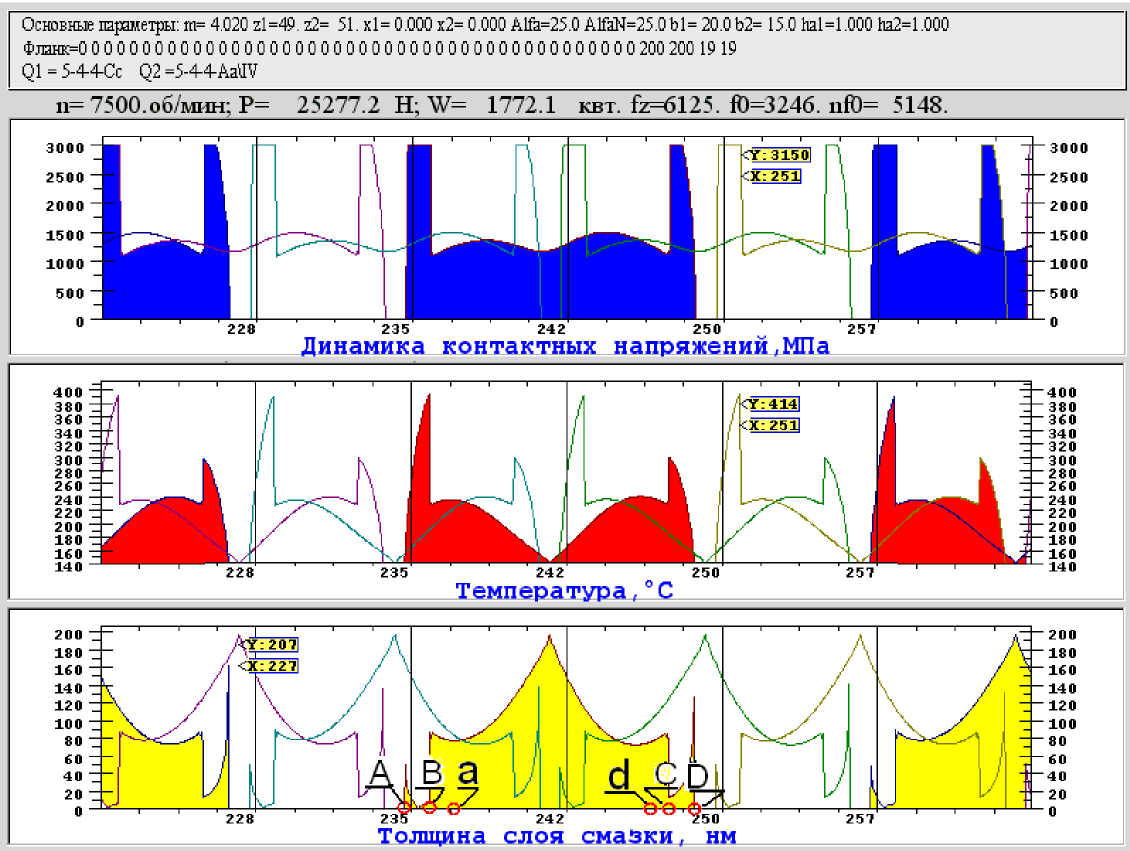


Рис. 9. Результат расчета зубчатой передачи

В нижней части рис. 9 отмечены характерные фазы зацепления: A,B,a, C,D,d.

В фазе А кромка ведомого зуба касается профиля ведущего (рис. 8, а). В фазе В зубья занимают крайнее положение на теоретической линии зацепления. В фазе **а** ведущий зуб **повторно** касается ведомого зуба точкой, которая уже была в контакте, когда зацепление находилось в фазе А (рис. 8, b).

Простейший способ устранить негативные явления кромочного контакта это применить модификацию головки зубьев так, чтобы кромка зуба под нагрузкой не касалась активного участка сопряженного профиля зуба.

На рис. 10 показаны линии двух сопряженных профилей, отражающие отклонения от эвольвенты модифицированных зубьев.

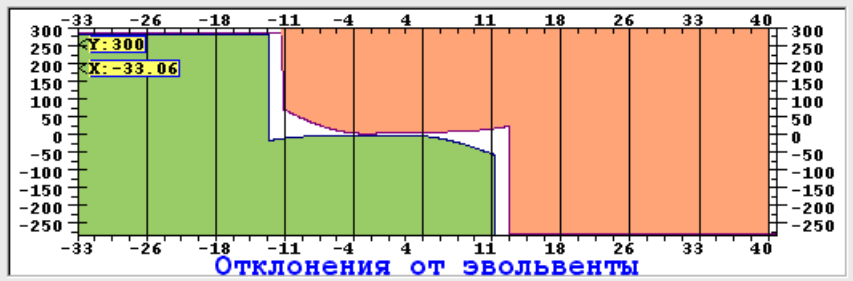


Рис. 10. Модификация профиля зубьев

Основываясь на теоретических положениях, изложенных в работе [6] программа AEROFLANK по методике [5] дополнена модулями расчета мгновенной температуры и толщины слоя смазки.

На рис. 11 показан результат вычислительного эксперимента с целью анализа влияния модификации профилей на контактные напряжения и толщину слоя смазки.

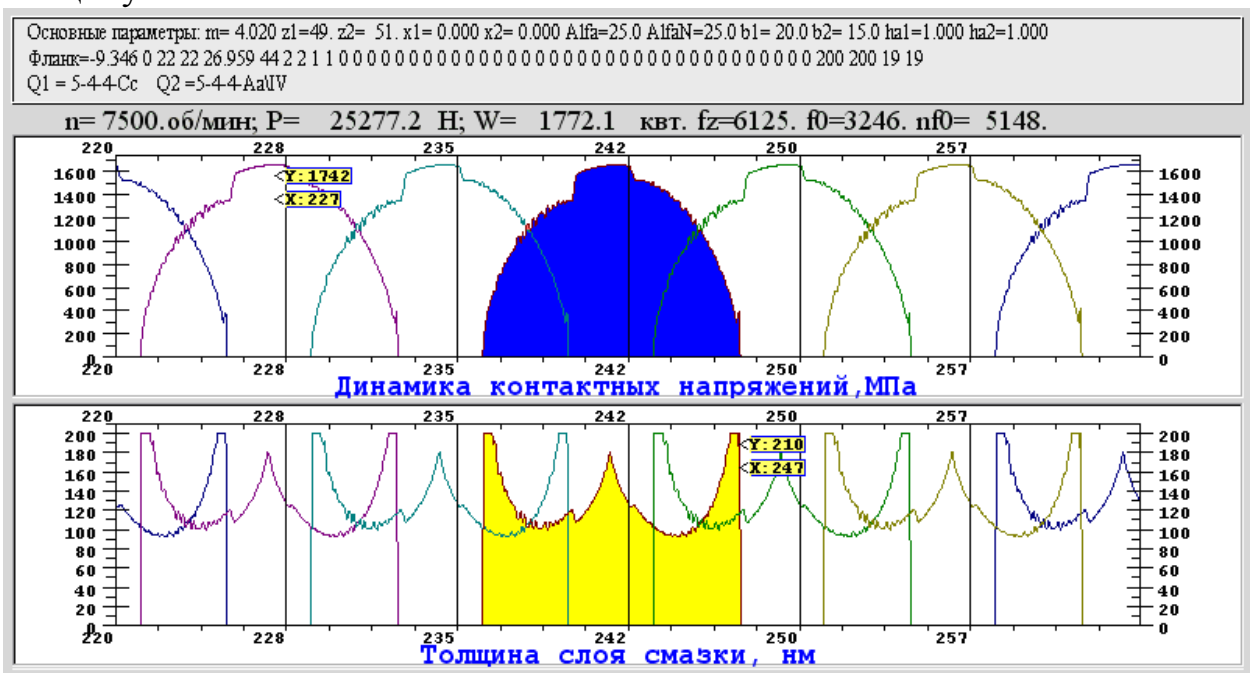


Рис. 11. Результат расчета модифицированной зубчатой передачи

Глубина и форма линии профиля определяется путем многократных вычислительных экспериментов при вариации различных параметров модификации.

Выводы

Поскольку основное требование, предъявляемое к авиационным зубчатым передачам, это отсутствие износа, то задача проектирования сводится к такому синтезу формы профиля, при котором толщина слоя смазки в области контакта головок и ножек зубьев будет максимальна, а контактные напряжения - минимальны.

Для исключения возможных ошибок расчета вследствие несовершенства учета пластических деформаций предложено применять и рассчитывать зубчатые передачи с модифицированным профилем, исключающим контакт кромок зубьев.

Для проектирования используется программа AEROFLANK. Одна из версий программы AEROFLANK применялась при доводке двигателей ТВ3-117ВМА-СБМ1, АИ-222, АИ-436-148, Д27, при этом не только уменьшался износ поверхности зубьев, но уменьшался уровень вибрации зубчатых передач [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении. М., Машгиз, 1962. 532с.
2. Теория пластических деформаций металлов/ Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др.: Под ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. М.: Машиностроение1983, 598 с.
3. Полоцкий М.С. Динамические нагрузки на зубьях прямозубых передач. - В кн.: Повышение нагрузочной способности зубчатых передач и снижение их веса./ Под ред. Саверина. М.: Машгиз, 1956. С. 149-171.
4. Кудрявцев В.Н. К вопросу об уточнении оценки несущей способности цилиндрических зубчатых передач // Вестник машиностроения. 1983, № 3, с.17 – 20.
5. Дорофеев В.Л. Основы расчета нагрузок и напряжений, действующих в зацеплении цилиндрических зубчатых передач // Вестник машиностроения. 1983, № 3, с.14 - 16.
6. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.
7. Кравченко И.Ф., Единович А.Б., Яковлев В.А., Дорофеев В.Л. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений. Авиационно-космическая техника и технология 8(55), Харьков «ХАИ», 2008, стр. 129 -134.

V.L. Dorofeev, V.V. Golovanov, S.G. Gukasian

PROFILE MODIFICATION OF AVIATION GEARS FOR THE PURPOSE OF CONTACT SURFACE AREA DESTRUCTION REDUCTION

State Scientific Center of Russian Federation.
"Central Institute of Aviation Motors" , Moscow, Russia.

Abstract

Experimental investigations of gearings have been conducted at Russian Central Institute of Aviation Motors with bench Back-to-back CIAM- Test-Rig. Theoretical investigations have been done by method of mathematical simulations under AEROFLANK software. Measurement results of tooth gearing vibrations and measurement results of depth and form of deterioration line of teeth profile tested experimentally are presented in the report. Theoretical analysis has been performed to monitor change of contact and bending stresses during rotation of the wheels, temperature, and thickness of lubrication layer, radial and angular vibrations. The proposed method was used in finishing TV3- 117VMA-SBM1 , AI-222 , AI- 436-148, D27. Calculation method thus not only reduces wear of tooth surfaces, but decreased the level of vibration of gears.

Key words: profile modification, aviation gears, contact surface area destruction.

REFERENCES

[1] Gavrylenko V.A. Gears in mechanical engineering. M. Mashgiz,1962, 532 p. (rus.)
[2] Theory of plastic deformation of metals / E.P.Unksov, U.Dzhonson, V.L.Kolmogorov etc.: Ed. E.P.Unksova , A.G.Ovchinnikova . M. Mashinostroenie .1983, p. 598. (rus.)
[3] Polotski M.S. Dynamic loads on the teeth of spur gears. - In the book. : Increased load capacity of gears and reduce their weight. / Ed. Saverin . M. Mashgiz , 1956 . pp. 149-171. (rus.)
[4] Kudryavtsev V.N. The question of improving assessment of the carrying capacity of cylindrical gears / / Bulletin of mechanical engineering. 1983, № 3, p.17 - 20. (rus.)
[5] Dorofeev V.L. Basis of calculation of loads and stresses in cylindrical gears meshed //Bulletin of mechanical engineering. 1983, № 3, p.14 - 16.
[6] Kodnir D.S. Contact hydrodynamics lubrication of machine parts . M. : Engineering, 1976, 304 p. (rus.)
[7] Kravchenko I.F., Edinovich A.B., Yakovlev V.A., Dorofeev V.L. Experimental and theoretical results on aviation gear motors fifth and sixth generations. Aerospace and Technology 8 (55), Kharkiv " HAI ", 2008 , pp. 129 -134. (rus.)

УДК 621.01+531.8

А. Н. Евграфов[1], Г.Н. Петров[2]

ВЫБОР ПРИВОДОВ МНОГОПОДВИЖНОГО МЕХАНИЗМА С ИЗБЫТОЧНЫМИ ВХОДАМИ

[1]Александр Николаевич Евграфов, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: a.evgrafov@spbstu.ru.

[2]Геннадий Николаевич Петров, к.т.н., доцент кафедры теории механизмов и маши, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845.

Аннотация

Рассмотрен механизм пространственной платформы с избыточными входами. Для оценки качества текущей конфигурации механизма использованы критерии, среди которых модуль якобиана системы уравнений геометрического анализа механизма, сумма квадратов уравновешивающих сил и минимальная собственная частота механизма при закрепленных двигателях и упругих передаточных механизмах. Рассмотрены варианты движения рабочего органа по заданному закону с альтернативным включением двигателей по всем трем критериям, а также варианты одновременной работы всех двигателей.

Ключевые слова: пространственный механизм, многоподвижный механизм, избыточный вход, выбор привода.

Замкнутые рычажные механизмы, широко используемые в машиностроении, являются сложными механическими системами. Их функции положения, связывающие выходные координаты, определяющие положения рабочих органов машины, с входными координатами, задающими положения выходных звеньев привода, являются нелинейными [1-6]. Особенно сложными являются функции положения многоподвижных механизмов, программное движение которых реализуется согласованным управляемым движением нескольких двигателей [7-9]. Эти нелинейные функции положения в большинстве случаев являются многозначными. Одной и той же совокупности входных координат соответствуют несколь-

ко положений (конфигураций) системы. Многозначность функций положения приводит к существованию особых (сингулярных) положений, являющихся точками бифуркации в пространстве конфигураций системы. В особых положениях механизм приобретает дополнительную локальную степень свободы, одновременно неограниченно возрастают силы реакций в кинематических парах, что при наличии сил кулонова трения приводит к появлению «зон самоторможения» в окрестности особых положений. В связи с этим постоянно возникают проблемы выбора движений. Чаще всего речь идет о задаче позиционирования — перемещения системы из заданного начального в заданное конечное положение. При этом возникает необходимость, управляя двигателями, обеспечить выбор «наилучшей» последовательности конфигураций, через которые будет проходить система (выбор оптимальной траектории), или выбор оптимальных законов движения вдоль траектории. Возможна и такая ситуация, в которой и траектория, и закон движения заданы, надо определить только оптимальный в том или ином смысле закон изменения движущих сил и моментов.

Таким образом, решение практических задач приводит к необходимости решения теоретической проблемы оценки качества той или иной конфигурации механизма, той или иной траектории. Критерии качества конфигурации могут выбираться различными способами. В настоящей статье рассмотрены критерии качества, отражающие степень близости системы к особому положению. Некоторые из таких критериев рассматривались ранее [10], например, угол давления [11]. Однако этот критерий оказался неудобным при оптимизации движения механизма с несколькими степенями подвижности

Рассмотрим другие критерии, основанные на оценке свойств особых положений. Формирование таких критериев может базироваться на следующих свойствах особых положений.

1. В особом положении обращается в нуль якобиан системы уравнений геометрического анализа механизма. Использование соответствующего критерия рассмотрено в [12].
2. При приближении к особому положению неограниченно возрастают движущие силы и моменты, уравновешивающие конечную по величине внешнюю нагрузку. Использование такого критерия рассмотрено в [13].
3. Появление в особом положении дополнительной локальной степени свободы приводит к появлению у механизма в этом положении нулевой собственной частоты. Описание такого критерия дано в [14].

Рассмотрим механизм, изображенный на рис. 1. Это платформа, в которой рабочий стол установлен на восьми ногах. Ноги платформы выполнены в виде гидроцилиндров, связанных сферическими шарнирами с самой платформой и с основанием. Механизм имеет восемь степеней под-

вижности и, соответственно, восемь входов. Для нормальной работы механизма достаточно иметь шесть входов, поэтому двигатели могут работать в режиме альтернативного включения, при котором в каждый момент с механизмом соединены только шесть из восьми двигателей (два двигателя выключены), или все одновременно.

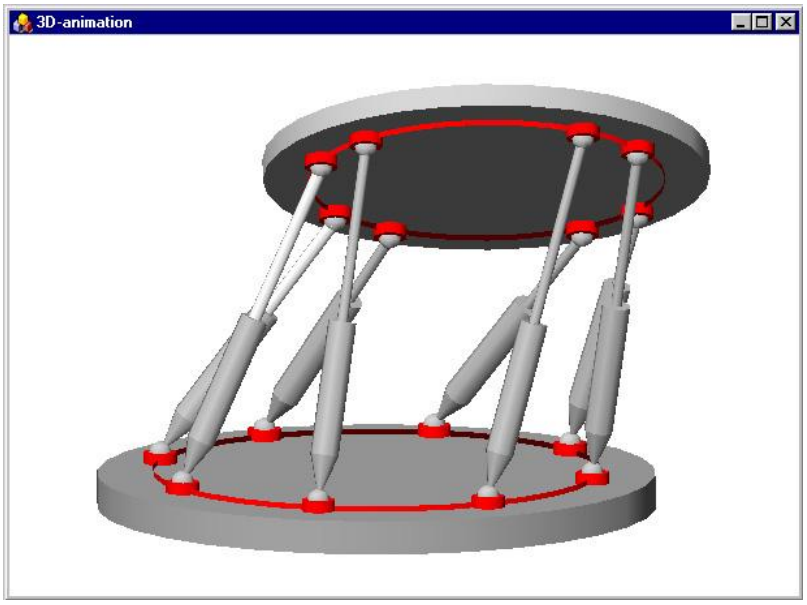


Рис. 1.

Чтобы определить, какие из двигателей включать в каждый момент времени при позиционировании платформы, введем три критерия качества конфигурации платформы (они базируются на трех свойствах особых положений, описанных выше).

За первый критерий качества конфигурации механизма можно принять модуль якобиана системы уравнений его геометрического анализа.

При приближении к особому положению механизма неограниченно растет абсолютная величина по крайней мере одной из движущих сил. В силу этого представляется разумным принять за второй критерий качества конфигурации механизма сумму квадратов движущих сил.

Рассмотрим машину с упругим механизмом. Будем предполагать, что каждый двигатель связан с приводимым им в движение звеном упругой передачей. Будем считать, что включены шесть входов, а два отключены. При этом упругие свойства передаточных механизмов отключенных приводов не учитываются. В результате за третий критерий качества конфигурации механизма можно принять значение низшей собственной частоты упругого механизма. Следует особо подчеркнуть, что упругость механизма вводится условно. Определяются собственные частоты механизма в ряде статических положений, находящихся вдоль его программной траектории.

В случае одновременной работы всех двигателей выбор движущих сил на заданном движении и при заданной нагрузке является неоднозначным. Получаем систему из шести уравнений с восьмью неизвестными, имеющую бесконечное множество решений. Последнее обстоятельство позволяет ставить задачу о минимизации суммы квадратов движущих сил. Решение такой задачи описано в [14].

Аналитическое решение задачи достаточно трудоемко, поэтому авторы остановились на численном методе расчета. Обычно в этом случае для силового расчета используют известные и широко распространенные программные средства: Mathcad [15-17], Matlab [18] и др. Для удобства визуального восприятия полученных результатов применяют анимацию кинематических схем механизмов [19]. Однако более удобным для интерактивной визуализации результатов расчета сложного пространственного механизма представляется пакет «Model Vision» [20], который и был выбран для проведения вычислительного эксперимента.

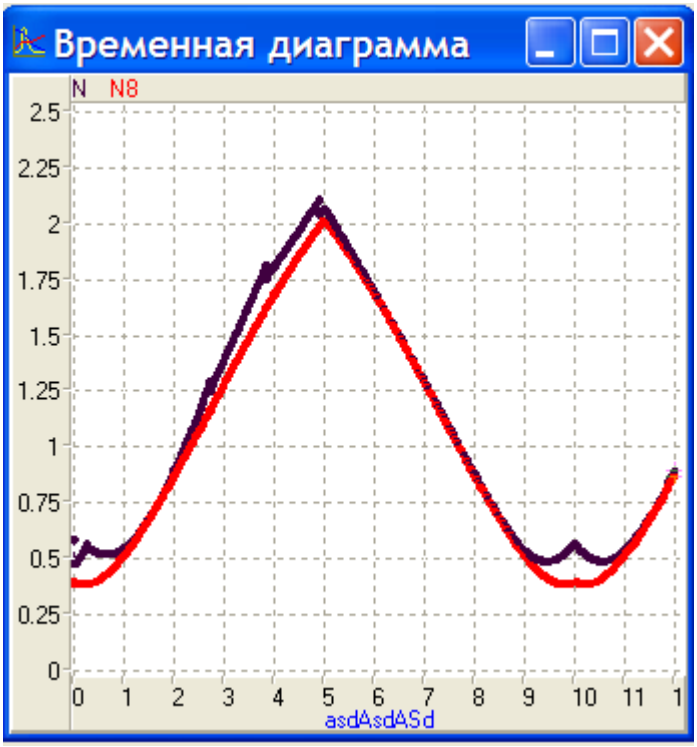


Рис. 2.

На рис. 2 показаны графики суммы квадратов движущих сил платформы при работе шести двигателей, включаемых по критерию минимума суммы квадратов движущих сил (N) и при работе всех восьми двигателей одновременно (N8).

Полученные в результате движущие силы обеспечивают минимум суммы квадратов движущих сил в каждой точке траектории. Сравнение суммы квадратов движущих сил с наименьшей из таких сумм, полученных

при использовании шести двигателей, позволяет оценить энергетическую выгодность работы всех двигателей одновременно. С точки зрения критерия суммы квадратов движущих сил и критерия низшей собственной частоты одновременное использование всех восьми двигателей также имеет преимущество. К преимуществам выбора альтернативных входов можно отнести простоту системы управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диментберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
2. Зиновьев В.А. Пространственные механизмы с низшими парами. – М.: Гостехиздат, 1952. – 432 с.
3. Мерцалов Н.И. Теория пространственных механизмов. – М.: Гостехиздат, 1951. – 206 с.
4. Uicker J.J. Velocity and Acceleration Analysis of Spatial Mechanisms Using 4x4 Matrices. – Northwestern Univers., the Technolog. Inst. Evanston, Illinois, 1963.
5. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1976. – 264 с.
6. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. – №2(123). – С. 170–176.
7. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 2000. 394 p.
8. 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.
9. Евграфов А.Н. Теория механизмов и машин: учеб. пособие / А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н.Петров. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 248 с.
10. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, используемых при компьютерном синтезе механизмов. // 2-я Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 48-52.
11. Евграфов А.Н. Об угле давления как о критерии качества передачи сил // Машиноведение. Сборник научных трудов. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. С .84-90.

12. Коловский М.З. Об одном критерии качества положений многоподвижных рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997, № 2.
13. Коловский М.З. Слоущ А.В. Об управлении движением замкнутых рычажных с избыточными входами // Т.р. XXV летней школы «Нелинейные колебания – 97». СПб., Институт проблемы машиноведения РАН, 1998.
14. Коловский М.З., Петров Г.Н., Слоущ А.В. Об управлении движением замкнутых рычажных механизмов с несколькими степенями свободы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000, № 4.
15. Петров Г.Н. Алгоритм кинетостатического расчета на ЭВМ замкнутых рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 3.
16. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса // Теория механизмов и машин. – 2003. – № 2. – С. 50-63.
17. 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.
18. Мкртычев О.В. Компьютерное моделирование при силовом расчёте плоских механизмов // Теория механизмов и машин. – 2013. – № 1. – Том 11. – С. 77-83.
19. 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.
20. Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «ModelVision» // Теория механизмов и машин. – 2004. – № 1. – Том 2. – С. 75-79.

A.N. Evgrafov, G.N. Petrov

THE DRIVE SELECTION OF THE MECHANISM WITH EXCESSIVE INPUTS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

This article describes spatial platform with excessive inputs. To estimate quality of given configuration there were used such criteria like Jacobi module of equation systems of geometry analysis of mechanism, sum of squares of balancing forces and minimum natural frequency of mechanism under fixed engines and flexible transmission device. There is also a description of different

variations of end-effector movement under the pre-set law with alternative switching on of the engines under the three mentioned criteria, as well as the variations with simultaneous work of all engines.

Key words: spatial mechanism, excessive input, drive selection.

REFERENCES

[1] Dimentberg F.M. Teoriya prostranstvennyx sharnirnyx mexanizmov. – M.: Nauka, 1982. – 336 s. (rus.)
[2] Zinovev V.A. Prostranstvennye mexanizmy s nizshimi parami. – M.: Gostexizdat, 1952. – 432 s. (rus.)
[3] Mercalov N.I. Teoriya prostranstvennyx mexanizmov. – M.: Gostexizdat, 1951. – 206 s. (rus.)
[4] Uicker J.J. Velocity and Acceleration Analysis of Spatial Mechanisms Using 4x4 Matrices. – Northwestern Univers., the Technolog. Inst. Evanston, Illinois, 1963.
[5] Mudrov P.G. Prostranstvennye mexanizmy s vrashhatelnymi parami. – Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1976. – 264 s. (rus.)
[6] Hrostitskiy A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometriya i kinematika prostranstvennogo shestizvennika s izbyitochnyimi svyazyami // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2011. – №2(123). – S. 170–176. (rus.)
[7] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 2000. 394 p.
[8] Teoriya mexanizmov i mashin: ucheb. posobie dlya studentov vyssh. ucheb. zavedenij / M.Z.Kolovskij, A.N.Evgrafov, Yu.A.Semenov, A.V.Sloushh. – 3-e izd., ispr. – M.: izd. center «Akademiya», 2008. – 560 s. (rus.)
[9] Evgrafov A.N. Teoriya mexanizmov i mashin: ucheb. posobie / A.N.Evgrafov, M.Z. Kolovskij, G.N.Petrov. – 2-e izd. – SPb.: izd-vo politexn. un-ta, 2008. – 248 s. (rus.)
[10] Evgrafov A.N., Petrov G.N. O nekotoryx kriteriyax kachestva, ispolzuemyx pri kompyuternom sinteze mexanizmov. // 2-ya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie». – SPb.: izd-vo politexn. un-ta, 2012. S. 48-52. (rus.)
[11] Evgrafov A.N. Ob ugle davleniya kak o kriterii kachestva peredachi sil // Mashinovedenie. Sbornik nauchnyx trudov. – SPb.: izd-vo SPbGTU, 1997. S. 84-90. (rus.)

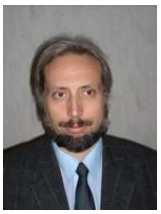
[12] Kolovskij M.Z. Ob odnom kriterii kachestva polozhenij mnogopodvizhnyx rychazhnyx mexanizmov // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1997, № 2. (rus.)
[13] Kolovskij M.Z. Sloushh A.V. Ob upravlenii dvizheniem zamknutyx rychazhnyx s izbytochnymi vxodami // T.r. XXV letnej shkoly «Nelinejnye kolebaniya – 97». SPb., Institut problemy mashinovedeniya RAN, 1998. (rus.)
[14] Kolovskij M.Z., Petrov G.N., Sloushh A.V. Ob upravlenii dvizheniem zamknutyx rychazhnyx mexanizmov s neskolkimi stepenyami svobody // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2000, № 4. (rus.)
[15] Petrov G.N. Algoritm kinetostaticheskogo rascheta na EVM zamknutyx rychazhnyx mexanizmov // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1993. № 3. (rus.)
[16] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometricheskij i kinetostaticheskij analiz ploskix rychazhnyx mexanizmov vtorogo klassa // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2003. – № 2. – S. 50-63. (rus.)
[17] Ziborov K. A., Macyuk I. N., Shlyaxov E. M. Silovoj analiz mexanizmov s pomoshhyu programmy mathcad // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2010. – № 1. – Tom 8. – S. 83-88. (rus.)
[18] Mkrtychev O.V. Kompyuternoe modelirovanie pri silovom raschyote ploskix mexanizmov // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2013. – № 1. – Tom 11. – S. 77-83. (rus.)
[19] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Kompyuternaya animaciya kinematicheskix sxem v programmax excel i mathcad // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2008. – № 1. – Tom 6. – S. 71-80. (rus.)
[20] Petrov G.N. Kompyuternoe modelirovanie mexanicheskix sistem v srede «ModelVision» // Teoriya mexanizmov i mashin. – 2004. – № 1. – Tom 2. – S. 75-79. (rus.)

.

УДК 621.01

В. Д. Златанов

СТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ДВУХМАССОВОМ МАШИННОМ АГРЕГАТЕ С КАРДАННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ



Васил Димитров Златанов, доктор (к.т.н.), доцент кафедры “Техническая механика и машиноведения”
Университет Пищевых Технологий - Пловдив
бул. Марица 26, Пловдив 4002, Болгария.
Тел.: +359 (32) 603827, E-mail: vassilzlatanov@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы исследования стационарных колебаний и динамической нагрузки двухмассового машинного агрегата с линейноэластичным промежуточным валом карданной передачи. Представлен один метод аналитического динамического исследования на основе методов нелинейной механики.

Ключевые слова: машинный агрегат, карданная передача, метод малого параметра, метод Ляпунова – Линстеда – А. Н. Крылова

Научно-технический прогресс немыслим без создания высокоэффективной техники, механизмов и их совершенствования. Механические системы с карданными передачами характеризируются большой нагрузочной способностью, компактностью, возможностью передавать крутящий момент с углам перекоса валов до 45° и при больших скоростях. В карданных передачах использован принцип действия шарнира Гука. Механике шарнира Гука посвящено большое число работ [1,5,7,9,12,13,17]. Интерес к механическим системам с карданными передачами и агрегатам, имея ввиду „богатые” и интересные их механические свойства, остается высоким [2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 18,19]. Совершенствование таких механических передач вызывают необходимость дальнейшего развития методов расчёта, уточнения и совершенствования существующих методов.

В работе представлен метод аналитического динамического исследования двухмассового машинного агрегата с карданной передачей, учитывая эластичности ее промежуточного вала.

Динамическая модель представлена в виде двухмассовой системы (рис. 1).

Двигатель М − электродвигатель с постоянным моментом инерции $J_M = J_1 = \text{const}$ ротора и двигательным моментом, изменяющуюся по

линейному закону $T_M = a - b\omega_1$, где постоянные величины a и b определены техническими данными электродвигателя, а ω_1 угловая скорость ротора.

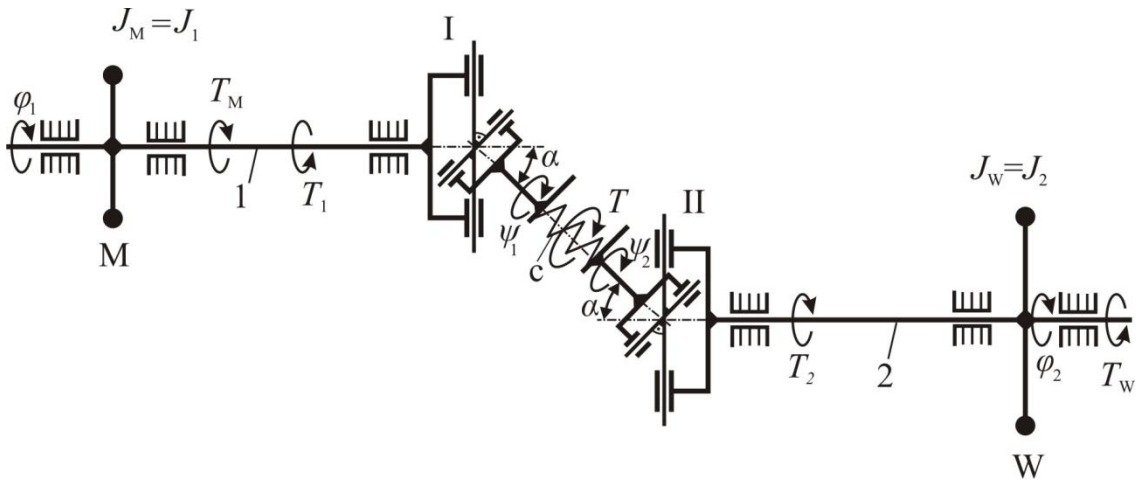


Рис. 1. Динамическая модель агрегата

Карданная передача рассматривается как плоская двухшарнирная система. В расчётной динамической схеме принято: 1 и 2 − соответственно ведущий и ведомый вал; I и II – шарниры Гука, связывающие валы 1 и 2 с промежуточным валом; α − угол между геометрическими осями 1-го, 2-го и промежуточного валов; φ_1 и φ_2 − углы поворота валов привода. Промежуточный вал рассматривается как эластичное тело с коэффициентом эластичности c, а ψ_1 и ψ_2 − углы поворота вилки промежуточного вала. Остальные элементы карданной передачи принимают за идеально твердое тело.

Рабочая машина W − ротационного типа с редуцированным к валу 2 постоянным моментом инерции $J_W = J_2$ и постоянным моментом сопротивления $T_W = c_W$.

Углы φ_i и ψ_i связаны зависимостями [1]:

$$\operatorname{tg}\varphi_i = \cos\alpha \operatorname{tg}\psi_i \qquad (i = 1,2), \tag{1}$$

а передаточные отношения двух пар вилок определяются из выражений

$$\delta_i = \frac{\psi_i}{\varphi_i} = \frac{\cos\alpha}{1 - \sin^2\alpha\cos^2\varphi_i} \qquad (i = 1,2), \tag{2}$$

По методу неопределенных коэффициентов из (2) получаются тождества [2]:

$$\delta_i = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} 2\lambda^k \cos(2k\varphi_i) \qquad (i = 1,2), \tag{3}$$

а после интегрирования:

$$\psi_i = \varphi_i + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda)^k}{k} \sin(2k\varphi_i) \qquad (i = 1,2). \tag{4}$$

В (3) и (4) положено:

$$\lambda = \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}. \tag{5}$$

Это малая величина $\left(\lambda < 1, \alpha < \frac{\pi}{4}\right)$ и в результате этого принимаем:

$$\delta_i = 1 + 2\lambda \cos(2\varphi_i), \quad \psi_i = \varphi_i + \lambda \sin(2\varphi_i) \ (i = 1,2). \tag{6}$$

Крутящие моменты $T_i (i = 1,2)$ в валах выражаются посредством крутящего момента T промежуточного вала:

$$T_i = T\,\delta_i \qquad (i = 1,2), \tag{7}$$

что является следствием предположения идеальности связей, а крутящий момент T принято, пропорционален деформации вала:

$$T = c(\psi_1 - \psi_2). \tag{8}$$

Замещая (6) и (8) в (7), пренебрегая членами, содержащими λ в степени выше первой, и получаем:

$$T_i = c\left\{(\varphi_1 - \varphi_2) + 2\lambda\left[(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(2\varphi_i) + \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2)\right]\right\}. \tag{9}$$

Дифференциальные уравнения движения двух ротирующих масс имеют вид:

$$\begin{aligned} J_1\ddot{\varphi}_1 &= a - b\dot{\varphi}_1 - c\left\{(\varphi_1 - \varphi_2) + 2\lambda\left[(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(2\varphi_1) + \right.\right. \\ &\qquad \left.\left. + \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2)\right]\right\}, \\ J_2\ddot{\varphi}_2 &= -c_W + c\left\{(\varphi_1 - \varphi_2) + 2\lambda\left[(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(2\varphi_2) + \right.\right. \\ &\qquad \left.\left. + \sin(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2)\right]\right\}. \end{aligned} \tag{10}$$

Для решения системы уравнения (10), в начале суммируют, а после этого вычитают, предварительно умножив на J_2 и J_1:

$$J_1\ddot{\varphi}_1 + J_2\ddot{\varphi}_2 = T_M - T_W + 2c\lambda(\varphi_1 - \varphi_2)\left(\cos(2\varphi_2) - \cos(2\varphi_1)\right), \tag{11}$$

$$\begin{aligned} J_1 J_2(\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2) &= J_2 T_M + J_1 T_W - c(\varphi_1 - \varphi_2)(J_1 + J_2) - \\ &\quad - 2c\lambda(\varphi_1 - \varphi_2)\left(J_2\cos(2\varphi_1) + J_1\cos(2\varphi_2)\right) - \\ &\quad - 2c\lambda(J_1 + J_2)\sin(\varphi_1 - \varphi_2)\cos(\varphi_1 + \varphi_2). \end{aligned} \tag{12}$$

Здесь вместо переменных φ_1 и φ_2 вводят нормальные координаты φ и θ:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \qquad , \qquad \theta = \frac{J_1\varphi_1 + J_2\varphi_2}{J_1 + J_2}, \tag{13}$$

откуда для первоначальных координат получают:

$$\varphi_1 = \theta + \frac{J_2}{J_1 + J_2}\varphi \qquad , \qquad \varphi_2 = \theta - \frac{J_1}{J_1 + J_2}\varphi . \tag{14}$$

Объект исследования – стационарный режим движения машинного агрегата, т.е. $T_M = T_W$ или $a - b\omega_{cm} = c_W$, откуда определяется стационарная угловая скорость $\omega'_{cm} = \dfrac{a - c_W}{b}$ и учитывая (13), система из (11) и (12) записывается в виде:

$$\left(J_1 + J_2\right)\ddot{\theta} = 2c\lambda\varphi\left[\cos\left(2\varphi_2\right) - \cos\left(2\varphi_1\right)\right] \tag{15}$$

$$\begin{aligned} J_1 J_2\ddot{\varphi} + c\varphi\left(J_1 + J_2\right) = c_W\left(J_1 + J_2\right) - 2c\lambda\varphi\left[J_2\cos\left(2\varphi_1\right) + J_1\cos\left(2\varphi_2\right)\right] - \\ - 2c\lambda\left(J_1 + J_2\right)\sin\varphi\cos\left(\varphi_1 + \varphi_2\right). \end{aligned} \tag{16}$$

Тригонометрические функции в правой стороне выражения (15) представляются посредством следующего развития в бесконечном степенном ряду:

$$\cos\left(2\varphi_1\right) - \cos\left(2\varphi_2\right) = \sum_{n=0}^{\infty}\left(-1\right)^n \frac{\left[\left(2\varphi_2\right)^{2n} - \left(2\varphi_1\right)^{2n}\right]}{2n!}. \tag{17}$$

Принимаем, что для углов $\varphi_i\left(i = 1,2\right)$ выполнены условия $2\varphi_i < 1$, поэтому после того используются только первые два ряда в развитии (17) и после учтения (13) и (14) получается:

$$\cos\left(2\varphi_1\right) - \cos\left(2\varphi_2\right) \approx 2\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)\left(\varphi_1 + \varphi_2\right) = 4\varphi\theta + \frac{2\left(J_2 - J_1\right)}{J_1 + J_2}\varphi^2. \tag{18}$$

Замещая (18) в (15) получается:

$$\left(J_1 + J_2\right)\ddot{\theta} = \lambda 4c\varphi^2\left[2\theta + \frac{\left(J_2 - J_1\right)}{J_1 + J_2}\varphi\right],$$

а имея ввиду, что $\dfrac{\left(J_2 - J_1\right)}{J_1 + J_2} < 1$ и $\varphi << 1$ то можно пренебречь вторым слагаемым и окончательно дифференциальное уравнение (15) записывается в виде:

$$\left(J_1 + J_2\right)\ddot{\theta} = \lambda\left(8c\theta\varphi^2\right), \tag{19}$$

где λ малый положительный параметр.

Тригонометрические функции в правой стороне выражения (16), учитывая принятые ограничения для углов $\varphi_i\left(i = 1,2\right)$, представляются следующим образом:

$$\sin\varphi \approx \varphi\ ,\ \cos\left(2\varphi_1\right)=\cos\left(2\theta+2\frac{J_2}{J_1+J_2}\varphi\right)\approx\cos\left(2\theta\right),\ \cos\left(2\varphi_2\right)=\cos\left(2\theta-\right.$$

$$\left.-2\frac{J_1}{J_1+J_2}\varphi\right)\approx\cos\left(2\theta\right),\cos\left(\varphi_1+\varphi_2\right)=\cos\left(2\theta+\frac{J_2-J_1}{J_1+J_2}\varphi\right)\approx\cos\left(2\theta\right),$$

где имеется ввиду, что $\varphi<<1$, $\frac{J_i}{J_1+J_2}<1$, $\frac{J_2-J_1}{J_1+J_2}<1$ $\left(i=1,2\right)$ и тогда дифференциальное уравнение (16) записывается в следующем каноническом виде:

$$\ddot{\varphi}+c\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}\varphi=c_W\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}-\lambda 4c\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}\cos\left(2\theta\right). \qquad (20)$$

Полагая $k^2=c\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}$ и вводя новую переменную:

$$\eta=\varphi-\frac{c_W}{k^2}\frac{J_1+J_2}{J_1J_2}=\varphi-\frac{c_W}{c}=\varphi-\varphi_{cm}, \qquad (21)$$

систему дифференциальных уравнений (19) и (20) приведем к виду:

$$\begin{gathered}\left(J_1+J_2\right)\ddot{\theta}=\lambda\left(b_{11}\theta+b_{12}\eta\theta+b_{13}\eta^2\theta\right),\\ \ddot{\eta}+k^2\eta=-\lambda 4k^2\cos\left(2\theta\right),\end{gathered} \qquad (22)$$

где λ – малый положительный параметр; $b_{11}=8c\varphi_{cm}^2$; $b_{12}=16c\varphi_{cm}$; $b_{16}=8c$, а φ_{cm} может рассматриваться как угол кручения промежуточного вала при предположении, что в его двух краях статично приложены моменты T_M и T_W.

Решение системы найдено посредством метода малого параметра, метода Ляпунова – Линстеда - А.Н. Крылова в комбинации с методом поэтапного интегрирования. В зависимости от принятых условий изменения углов $\varphi_i\left(i=1,2\right)$ время разбито на этапы. Зная начальные условия движения, можно проинтегрировать уравнения на первом этапе и определить $\theta(t),\eta(t),\dot{\theta}(t),\dot{\eta}(t)$ в конечном моменте времени. Эти конечные значения являются начальными для следующего этапа.

Решение выражения (22) в соответствие с требованиями использованных методов с точностью до первой степени малого параметра ищется в виде:

$$\theta(t)=\sigma_0(t)+\lambda\sigma_1(t)\quad ,\quad \eta(t)=\eta_0(t)+\lambda\eta_1(t)\ , \qquad (23)$$

полагая $p^2=k^2+\lambda h_1$, где h_1 – постоянная, подлежащая определению.

Приравняв к нулю коэффициенты при различных степенях λ, получаются уравнения:

$$\begin{aligned}&\left(J_1+J_2\right)\ddot{\sigma}_0=0\ \ ,\quad \ddot{\eta}_0+k^2\eta_0=0;\\&\left(J_1+J_2\right)\ddot{\sigma}_1=b_{11}\sigma_0+b_{12}\eta_0\sigma_0+b_{13}{\eta_0}^2\sigma_0,\quad \ddot{\eta}_1+k^2\eta_1=h_1\eta_0-4k^2\cos\left(2\sigma_0\right).\end{aligned}\tag{24}$$

Решение будем искать при начальных условиях:

$$\begin{aligned}&t=0\ ,\ \eta(0)=\varphi(0)-\varphi_{cm}=\varphi_0-\varphi_{cm}=\varphi_1(0)-\varphi_2(0)-\varphi_{cm},\\&\dot{\eta}(0)=\dot{\varphi}(0)=\dot{\varphi}_0=\dot{\varphi}_1(0)-\dot{\varphi}_2(0),\\&\sigma(0)=\theta_0=\frac{J_1\varphi_1(0)+J_2\varphi_2(0)}{J_1+J_2}\ \ ,\quad \dot{\sigma}(0)=\omega_{cm}=\frac{J_1\dot{\varphi}_1(0)+J_2\dot{\varphi}_2(0)}{J_1+J_2}.\end{aligned}\tag{25}$$

Эти условия выполняются, если функции $\sigma_0(t),\sigma_1(t),\eta_0(t),\eta_1(t)$:

$$\begin{aligned}&\eta_0(0)=\varphi_0-\varphi_{cm}\ ,\ \dot{\eta}_0(0)=\dot{\varphi}_0\ ,\ \eta_1(0)=0\ ,\ \dot{\eta}_1(0)=0;\\&\sigma_0(0)=\theta_0\ ,\ \dot{\sigma}_0(0)=\omega_{cm}\ ,\ \sigma_1(0)=0\ ,\ \dot{\sigma}_1(0)=0\ .\end{aligned}\tag{26}$$

Из первого и второго уравнения (24), при начальных условиях (26) для нормальных координат φ, θ и для первоначальных переменных φ_1, φ_2 порождающей линейной системы, находим:

$$\begin{aligned}&\theta=\sigma_0=\theta_0+\omega_{cm}t\ ,\ \varphi=\eta_0+\varphi_{cm}=\varphi_{cm}+A\cos\left(kt-\alpha\right),\\&\varphi_1=\left(\theta_0+\frac{J_2}{J_1+J_2}\varphi_{cm}\right)+\omega_{cm}t+A_1\cos\left(kt-\alpha\right),\\&\varphi_2=\left(\theta_0-\frac{J_1}{J_1+J_2}\varphi_{cm}\right)+\omega_{cm}t-A_2\cos\left(kt-\alpha\right),\end{aligned}\tag{27}$$

где $A=\sqrt{\left(\varphi_0-\varphi_{cm}\right)^2+\left(\frac{\dot{\varphi}_0}{k}\right)^2}$, $\operatorname{tg}\alpha=\frac{\dot{\varphi}_0}{k\left(\varphi_0-\varphi_{cm}\right)}$, $A_1=\frac{J_2}{J_1+J_2}A$, $A_2=\frac{J_1}{J_1+J_2}A$.

Крутящий момент, нагружающий вал в нулевом приближении можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}&T=c\left(\psi_1-\psi_2\right)=c\left[\left(\varphi_1-\varphi_2\right)+\lambda\left(\sin2\varphi_1-\sin2\varphi_2\right)\right]\approx\\&\approx c\varphi\left[1+2\lambda\cos2\theta\right]=\left[c_W+c\,A\cos\left(k\,t-\alpha\right)\right]\left[1+2\lambda\cos\left(2\theta_0+2\omega_{cm}t\right)\right].\end{aligned}\tag{28}$$

Имеем постоянную часть c_W, на которую наложена гармонически изменяющаяся составляющая с частотой k и амплитудой A и при двухмассовом агрегате с линейноэластичным валом между двигателем и рабочей машиной. Гармоническая составляющая второго слагаемого в последнем выражении (28) связана с использованием карданной передачи в динамической модели.

После замещения выражения (27) в четвертом уравнении на (24) из условия отсутствия векового члена, получается: $h_1=0\Rightarrow p^2=k^2$. Так как начальные условия (26) − нулевые, то функция $\eta_1(t)$ определена с помощью интеграла Дюамеля:

$$\eta_1 = \frac{1}{k}\int_0^t \sin k(t-\tau)\left[-4k^2\cos(2\theta_0 + 2\omega_{cm}\tau)\right]d\tau\,. \qquad (29)$$

Нормальная координата φ определена после решения второго уравнения в (23), и в первом приближении получена в виде:

$$\varphi = \varphi_{cm} + A\cos(kt-\alpha) + \lambda\frac{4k^2}{k^2 - 4\omega_{cm}{}^2}\left\{-\cos(2\theta_0)\left[\cos(2\omega_{cm}t) - \cos(kt)\right] + \right.$$
$$\left. + \sin(2\theta_0)\left[\sin(2\omega_{cm}t) - \frac{2\omega_{cm}}{k}\sin(kt)\right]\right\}. \qquad (30)$$

Замещая (27) в третьем уравнении (24), учитывая нулевые начальные условия (26), используя интеграл Дюамеля для определения σ_1

$$\sigma_1 = \frac{1}{J_1 + J_2}\int_0^t (t-\tau)\left[b_{11}(\theta_0 + \omega_{cm}\tau) + b_{12}(\theta_0 + \omega_{cm}\tau)A\cos(k\tau - \alpha) + \right.$$
$$\left. + b_{13}(\theta_0 + \omega_{cm}\tau)A^2\cos^2(k\tau - \alpha)\right]d\tau\,, \qquad (31)$$

и после преобразований, для нормальной координаты θ в первом приближении получено:

$$\theta = \theta_0 + \omega_{cm}t + \lambda\frac{1}{J_1 + J_2}\left\{4c\varphi_{cm}{}^2\left(\theta_0 + \frac{\omega_{cm}}{3}t\right)t^2 + \right.$$
$$+ \frac{t}{k^2}2c\omega_{cm}\left[-8\varphi_{cm}\left((\varphi_0 - \varphi_{cm})\cos(kt) + \frac{\dot\varphi_0}{k}\sin(kt)\right) - \left(\frac{1}{2}\left((\varphi_0 - \varphi_{cm})^2 + \right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. + \left(\frac{\dot\varphi_0}{k}\right)^2\right)\cos(2kt) + (\varphi_0 - \varphi_{cm})\frac{\dot\varphi_0}{k}\sin(2kt)\right)\right] + 16c\varphi_{cm}\left[-\left(\theta_0(\varphi_0 - \varphi_{cm}) + \right.\right.$$
$$\left.\left. + 2\omega_{cm}\frac{\dot\varphi_0}{k}\right)\cos(kt) + \left(-\theta_0\frac{\dot\varphi_0}{k} + 2\frac{\omega_{cm}(\varphi_0 - \varphi_{cm})}{k}\right)\sin(kt)\right] +$$
$$+ 2c\left[-\left(0{,}5\theta_0\left((\varphi_0 - \varphi_{cm})^2 + \left(\frac{\dot\varphi_0}{k}\right)^2\right) + \frac{\omega_{cm}(\varphi_0 - \varphi_{cm})\dot\varphi_0}{k^2}\right)\cos(2kt) + \right.$$
$$\left.\left. + \left(0{,}5\omega_{cm}\left((\varphi_0 - \varphi_{cm})^2 + \left(\frac{\dot\varphi_0}{k}\right)^2\right) - \theta_0(\varphi_0 - \varphi_{cm})\frac{\dot\varphi_0}{k}\right)\sin(2kt)\right]\right\}. \qquad (32)$$

Полученные функции в (30) и (32) позволяют определить законы движения машинного агрегата через (14) с точностью до первого приближения, а посредством (8) или (28) и крутящий момент, нагружающий промежуточный вал на рассматриваемом этапе поэтапного интегрирования.

В работе рассмотрена динамическая модель механической системы с карданной передачей в виде двухмассовой системы. Карданная передача рассматривается как плоская двухшарнирная система. Промежуточный вал представлен как линейноэластичное тело. Определены законы движения агрегата и изменение динамического крутящего момента в промежуточном вале на основе методов малого параметра, Ляпунова – Линстеда – А.Н. Крылова и поэтапного интегрирования.

Представленный аналитический метод дополняет известные в теории методы динамического исследования механических систем с карданными передачами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. А.М. Писарев, Б.И. Чешанков, С.Н. Бъчваров. Усукващи трептения в карданни валове // Годишник на ВТУЗ по Приложна механика. – 1968. – Т.IV – № I. – С.13-22.
3. А.М. Писарев. Динамика одинарной карданной передачи с упругими звеньями и двигателем. // Доклады Болгарской АН. – 1969. – Т.22. – №3. – С. 241-244.
4. Б.И. Морозов, И.К. Пчелин, А.А. Хачатуров. Задача о крутильных колебаниях трансмиссии, содержащей карданные передачи неравных скоростей // Труды НАМИ. – 1965. – №74, С. 19—33.
5. Кожевников С.Н., Перфильев П.Д. Карданные передачи. К.: Техника, 1978. – 254 с.
6. К.М. Басс, В.В. Плахотник, В.В. Кривда. Математическая модель колебаний карьерного автосамосвала при прямолинейном движении. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междун. науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012 – С. 161 – 165.
7. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики, том второй. М.: Наука, 1983. – 640 с.
8. Л.В. Ефремов. Крутильные колебания привода силовой установки с эластичной муфтой типа LMD. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междун. науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 – С. 318 – 325.
9. Малаховский Я.Э., Лапин А.А., Венедеев Н.К. Карданные передачи. М.: Машгиз, 1962. – 155 с.
10. О.М. Томчина, В.В. Резниченко, О.В. Терентьева. Исследование динамики двухроторной вибрационной установки с учетом упругости карданных валов. // Современное машиностроение. Наука

и образование: Материалы Междун. науч.-практ. Конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 – С. 841 – 850.
11. П.Д. Перфильев. Крутильные колебания в приводе с карданной передачей // Труды ИПИ. – 1972. – №75, С. 265-273.
12. Поляков А.А. Основы прочности и динамики одного класса нелинейных пространственных шарнирно-оболочных систем. . – Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. . – Екат.: УГТУ, 1999. – 458 с.
13. С.Н. Бъчваров, А.М. Писарев, Б.И. Чешанков. Механика на карданно движение на твърдо тяло // Годишник на ВТУЗ по Приложна механика. – 1967. – Т.III – № II. – С.195-205.
14. С.Н. Бъчваров, В.Д. Златанов, С.Н. Делчева. Динамика машинного агрегата с упругим валом и квадратической характеристикой исполнительного механизма (часть I). [Электронный ресурс] // Теория механизмов и машин. 2005. Т 3. № 1(5) URL: http://tmm.spbstu.ru/5/zlatanov_2005.pdf
15. С.Н. Бъчваров, В.Д. Златанов, С.Н. Делчева. Динамика машинного агрегата с упругим валом и квадратической характеристикой исполнительного механизма (часть II). [Электронный ресурс] // Теория механизмов и машин. 2006. Т 4. № 1(7) URL: /http://tmm.spbstu.ru/7/buchvarov-2.pdf
16. С.Н. Кожевников, П.Д. Перфильев . Исследование крутильных колебании в приводе с поликарданной передачей // Теория механизмов и машин. – К.: Изд-во АН УССР, 1974. – №16, – С. 32-39.
17. Duditza F. Kardangelenkgetnebe und ihre Anwendungen. Dusseldorf: VDI — Verlag GmbH, 1973. – 169 p.
18. G. Bulut, Z. Porlar. Dynamic stability of a shaft system connected through a Hooke’s joint // Mechanism and Machine Theory. – 2011. – V.46 – № 11. – P.1689-1695.
19. SF. Asokantan, PA. Meehan. Non-linear vibration of a torsional system driven by a Hooke’s joint // Journal of Sound and Vibration. – 2000. – V.233 – № 2. – P.297-310.

V.D. Zlatanov

STATIONARY OSCILLATION IN TWO-MASS MACHINE AGGREGATE WITH UNIVERSAL-JOINT DRIVE

University of Food Technologies, Bulgaria

Abstract

The article is devoted questions of stationary oscillation and dynamic loading of the two-mass machine aggregate with linearly elastic intermediate shaft of universal drive are considered. One method of analytical dynamic research on the basis of methods of nonlinear mechanics is presented.

Key words: machine aggregate, universal-joint drive, the Lindstedt-Poincaré method.

REFERENCES

[1] Artobolevskij I.I. Teoriia mehanizmov i mashin. M.: Nauka, 1988. – 640 p. (rus.)

[2] A.M. Pisarev, B.I. Cheshankov, S.N. Buchvarov. Usukvashti trepteniia v kardanni valove // Godishnik na VTUZ po Prilozhna mehanika. – 1968. – V.IV – № I. – P.13-22. (bul.)

[3] A.M. Pisarev. Dinamika odinarnoj kardannoj peredachi s uprugimi zvenyiami i dvigatelem. // Dokladi Bolgarskoj AN. – 1969. – V.22. – №3. – P. 241-244. (rus., bul.)

[4] B.I. Morozov, I.K. Pchelin, A.A. Hachaturov. Zadacha o krutilnah kolebaniiah transmissii, soderzhashtej kardannae peredachi neravnah skorostej // Trudai NAMI. – 1965. – №74, P. 19—33. (rus.)

[5] Kozhevnikov S.N. , Perfileev P.D. Kardannae peredachi. K.: Tehnika, 1978. – 254 p. (rus.)

[6] K.M. Bass, V.V. Plahotnik, V.V. Krivda. Matematicheskaia model kolebanij kariernovo avtosamosvala pri priamolinejnom dvizhenii. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materiali Mezhdun. nauch.-prakt. Konferencii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012 – P. 161 – 165. (rus.)

[7] Lojtsyanskij L.G., Lurie A.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki, tom vtoroj. M.: Nauka, 1983. – 640 p. (rus.)

[8] L.V. Efremov. Krutilnie kolebaniia privoda silovoj ustanovki s elastichnoj muftoj tipa LMD. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materiali Mezhdun. nauch.-prakt. Konferencii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013 – P. 318 – 325. (rus.)

[9] Malahovskij Ia.E., Lapin A.A., Venedeev N.K. Kardannae peredachi. M.: Mashgiz, 1962. – 155 p. (rus.)
[10] O.M. Tomchina, V.V. Reznichenko, O.V. Terenteva. Issledovanie dinamiki dvuhrotornoj vibracionnoj ustanovki s uchetom uprugosti kardannыh valov. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materiali Mezhdun. nauch.-prakt. Konferencii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013 – P. 841 – 850. (rus.)
[11] P.D. Perfileev. Krutilnae kolebaniia v privode s kardannoj peredachej // Trudai IPI. – 1972. – №75, P. 265-273. (rus.)
[12] Poliakov A.A. Osnovi prochnosti i dinamiki odnogo klassa nelinejnah prostranstvennah sharnirno-obolochnah sistem. . – Dissertaciia na soiskanie uchenoj stepeni d.t.n. . – Ekat.: UGTU, 1999. – 458 p. (rus.)
[13] S.N. Buchvarov, A.M. Pisarev, B.I. Cheshankov. Mehanika na kardanno dvizhenie na tvyrdo tialo // Godishnik na VTUZ po Prilozhna mehanika. – 1967. – V.III – № II. – P.195-205. (bul.)
[14] S.N. Bychvarov, V.D. Zlatanov, S.N. Delcheva. Dinamika mashinnogo agregata s uprugim valom i kvadraticheskoj harakteristikoj ispolnitelnogo mehanizma (chast I). [Elektronnij resurs] // Teoriia mehanizmov i mashin. 2005. T 3. № 1(5) URL: http://tmm.spbstu.ru/5/zlatanov_2005.pdf (rus.)
[15] S.N. Bychvarov, V.D. Zlatanov, S.N. Delcheva. Dinamika mashinnogo agregata s uprugim valom i kvadraticheskoj harakteristikoj ispolnitelnogo mehanizma (chast II). [Elektronnij resurs] // Teoriia mehanizmov i mashin. 2006. T 4. № 1(7) URL: /http://tmm.spbstu.ru/7/buchvarov-2.pdf (rus.)
[16] S.N. Kozhevnikov, P.D. Perfileev . Issledovanie krutilnah kolebanii v privode s polikardannoj peredachej // Teoriia mehanizmov i mashin. – K.: Izd-vo AN USSR, 1974. – №16, – V. 32-39. (rus.)
[17] Duditza F. Kardangelenkgetnebe und ihre Anwendungen. Dusseldorf: VDI — Verlag GmbH, 1973. – 169 p.
[18] G. Bulut, Z. Porlar. Dynamic stability of a shaft system connected through a Hooke's joint // Mechanism and Machine Theory. – 2011. – V.46 – № 11. – P.1689-1695.
[19] SF. Asokantan, PA. Meehan. Non-linear vibration of a torsional system driven by a Hooke's joint // Journal of Sound and Vibration. – 2000. – V.233 – № 2. – P.297-310.

УДК 621.01

В.И.Каразин[1], Д.П.Козликин[2], А.А.Суханов[3], И.О.Хлебосолов[4]

ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ УСТОЙЧИВОГО ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗГРУЖЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

[1]Владимир Игоревич Каразин, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru

[2]Денис Петрович Козликин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com

[3]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

[4]Игорь Олегович Хлебосолов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: khlebosolov@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы динамического уравновешивания центробежных сил инерции в ротационных вибростендах. Рассматривается устойчивая схема автоматического разгружения ротора вибратора, установленного на платформе центробежного испытательного стенда.

Ключевые слова: центробежный испытательный стенд, вибрации, устойчивость, уравновешивание инерционных сил.

1. Постановка задачи и проблемы реализации

Испытания различных устройств на прочность при механических вибрациях осуществляется на специальных вибростендах, разделяющиеся по времени воздействия на испытуемые изделия на две большие группы:

кратковременного действия и длительного действия. К первым, в частности, относятся виброударные механические стенды, подробно рассмотренные в [1-4]. К недостаткам таких стендов можно отнести отсутствие возможности наложения на вибрации большого постоянного ускорения. Такая возможность осуществима в стендах второй группы. В частности, в ротационных вибростендах, функционированию которых и возникающим при этом проблемам посвящена настоящая работа.

Ротационный или центробежный вибростенд представлен на рис.1. Шпиндель 1 вращается двигателем Д с угловой скоростью Ω, обеспечивающей заданное линейное центростремительное ускорение A_0. На конце платформы 2 на расстоянии R от оси вращения установлен электромеханический вибратор 3, создающий радиальные вибрации стола вибратора массой m_0, на котором размещено испытуемое изделие массой m_1. Упругий элемент вибратора имеет небольшую жесткость c, чтобы его собственная частота была ниже рабочего частотного диапазона вибратора.

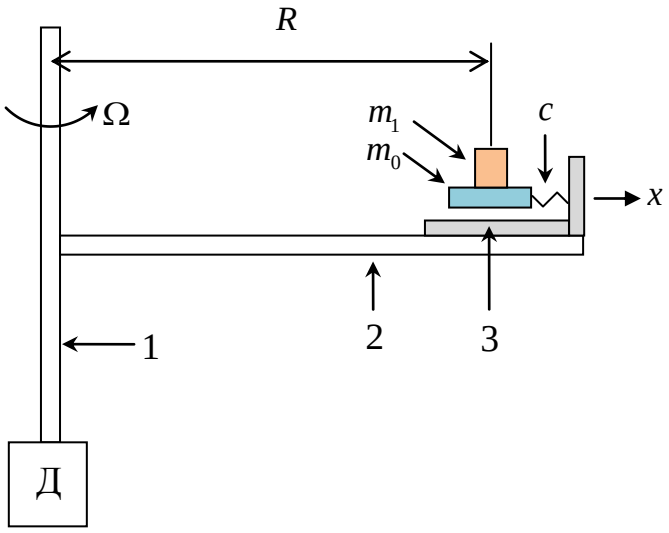


Рис. 1. Центробежный вибростенд

Особенностями центробежных вибростендов являются достаточно жесткие условия их эксплуатации и чрезвычайно широкие диапазоны требуемых ускорений и частот. Так, например, рассматриваемый вибростенд должен обеспечить линейные ускорения в диапазоне 10 – 150 g ($g = 9.81\ м/с^2$ – ускорение свободного падения), на которое накладываются радиальные вибрации с частотой от 5 до 2000 Гц при ускорениях на пустом столе до 100 g с максимальной амплитудой до 20 мм. Максимальная электромагнитная сила вибратора 5 m, масса изделия 0 – 50 $кг$, радиус размещения изделия $R = 2.5\ м$. Собственная частота вибратора k примерно равна 3 Гц.

Следствием указанных широких требований к вибростенду является полная неработоспособность его исходной классической схемы, представленной на рис. 1. Чтобы убедиться в этом найдем статическое смещение x_0 пустой платформы вибратора под действием центробежной силы инерции при максимальном линейном ускорении $A_0 = 150\ g$. Вначале найдем жесткость упругого элемента вибратора c по его собственной частоте k.

$$c = k^2 m_0 = (3 \cdot 2\pi)^2\, 50 = 17765\ Н/м.$$

Тогда

$$x_0 = \frac{F_0}{c} = \frac{m_0 A_0}{c} = \frac{50 \cdot 150 \cdot 9.81}{17765} = 4.14\ м,$$

что совершенно недопустимо! Заметим, что стол вибратора с **изделием** переместится еще дальше!

2. Традиционные схемы статического разгружения центробежных сил инерции

Для уменьшения статического отклонения стола вибратора существует нехитрые схемы динамической разгрузки центробежных сил инерции. Некоторые из них рассмотрены в [5-12]. Основная идея заключается в прикреплении к столу вибратора посредством штанги 4 (рис.2) противовеса соответствующей массой m, создающей компенсирующую разгружающую силу $-F_0$.

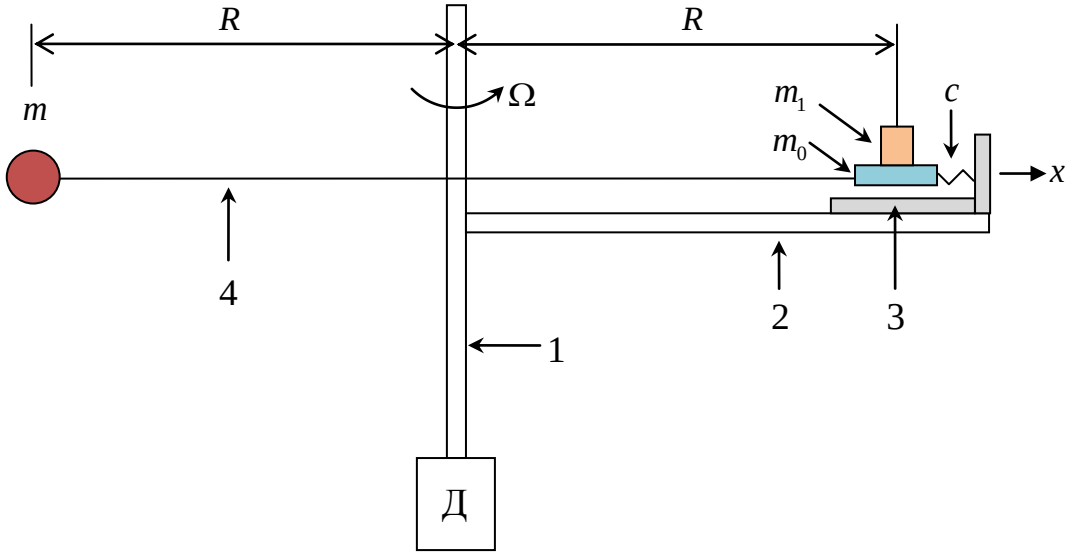


Рис. 2. Разгруженный центробежный вибростенд

При равенстве плечей вибратора и противовеса (расстояний R от соответствующих центров масс до оси вращения) масса противовеса должна быть равна

$$m = m_0 + m_1. \tag{1}$$

Однако проблема не ограничивается точным подбором массы противовеса (1). Более актуальной является проблема возможной потери устойчивости вращающихся масс. Напишем уравнение относительного движения масс вдоль радиуса вращающейся платформы 2 при условии выполнения баланса плечей и масс (1) без вибраций ротора вибратора и без установленного изделия:

$$2m_0\ddot{x} = -cx + m_0\Omega^2\left(R + x\right) - m_0\Omega^2\left(R - x\right), \tag{2}$$

где x - радиальное отклонение стола вибратора от положения динамического равновесия. Сокращая одинаковые по величине и противоположные по направлению силы инерции, получаем уравнение

$$2m_0\ddot{x} + m_0\left(k^2 - 2\Omega^2\right)x = 0, \tag{3}$$

качественно совпадающее с [13, с.41]. Устойчивость равновесного состояния зависит от знака обобщенной динамической жесткости $C = m_0\left(k^2 - 2\Omega^2\right)$. При $C < 0$ произойдет потеря устойчивости и провоцирование аварийной ситуации, что совершенно недопустимо!

Найдем критическую скорость вращения шпинделя стенда из условия $C = 0$. Она составляет

$$\Omega_{кр} = \frac{k}{\sqrt{2}} = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2.12\ Гц. \tag{4}$$

Определим теперь требуемую скорость вращения шпинделя стенда для получения максимального линейного ускорения $A_0 = 150\ g$:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{A_0}{R}} = \sqrt{\frac{150 \cdot 9.81}{2.5}} = 24.26\ рад/с = 3.86\ Гц > \Omega_{кр}. \tag{5}$$

Таким образом, даже при пустом столе при больших линейных ускорениях гарантирована потеря устойчивости. При установке на стол вибратора испытуемого изделия собственная частота ротора вибратора уменьшится и критическая скорость вращения шпинделя стенда также снизится, уменьшая тем самым рабочий диапазон линейных ускорений.

Другой возможной схемой динамической разгрузки вибростенда является установка вместо или в дополнение к постоянному противовесу дополнительной легкой пневматической пружины ротора вибратора [6]. Однако при этом неизбежно и нежелательно увеличится собственная частота колебаний ротора вибратора и, кроме того, увеличится требуемое для вибраций усилие электромагнита, которое вибратор может и не выдать. При этом нелинейность упругой характеристики пневматической пружины усугубляет проблему устойчивости и делает перспективы использования пневматического разгружения весьма призрачными. Отметим, что использование в этих целях металлических пружин еще хуже вследствие наличия у них подвижных распределенных масс и широкого спектра собственных частот.

Указанные недостатки известных схем динамической компенсации центробежных сил инерции вибростендов требуют разработки новых схем динамического разгружения вибростендов, принципиально устойчивых не только к начальным условиям, но и к изменениям параметров системы (например, переменность массы испытуемого изделия или скорость вращения).

3. Устойчивая схема автоматического разгружения ротора вибратора

На рис.3 представлена одна из возможных схем автоматического разгружения ротора вибратора от центробежной силы инерции, обеспечивающая устойчивость стационарного равновесия в достаточно широком диапазоне изменения параметров и начальных условий.

Отличие от предыдущей схемы рис.2 заключается в том, что схема разгрузки здесь дополняется жестким прямоугольным треугольником 5 ABC, шарнирно соединенным со штангой 4 в точке прямого угла C. При этом противовес массой m размещен в крайней вершине B этого треугольника на том же расстоянии R от оси вращения. Нижняя вершина треугольника A шарнирно укреплена на другой платформе 6, также вращающейся вместе со шпинделем 1. При этом катет треугольника BC является как бы продолжение прямолинейной штанги 4, а катет AC параллелен оси вращения в исходном состоянии.

На качественном уровне устойчивость приведенной схемы разгружения объясняется следующим образом. Пусть по каким-либо причинам стол вибратора с установленным изделием сместится, например, вправо на некоторую величину x. Тогда примерно на эту же величину сместится и точка C треугольника 5. При этом последний повернется относительно шарнира A по часовой стрелке на соответствующий угол. Но тогда дополнительно к центробежной силе инерции, приложенной к

противовесу m (немного уменьшенной), возникнет восстанавливающий момент, приложенный к треугольнику 5, направленный против часовой стрелки. Этот момент вернет треугольник в исходное положение и вместе с ним и стол вибратора с испытуемым изделием.

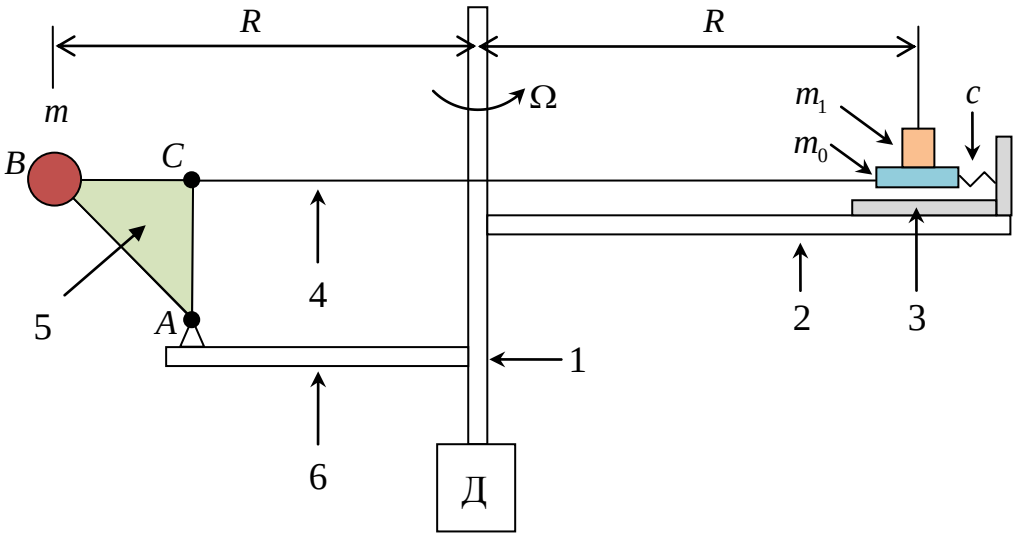


Рис. 3. Устойчивый самоуравновешенный центробежный вибростенд

При изменении массы изделия m_1 устойчивость схемы разгрузки сохранится, только равновесное положение немного изменится: треугольник 5 повернется таким образом, чтобы суммарное влияние силы инерции и момента, действующих на противовес, компенсировали силу инерции, действующую на ротор вибратора.

Рассмотренная схема автоматической разгрузки позволяет при необходимости удерживать ротор вибратора на одном и том же расстоянии от оси вращения при различных массах изделия. Для этого надо соответствующим образом корректировать массу противовеса или перемещать шарнир А по платформе 6.

Для точного определения условия устойчивости предлагаемой схемы разгружения обратимся к рис. 4. Здесь m - масса стола вибратора с установленным на нем испытуемым изделием и масса противовеса, размещенного на таком же расстоянии R от оси вращения, что и стол вибратора, x - радиальное смещение стола вибратора от положения равновесия, $\Delta\alpha$ - угол поворота треугольника АВС, соответствующий радиальному смещению x.

Найдем обобщенную динамическую жесткость C при отклонении стола вибратора на величину x.

Результирующая восстанавливающая сила при этом равна

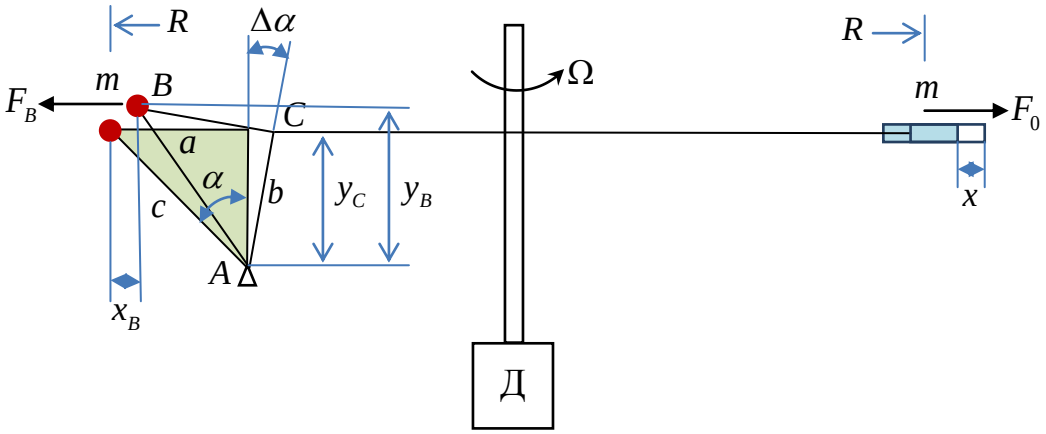


Рис. 4. Отклонение от положения равновесия

$$F = -Cx = -cx + F_0 - F_C\,, \tag{6}$$

где F_0 - центробежная сила инерции, действующая на стол вибратора:

$$F_0 = m\Omega^2\left(R + x\right), \tag{7}$$

F_C - центробежная сила инерции, действующая на противовес, но приведенная к точке С треугольника АВС. Последняя пересчитывается из силы инерции в точке В

$$F_B = m\Omega^2\left(R - x_B\right) \tag{8}$$

из условия равенства моментов сил F_B и F_C относительно точки А:

$$F_B y_B = F_C y_C\,. \tag{9}$$

Необходимые переменные найдем в предположении малости радиального смещения стола вибратора x:

$$\Delta\alpha = \frac{x}{b}\,,\quad x_B = c\Delta\alpha\cdot\cos\alpha = x,\quad y_B = b + c\Delta\alpha\cdot\sin\alpha = b + \frac{a}{b}x\,,\quad y_C = b\,. \tag{10}$$

Подставляя (10) в (6)-(9) и пренебрегая бесконечно малым слагаемым второго порядка с x^2, получаем

$$F = -\left[c + m\Omega^2\left(\frac{Ra}{b^2} - 2\right)\right]x, \tag{11}$$

откуда находим обобщенную динамическую жесткость, которая для устойчивости предлагаемой схемы динамического разгружения центробежных сил должна быть положительной:

$$C = c + m\Omega^2\left(\frac{Ra}{b^2} - 2\right) > 0\,. \qquad (12)$$

Для выполнения (12) достаточно выполнения следующего простого и легко выполнимого **условия устойчивости**

$$Ra > 2b^2\,. \qquad (13)$$

Например, при $a = b$ (треугольник ABC равнобедренный) достаточно, чтобы радиус расположения противовеса был бы больше двух катетов треугольника ABC:

$$R > 2a\,.$$

Отметим очень важное преимущество предлагаемой схемы динамического разгружения инерционных сил над традиционными схемами. Достаточное условие устойчивости (13) является исключительно геометрическим. Это означает, что на устойчивость не влияют ни жесткость самого вибратора, ни масса изделия, ни скорость вращения шпинделя стенда! Более того, в отличие от линеаризованной модели, на основании которой были получены условия устойчивости, реальная схема является нелинейной, что обеспечивает **абсолютную** устойчивость и полную безопасность при любых соотношениях варьируемых параметров за счет жесткой привязки шарнира А к вращающейся платформе 6. При этом, как уже отмечалось, изменение только массы изделия приведет лишь к небольшому отклонению положения равновесия, которое, впрочем, может быть при желании компенсировано корректировкой массы противовеса или соответствующим перемещением шарнира А.

И последнее, при выполнении условия баланса масс (1) при равенстве плечей вибратора и противовеса положение равновесия стола вибратора сохранится при любой скорости вращения шпинделя стенда! Это весьма существенно при испытаниях на различных скоростях.

4. Моделирование работы схемы автоматического разгружения ротора вибратора от инерционных сил

Для подтверждения работоспособности предлагаемой схемы автоматического разгружения ротационного испытательного стенда от центробежных сил инерции смоделируем работу механизма, представленного на рис.3, в приложении Solid Works Motion системы Solid

Works. Данное приложение позволяет с использованием численного метода интегрирования производить анализ движения связанной системы тел.

Воспроизведенная в Solid Works трехмерная модель разгружающего устройства изображена на рис. 5.

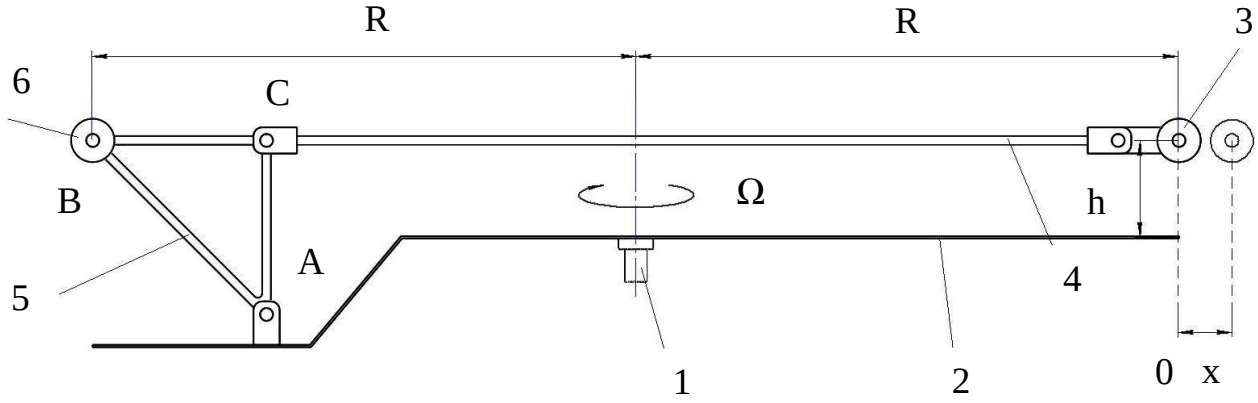


Рис. 5. Модель вибростенда в Solid Works

Эта модель состоит из неподвижной опоры 1, относительно которой вращается платформа 2 с заданной угловой скоростью Ω. На конце платформы 2 на расстоянии R от оси вращения установлена масса 3 (m), имитирующая ротор вибратора с установленным на него объектом испытаний. Масса 3 соединена со штангой 4, которая в свою очередь соединяется с жестким прямоугольным треугольником 5 (ABC). Элементы 3, 4 и 5 между собой соединяются вращательными кинематическими парами. Вершина треугольника А шарнирно закрепляется на платформе 2. В крайней вершине В на расстоянии R от оси вращения установлен противовес 6. В модели предусмотрено, что поступательное перемещение массы 3 всегда происходит строго параллельно плоскости платформы 2 ($h=const$). Масса 3 под действием гармонической силы вибратора может совершать возвратно-поступательное перемещение вдоль радиуса стенда. Начало отсчета этого перемещения (0) совпадает с положением динамического равновесия.

Исходные данные для моделирования следующие. Масса стола вибратора с установленным на нем изделием и масса противовеса $m = 50\ кг$, радиусы размещения стола вибратора и противовеса $R = 2.5\ м$, скорость вращения шпинделя стенда $\Omega = 20\ рад/с$, что соответствует линейному постоянному ускорению $A_0 = 102\,g$.

При точном соответствии масс m и плечей R центробежные силы уравновешиваются и система будет находиться в состоянии динамического равновесия, что подтверждается моделированием.

Соответствующий график не приводится в виду его неинформативности.

Для выяснения устойчивости этого равновесного состояния отклоним стол вибратора вправо на величину $x = 10\ мм$. Результат моделирования (координаты стола вибратора от времени) приведены на рис. 6.

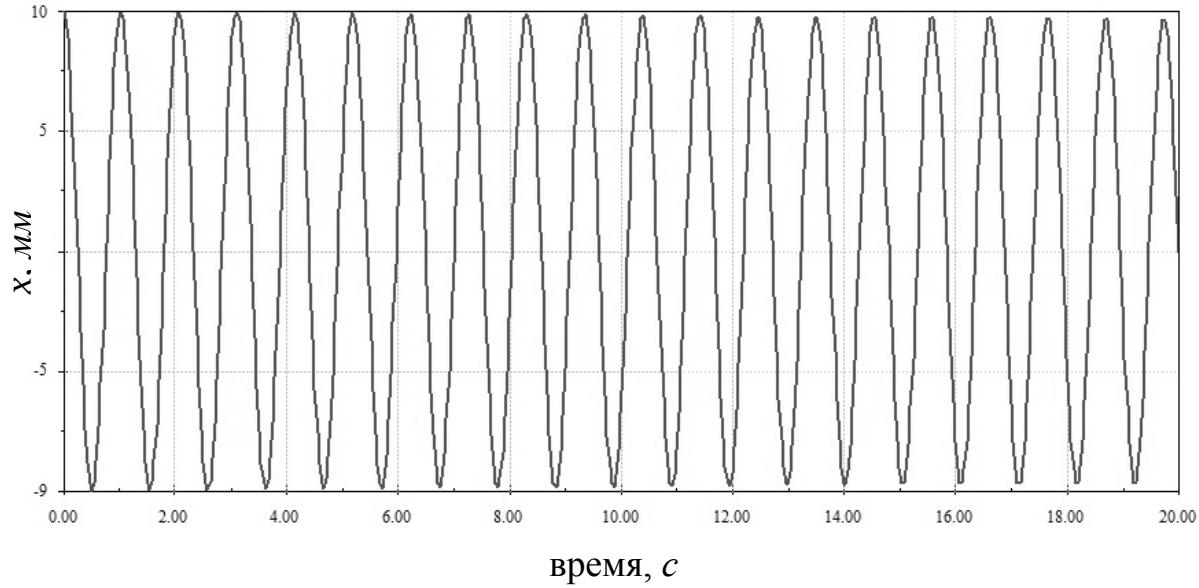


Рис. 6. Колебания стола вибратора при начальном его отклонении

Полученная зависимость положения стола вибратора показывает, что в системе устанавливаются устойчивые свободные колебания с частотой, соответствующей обобщенной динамической жесткости (12).

Для устранения незатухающих колебаний в систему целесообразно внести диссипацию, например, в виде трения в узлах кинематических пар (как в модели, так и в реальном стенде). Результат учета трения представлен на рис. 7.

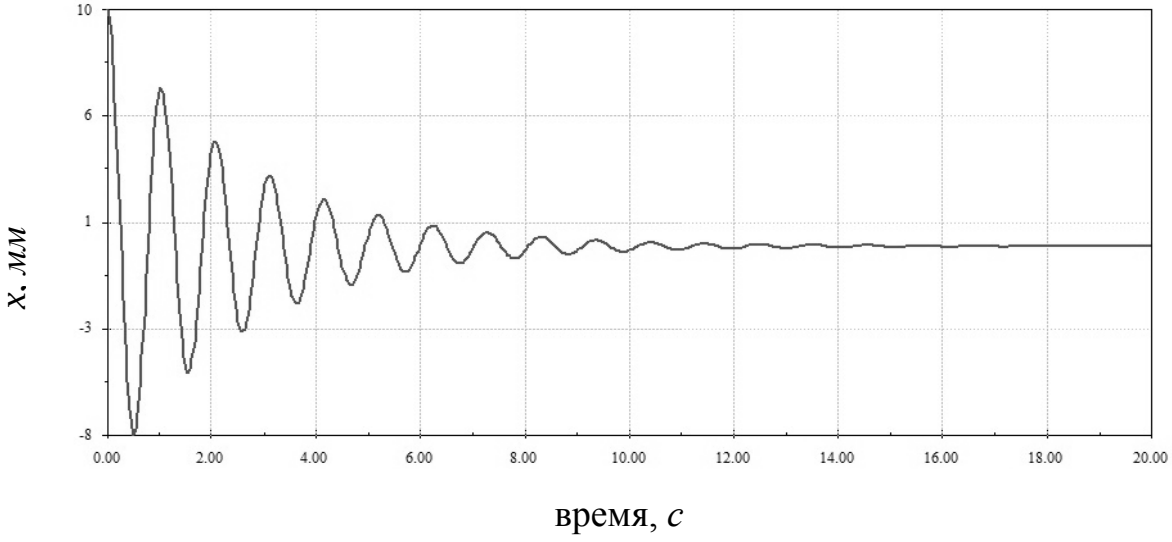


Рис. 7. Затухающие колебания стола вибратора с учетом трения в системе

После того, как мы убедились в устойчивости динамического равновесия системы, можно «включить» вибратор, создающий возвратно-поступательные движения своего стола с установленным на нем изделием. Приложим в Solid Works Motion к столу вибратора гармоническую силу с амплитудой 100 Н и частотой 8 Гц. Результат подобного сложного пространственного моделирования представлен на рис. 8. Хорошо видно, что после затухания переходных процессов остаются вынужденные колебания стола вибратора с заданной частотой.

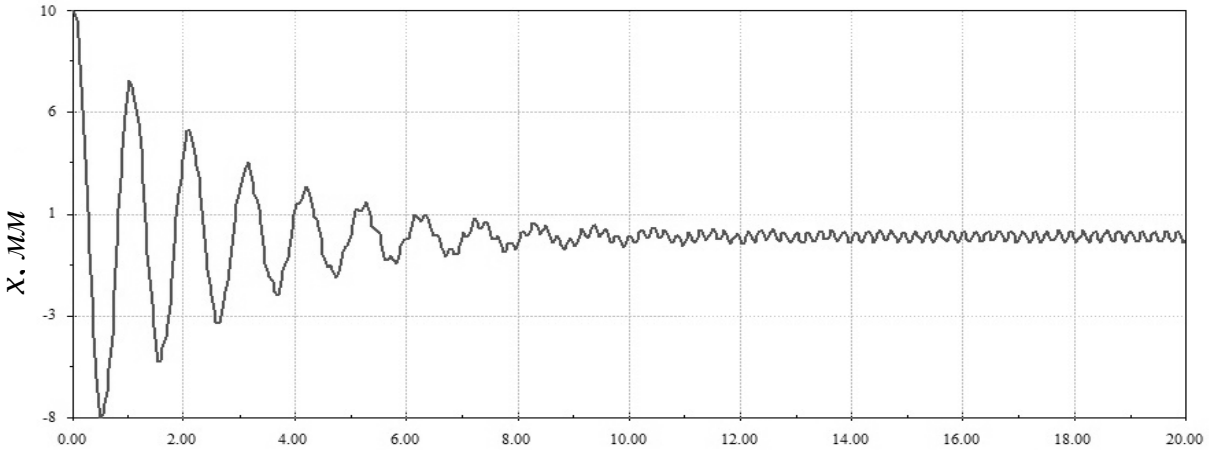


Рис. 8. Вынужденные колебания стола вибратора

Рассмотрим теперь случай неуравновешенности масс вибратора. Пусть масса вибратора с изделием больше массы противовеса на 1 кг. Результат моделирования вынужденных колебаний стола вибратора с учетом диссипации при начальном отклонении $x = 0$ представлен на рис.9. И в этом случае положение динамического равновесия устойчиво, причем вибрации ротора происходят около нового положения равновесия, которое можно при желании корректировать подбором массы противовеса или же соответствующим перемещением опоры А по раме 2 (см. рис. 5).

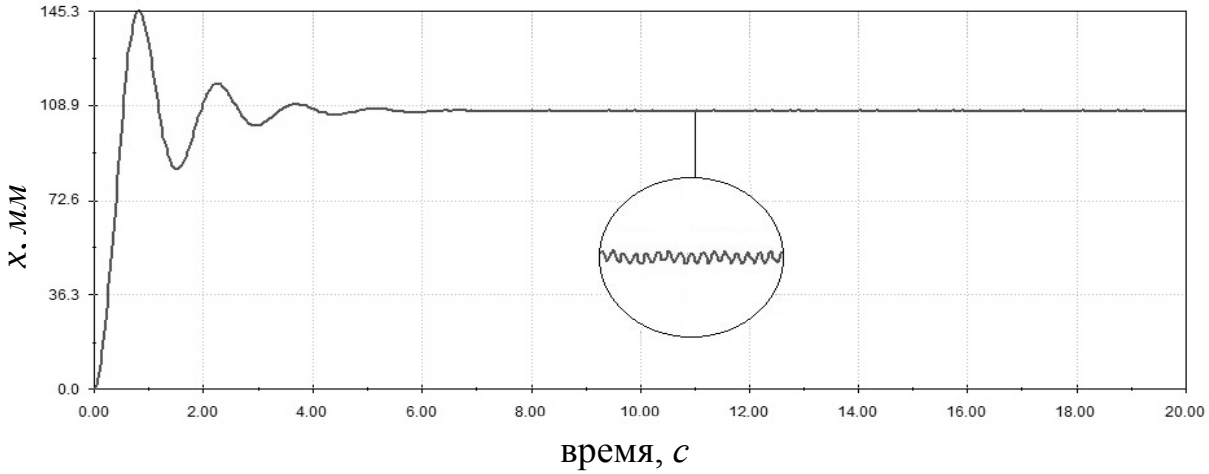


Рис. 9. Вынужденные колебания стола вибратора с неуравновешенной массой

Выводы

Аналитическое исследование и численное моделирование предлагаемой схемы динамического разгружения центробежных сил инерции показали ее работоспособность и устойчивость в широком диапазоне изменения параметров и испытательных воздействий. Устройство работает в автоматическом режиме, несложно в изготовлении, не требует серьезных предварительных настроек и обеспечивает дополнительную безопасность испытаний за счет «привязки» к платформе в точке А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яровицин В.С., Литвинов С.Д., Каразин В.И., Суханов А.А., Хлебосолов И.О. Устройство для испытания изделий на виброударные нагрузки. ПАТЕНТ на изобретение № 2348021, 27.02.2009.
2. Каразин В.И., Колесников С.В., Литвинов С.Д., Суханов А.А., Хлебосолов И.О. Особенности моделирования и воспроизведения виброударного воздействия. Теория механизмов и машин. Периодический научно-методический журнал. № 2 (22) , Т. 11. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 55-64.
3. Каразин В.И., Колесников С.В., Литвинов С.Д., Суханов А.А., Хлебосолов И.О. Оптимизация параметров широкополосного виброударного механического стенда //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.752-765.
4. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н.Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.4. Вибрационные процессы и машины /Под ред. Э. Э. Лавендела, 1981. - 510 с.
5. 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) , Т. 5. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 38-44.
6. Каразин В.И., Козликин Д.П., Хлебосолов И.О. Об уравновешивании инерционных сил в виброцентрифугах. Теория механизмов и машин. Периодический научно-методический журнал. № 2 (10) , Т. 5. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 63-71.
7. 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.

8. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.3. – М.: Машиностроение, 1979. – 560 с.
9. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Клюева. –М.: Машиностроение, 1982. – Кн.1, 1982. - 528 с.
10. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
11. 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.
12. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т.1. – № 1. – С. 92-96.
13. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1980. - 272 с.

V.I.Karazin, D.P.Kozlikin, A.A.Sukhanov, I.O.Khlebosolov

ONE STABLE SCHEME OF CENTRIFUGAL FORCES DYNAMIC BALANCE

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper deals with dynamically balanced centrifugal forces of inertia in rotary shakers. It is considered stable scheme of automatic unloading rotor vibrator mounted on the platform of the centrifugal test stand.

Key words: centrifugal test stand, vibration, stable, balancing the forces of inertia.

REFERENCES

[1] Yarovitsin V.S., Litvinov S.D., Karazin V.I., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Ustroystvo dlya ispytaniya izdely na vibroudarnye nagruzki. PATENT na izobreteniye № 2348021, 27.02.2009. (rus)
[2] Karazin V.I., Kolesnikov S.V., Litvinov S.D., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Osobennosti modelirovaniya i vosproizvedeniya vibroudarnogo vozdeystviya. Teoriya mekhanizmov i mashin. Periodichesky nauchno-metodichesky zhurnal. № 2 (22) , T. 11. – SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – P. 55-64. (rus)
[3] Karazin V.I., Kolesnikov S.V., Litvinov S.D., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Optimizatsiya parametrov shirokopolosnogo vibroudarnogo mekhanicheskogo stenda //Sovremennoye

mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: materialy 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii /Pod red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova. – SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – P. 752-765. (rus)
[4] Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. V 6-ti t. /Red. sovet: V.N.Chelomey (pred.). – M.: Mashinostroyeniye, 1981. - T.4. Vibratsionnye protsessy i mashiny /Pod red. E. E. Lavendela, 1981. - 510 p. (rus)
[5] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sloushch A.V., Khlebosolov I.O. Dinamicheskaya model vibrorotatsionnogo stenda. Teoriya mekhanizmov i mashin. Periodichesky nauchno-metodichesky zhurnal. № 1 (9) , T. 5. – SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. – P. 38-44. (rus)
[6] Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. Ob uravnoveshivanii inertsionnykh sil v vibrotsentrifugakh. Teoriya mekhanizmov i mashin. Periodichesky nauchno-metodichesky zhurnal. № 2 (10) , T. 5. – SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. – P. 63-71. (rus)
[7] Vibratsii v tekhnike. Spravochnik. V 6-ti t. /Red. sovet: V.N.Chelomey (pred.). – M.: Mashinostroyeniye, 1981. - T.5. Izmereniya i ispytaniya /Pod red. M.D.Genkina, 1981. – 496 p. (rus)
[8] Anuryev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya. V 3-kh t. T.3. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 560 p. (rus)
[9] Ispytatelnaya tekhnika: Spravochnik. V 2-kh kn. /Pod red. V.V.Klyueva. –M.: Mashinostroyeniye, 1982. – Kn.1, 1982. - 528 p. (rus)
[10] Bashta T.M. Gidroprivod i gidropnevmoavtomatika: Uchebnik dlya vuzov. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 320 p. (rus)
[11] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Smirnov G.A. Rotornye stendy dlja vosproizvedenija parametrov dvizhenija //Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGTU. – SPb.: SPbGTU. – 1999. № 3(17). – P. 89 – 94.
[12] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. Vosproizvedenie parametrov dvizhenija na rotacionnyh stendah //Teorija mehanizmov i mashin. – 2003. – T.1. – № 1. – P. 92-96. (rus)
[13] Panovko Ya.G. Vvedeniye v teoriyu mekhanicheskikh kolebany. – M.: Nauka, 1980. - 272 p. (rus)

УДК 514+531.8

М.Д. Ковалёв

ШАРНИРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ НЕВОССТАНОВИМЫЕ ПО ВНУТРЕННИМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Михаил Дмитриевич Ковалёв, д.ф.-м.н., профессор, Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова
Россия, Москва
Тел.: (495)391-60-33, E-mail: kovalev.math@mtu-net.ru.

Аннотация

Рассматриваются плоские рычажно-шарнирные конструкции, вообще говоря, являющиеся статически определимыми фермами. Однако, при определённом выборе положений свободных шарниров они допускают внутреннее напряжение. Изучается вопрос единственности положений свободных шарниров при известных напряжениях рычагов и известных положениях закреплённых шарниров. Рассмотрены конструкции с небольшим числом шарниров, а также бесконечные последовательности конструкций простого строения, в частности, групп Ассура.

Ключевые слова: вложения графа в плоскость, структурная группа Ассура, внутреннее напряжение, единственность конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Речь пойдёт о статико-геометрических свойствах идеальных плоских шарнирно-рычажных конструкций. Это простейшие конструкции D_2, D_3 (рис. 1), получающиеся наслоением двухповодковых групп, а также группы Ассура M_3, M_4 [1,2]. На этих схемах шарниры, закреплённые в плоскости (стойке), обозначены крестиками; кружочками же обозначены свободные (незакреплённые) шарниры. Ясно как выглядят эти схемы D_k и M_k при произвольном числе k шарниров. Шарниры допускают всевозможные вращения соединённых в них рычагов относительно друг друга и относительно стойки-плоскости. Если шарниру смежны более двух рычагов, то он является совмещённым. Далее рассматривая эти конструкции мы будем считать, что положения закреплённых в плоскости шарниров заданы и не меняются. Типичная конструкция с рассматриваемыми схемами в плоскости является фермой, то есть, не допускает непрерывного движения свободных шарниров без изменения длин рычагов. Кроме того, она не допускает и внутренних напряжений, то есть, является статически определимой.

Однако, наш интерес будет сосредоточен на особых конструкциях, допускающих внутренние напряжения.

Пусть p_i радиус-вектор i-го шарнира в плоскости. Условие равновесия сил, приложенных к i-ому свободному шарниру со стороны смежных шарниров, имеет вид

$$\sum_j \omega_{ij}\left(p_i - p_j\right) = 0,$$

где суммирование проводится по всем шарнирам смежным i -му, а скаляр $\omega_{ij} = \omega_{ji}$ называется *внутренним напряжением рычага* $p_i p_j$. Величины напряжений ω_{ij} указывают меру напряженности рычагов: если $\omega_{ij} < 0$, то рычаг $p_i p_j$ растянут, если же $\omega_{ij} > 0$, то он сжат.

В инженерной литературе термин "`напряжение рычага"' имеет другой смысл. А именно, напряжением называется сила e_{ij} на единицу площади поперечного сечения рычага. Если s_{ij} площадь поперечного сечения рычага, то связь нашего внутреннего напряжения с инженерным такова: $\omega_{ij} = \dfrac{e_{ij}\ s_{ij}}{|\mathrm{p_i} - \mathrm{p_j}|}$.

Далее нам будет удобно объединять одним термином *шарнирник* [3] и шарнирные фермы и заданные положения шарнирных механизмов (когда определены положения всех их свободных шарниров). Если в R^2 задан шарнирник $p = (p_1, p_2, \ldots, p_m)$ с m свободными шарнирами, то его внутренние напряжения $\omega = \{\omega_{ij}\}$ определяются как нетривиальные решения однородной системы линейных уравнений:

$$\sum_j \omega_{ij}(p_i - p_{j)} = 0,\ 1 \le i \le m. \qquad (1)$$

Если эта система имеет лишь тривиальное решение, то говорят, что шарнирник *не допускает внутренних напряжений*. В противном случае, множество внутренних напряжений $\omega = \{\omega_{ij}\}$ заданного шарнирника p вместе с тривиальным решением системы (1) представляет собой линейное *пространство внутренних напряжений* шарнирника.

Мы интересуемся следующим вопросом: можно ли, зная положения закреплённых шарниров, восстановить по внутреннему напряжению $\omega = \{\omega_{ij}\}$ положения свободных шарниров? Если это так, то говорим, что шарнирник p *восстановим по напряжению* ω; в противном случае — *невосстановим* по этому напряжению.

Пусть внутреннее напряжение таково, что на всех рычагах, смежных какому-либо свободному шарниру, оно нулевое, тогда — этот шарнирник невосстановим по данному напряжению. В самом деле, условие равновесия сил не зависит от положения указанного свободного шарнира.

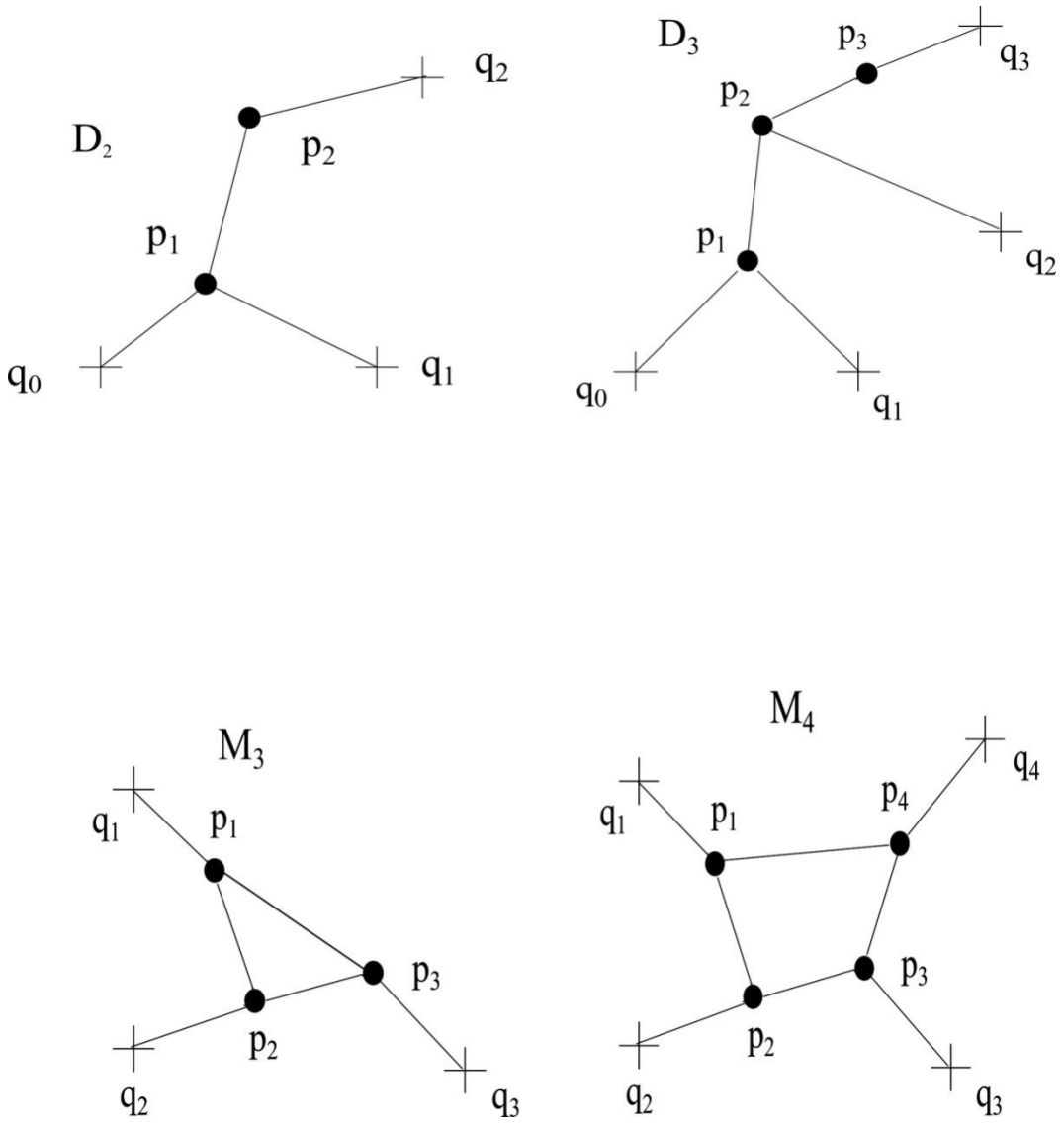


Рис. 1. Шарнирные схемы D_2, D_3, M_3, M_4.

Заметим также, что если длина рычага $p_i\, p_j$ равна 0 (смежные шарниры p_i и p_j совпадают), то формально шарнирник допускает напряжение ω^0, ненулевое на этом рычаге и равное нулю на всех остальных рычагах. Такие шарнирники мы называем *сократимыми*. Сократимый шарнирник с более чем одним свободным шарниром невосстановим по напряжению ω^0. Действительно, если его свободный шарнир совпадает со смежным ему закреплённым, то имеется другой свободный шарнир, все рычаги, смежные которому, не напряжены. Если же совпадают два смежных свободных шарнира, то их положение можно выбрать произвольно, и получившийся шарнирник будет допускать напряжение ω^0.

Поскольку ненапряжённые рычаги никак не влияют на задачу восстановления шарнирника по его внутреннему напряжению, то имеет смысл

рассматривать внутренние напряжения, ненулевые на каждом рычаге. Шарнирники, допускающие такие напряжения, мы называем *полностью напрягаемыми*.

ПРИМЕР 1. Рассмотрим шарнирник со структурной схемой D_2 (Рис. 1). Пусть положения закреплённых шарниров следующие: $q_0=(0,0)$, $q_1=(1,0), q_2=(0,1)$, напряжения рычагов, исходящих из этих шарниров, соответственно: $\omega_0,\omega_1,\omega_2$. В этом случае система уравнений (1) имеет вид:

$$\begin{cases}\omega_{12}(p_1-p_2)+\omega_0(p_1-q_0)+\omega_1(p_1-q_1)=0\\ \omega_{12}(p_2-p_1)+\omega_2(p_2-q_2)=0.\end{cases}$$

Если в этой системе начать считать напряжения известными, а радиус векторы p_1,p_2 свободных шарниров неизвестными, то для последних получим систему уравнений:

$$\begin{cases}(\omega_{12}+\omega_0+\omega_1)p_1-\omega_{12}p_2=\omega_0q_0+\omega_1q_1\\ -\omega_{12}p_1+(\omega_{12}+\omega_2)p_2=\omega_2q_2.\end{cases} \qquad (2)$$

Симметрическая матрица

$$\begin{bmatrix}\omega_{12}+\omega_0+\omega_1 & -\omega_{12}\\ -\omega_{12} & \omega_{12}+\omega_2\end{bmatrix}$$

последней системы называется *матрицей напряжений* $\Omega(\omega)$.

Если считать $p_i=(x_i,y_i)$, то векторная система уравнений (2) распадается на две координатных:

$$\begin{cases}(\omega_{12}+\omega_0+\omega_1)x_1-\omega_{12}x_2=\omega_1\\ -\omega_{12}x_1+(\omega_{12}+\omega_2)x_2=0,\end{cases}$$

и

$$\begin{cases}(\omega_{12}+\omega_0+\omega_1)y_1-\omega_{12}y_2=0\\ -\omega_{12}y_1+(\omega_{12}+\omega_2)y_2=\omega_2.\end{cases}$$

с одинаковыми матрицами, но разными правыми частями.

Как следует из теоремы Кронекера-Капелли необходимым и достаточным условием совместности этих систем, а, значит, и системы (2) является равенство рангов матрицы $\Omega(\omega)$ и дважды расширенной матрицы

$$\Omega^*(\omega)=\begin{bmatrix}\omega_{12}+\omega_0+\omega_1 & -\omega_{12} & \omega_1 & 0\\ -\omega_{12} & \omega_{12}+\omega_2 & 0 & \omega_2\end{bmatrix},$$

получаемой добавлением к $\Omega(\omega)$ двух столбцов свободных членов координатных систем.

Если шарнирник полностью напрягаем, то последние два столбца матрицы $\Omega^*(\omega)$ независимы. Следовательно, $\det\Omega(\omega)\neq 0$, и система (2) при условии своей совместности имеет единственное решение. Это означает

восстановимость полностью напрягаемого шарнирника с таким закреплением по его напряжению $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_{12}$.

Обобщая рассуждение этого примера получаем следующее.

УТВЕРЖДЕНИЕ 1. *Необходимым и достаточным условием существования шарнирника в плоскости, невосстановимого по его внутреннему напряжению ω является неполнота ранга матрицы $\Omega(\omega)$ и равенство его рангу дважды расширенной матрицы $\Omega^*(\omega)$.*

Можно доказать, что для любой схемы имеется хотя бы один шарнирник, допускающий внутреннее напряжение, и восстановимый по этому напряжению [4, 5].

Заметим, что если шарнирник допускает внутреннее напряжение, и его закреплённые шарниры лежат на одной прямой L, а свободные шарниры не все лежат на L, то он невосстановим. Это вытекает из существования нетривиальных аффинных преобразований плоскости, сохраняющих точки прямой L неподвижными, и следующего утверждения. Пусть шарнирник $A(p)$ получен аффинным преобразованием из шарнирника p.

УТВЕРЖДЕНИЕ 2. *Шарнирники p и A(p) имеют одно и то же пространство внутренних напряжений.*

Справедливость утверждения следует из того, что оба пространства являются пространствами решений равносильных однородных систем вида (1).

Из утверждения следует также, что шарнирники $A(p)$ и p в этом случае одновременно восстановимы либо невосстановимы по своему внутреннему напряжению ω. Ибо невосстановимость шарнирников p и $A(p)$ по их напряжению ω равносильна выполнению одного и того же равенства $\det\Omega(\omega) = 0$.

Из утверждения 2 следует:

УТВЕРЖДЕНИЕ 3. *Если шарнирник восстановим по своему внутреннему напряжению, и его закреплённые шарниры лежат на одной прямой, то и его свободные шарниры лежат на этой же прямой.*

НЕВОССТАНОВИМЫЕ ШАРНИРНИКИ ДЛЯ СХЕМ D_m

Для структурных схем D_1 и D_2 (в случае неколлинеарных закреплённых шарниров) как нетрудно доказать, все несократимые полностью напрягаемые шарнирники восстановимы по своему внутреннему напряжению. Для схемы D_3 в отличии от D_2 имеются невосстановимые полностью напрягаемые шарнирники и при неколлинеарных закреплённых шарнирах.

ПРИМЕР 2. Рассмотрим шарнирники со схемой D_3, и закреплёнными шарнирами : $q_0=(0,0)$, $q_1=(1,0), q_2=(0,1), q_3=(1,-2)$. Перечислим рычаги этой схемы: $p_1q_0, p_1q_1, p_2q_2, p_3q_3, p_1p_2, p_2p_3$. Оказывается, шарнирник со свободными шарнирами $p_1^0=(1,-1), p_2^0=(-1,2), p_3^0=(0,0)$ не восстановим по своему напряжению $(2,1,1,1,-1,1)$ (координаты вектора отвечают порядку перечисленных ранее рычагов схемы). Здесь дважды расширенная матрица выглядит так:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 2 & 1 & -2 \end{bmatrix},$$

и её ранг равен двум так же как и матрицы напряжений Ω. Каждый из шарнирников $p_1=p_1^0-X, p_2=p_2^0+2X, p_3=p_3^0+X$, где X — произвольный вектор плоскости, также допускает внутреннее напряжение $(2,1,1,1,-1,1)$.

Заметим ещё, что шарнирник $p_1^0=(1,0), p_2^0=(-1,0), p_3^0=(0,-1)$ из этого линейного многообразия сократим и имеет двумерное пространсто внутренних напряжений $(2u,v,u,u,-u,u), u,v\in R$. Этот шарнирник восстановим по любому своему напряжению, для которого $u\neq 0$ и $u\neq v$, например, по напряжению $(2,2,1,1,-1,1)$.

Таким образом, указан сократимый шарнирник с двумерным пространством внутренних напряжений, восстановимый по некоторым своим напряжениям и невосстановимый по другим. Ясно, также, что если имеется такое свойство, то множество невосстанавливающих напряжений является замкнутым множеством неполной размерности в множестве всех допустимых напряжений. Заметим также, что для схемы D_3, с закреплёнными шарнирами $q_0=(0,0), q_1=(1,0), q_2=(0,1), q_3=(A,B)$ для всюду плотного открытого множества параметров A,B существуют несократимые полностью напрягаемые шарнирники невосстановимые по своему одномерному пространству внутренних напряжений.

Для этой схемы возможны и такие закрепления при которых все несократимые полностью напрягаемые шарнирники восстановимы.

ТЕОРЕМА 1. *Для схемы D_3 все несократимые шарнирники, допускающие напряжение ненулевое на всех рычагах, восстановимы по этому напряжению при следующих закреплениях:*

1. $q_2=q_3$ *и* $q_0=q_1$.
2. *Совпадают между собой ровно три закреплённых шарнира.*
3. q_0, q_1, q_2 *коллинеарны, но* q_0, q_1, q_2, q_3 *неколлинеарны.*
4. q_0, q_1, q_2 *неколлинеарны, а* q_0, q_2, q_3 *коллинеарны.*

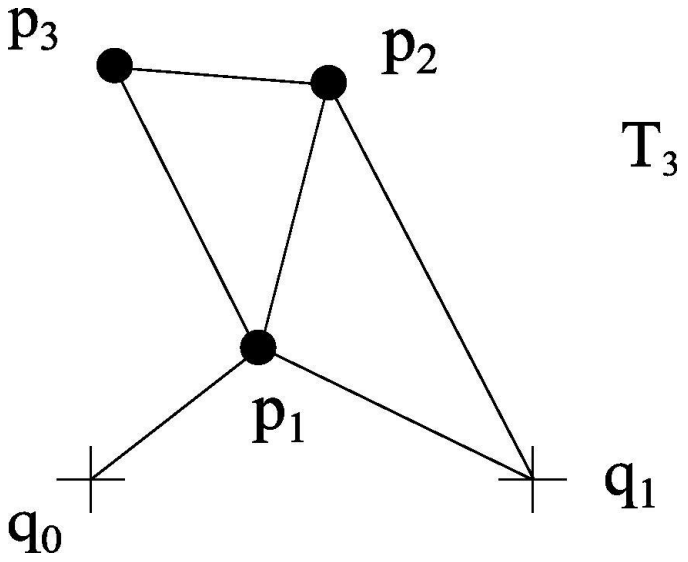


Рис. 2. Схема T_3.

Заметим, что для схемы T_m, получающейся последовательным наслоением двуповодковых групп на рычаги простейшей схемы с одним свободным шарниром p_1 и двумя смежными ему закреплёнными q_0, q_1. Например, группы с рычагами p_2p_1, p_2q_1, затем группы p_3p_2, p_3p_1 и так далее. Для схемы T_m полностью напрягаемый шарнирник получается лишь когда все его шарниры лежат на прямой q_0q_1. И такой распрямлённый несократимый шарнирник восстановим по каждому своему внутреннему напряжению ненулевому на всех рычагах, как следует из теорем работы [4]. В этом случае множество полностью напрягаемых шарнирников имеет размерность m - вдвое меньшую множества всех шарнирников.

ТЕОРЕМА 2. *Для схемы* $D_m, m \geq 3$ *при произвольном выборе положений всех закреплённых шарниров, кроме какого-то одного из шарниров* q_k, $k = 2,3$, *имеется полностью напрягаемый несократимый и невосстановимый по его напряжению шарнирник.*

НЕВОССТАНОВИМЫЕ ШАРНИРНИКИ ДЛЯ СХЕМ M_m

В работе [4] было установлено, что если закреплённые шарниры схемы M_3 (Рис. 1) не лежат на одной прямой, то для неё все полностью напрягаемые несократимые шарнирники восстановимы. Однако, для схемы M_4 имеются невосстановимые полностью напрягаемые несократимые шарнирники и когда закреплённые шарниры неколлинеарны.

ТЕОРЕМА 3. *Для схемы* M_4 *при любом выборе закреплённых шарниров, кроме случая, когда шарниры не лежат на одной прямой и два из них совпадают, имеется шарнирник, невосстановимый по своему внутреннему напряжению, ненулевому на всех рычагах.*

Поскольку при произвольном закреплении имеются несократимые полностью напрягаемые шарнирники, то из теоремы 2 следует, что для схемы M_4 все несократимые шарнирники, допускающие внутреннее напряжение ненулевое на каждом рычаге, восстановимы по этому напряжению лишь в случае, когда закреплённые шарниры не лежат на одной прямой, и два из них совпадают.

В случае большего числа шарниров схемы M_m также являются группами Ассура [6,7]. В смысле восстановимости положение для них такое же как и для схем D_m.

ТЕОРЕМА 4. *Для любой шарнирной схемы* $M_m, m \geq 4$ *можно так выбрать положения закреплённых шарниров, что будут существовать полностью напрягаемые несократимые и невосстановимые по своему внутреннему напряжению шарнирники.*

Если плоский шарнирник p^0 невосстановим по своему напряжению ω, то это напряжение допускает линейное многообразие $L(\omega)$ шарнирников размерности $2k$, где k есть коранг матрицы $\Omega(\omega)$. Как показывает следующий пример, для схемы M_4 возможны многообразия $L(\omega)$ с ω ненулевым на всех рычагах, для любого шарнирника которых положение шарнира p_1 в плоскости неизменно.

ПРИМЕР 3. Рассмотрим шарнирник p^0 со схемой M_4, закреплёнными шарнирами $q_1=(0,0), q_2=(1,0), q_3=\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right), q_4=(0,1)$ и свободными шарнирами $p_1^0=\left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right)$, $p_2^0=p_4^0=(0,0), p_3^0=\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$. Он невосстановим по своему внутреннему напряжению $\omega_1=1, \omega_2=\frac{1}{4}, \omega_3=2, \omega_4=\frac{1}{2}, \omega_{12}=1, \omega_{23}=-1, \omega_{34}=1, \omega_{14}=-2$. (Здесь мы обозначили напряжение рычага p_iq_i как ω_i.) Положения свободных шарниров, шарнирников, допускающих этот набор внутренних напряжений, таковы: $p_1=p_1^0$, $p_2=2X$, $p_3=p_3^0-\frac{1}{2}X, p_4=X$, где X – произвольный вектор плоскости.

Справедлива следующая теорема.

ТЕОРЕМА 5. *Для схемы* M_4 *при следующем выборе закреплённых шарниров:* q_1, q_2, q_4 *неколлинеарны, а* q_3 *лежит на прямой* q_2, q_4*, во множе-*

стве шарнирников, невосстановимых по своему напряжению, шарнир p_1 *непременно "`неподвижен".*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ассур Л.В.* Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. Изд. АН СССР, 1952. 589 с.
2. *Ковалев М.Д.* О структурных группах Ассура. Теория Механизмов и Машин. № 1 (7) т. 4, 2006, С. 18 – 26.
3. *Ковалев М.Д.* Геометрическая теория шарнирных устройств // Известия РАН Серия математическая. 1994. т.58. № 1. С.45–70.
4. *Ковалев М.Д.* О восстановимости шарнирников по внутренним напряжениям // Известия РАН Серия математическая. Т.61, № 4, 1997, С. 37-66.
5. *Ковалев М.Д.* Вопросы геометрии шарнирных устройств и схем.// Вестник МГТУ. Серия Машиностроение 2001. № 4. С. 33–51.
6. *Servatius B., Shai O. and Whiteley W.*, "Combinatorial Characterization of the Assur Graphs from Engineering", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp.1091-1104, 2010.
7. *Servatius B., Shai O. and Whiteley W.,* "Geometric Properties of Assur Graphs", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp. 1105-1120, 2010.

M.D.Kovalev

FRAMEWORKS NOT RESTORABLE FROM SELF STRESSES

Lomonosov Moscow State University, Russia

Abstract

Some simple hinge trusses in the plain are considered. Generally speaking, they are statically determinate. However, under certain choise of free (not fastened) hinges they allow internal stress. The question of uniqueness of the positions of free hinges, provided the certain self stress and the positions of fastened hinges are known, is investigated.

Key words: embeddings of pinned graphs, Assur's groups, self stress, global rigidity.

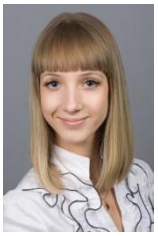
REFERENCES

[1] *Assur L.V.* Issledovanie ploskih sterzhnevih mehanizmov s nizshimi parami s tochki zreniya ih struktury i klassifikatsii. Izd. AN SSSR, 1952. 589 p. (rus.)
[2] *Kovalev M.D.* O strukturnih gruppah Assura. Teoriya Mehanizmov i Mashin. № 1 (7) v. 4, 2006, p. 18 – 26. (rus.)
[3] *Kovalev M.D.* Geometricheskaya teoriya sharnirnih ustroystv // Izvestiay RAN Seriya matematicheskaya 1994. v.58. № 1. p.45–70. (rus.)
[4] *Kovalev M.D.* O vosstanovimosti sharnirnikov po vnutrennim napryazheniyam // Izvestiay RAN Seriya matematicheskaya v.61, № 4, 1997, p. 37-66. (rus.)
[5] *Kovalev M.D.* Voprosy geometrii sharnirnih ustroystv i shem // Vestnik MGTU. Seriya Mashinostroenie 2001. № 4. p. 33–51. (rus.)
[6] *Servatius B., Shai O. and Whiteley W.,* "Combinatorial Characterization of the Assur Graphs from Engineering", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp.1091-1104, 2010.
[7] *Servatius B., Shai O. and Whiteley W.,* "Geometric Properties of Assur Graphs", European Journal of Combinatorics, Vol. 31, № 4, May, pp. 1105-1120, 2010.

УДК 62-26

П. А. Коновалова[1], В.А. Терешин[2]

ФИЛЬТР ВИНЕРА ДЛЯ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ ДВУХМАССОВОЙ УПРУГО-ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ



[1] Полина Андреевна Коновалова, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра «Теория механизмов и машин»
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
Тел.: (812) 297-48-45, E-mail: polinapini@rambler.ru

[2] Валерий Алексеевич Терешин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра «Теория механизмов и машин»
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
Тел.: (812) 297-48-45, E-mail: terva@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача оптимальной активной виброзащиты двухмассовой системы. Получен алгоритм нахождения оптимальной передаточной функции в цепи обратной связи.

Ключевые слова: активная система виброзащиты, оптимизация, метод Винера.

В статье решена задача оптимальной активной виброзащиты [7] двухмассовой системы. Решение основано на методе Винера [1], так как с его помощью для стационарного случайного процесса можно получить оптимальную среди физически возможных передаточную функцию системы активной виброзащиты. При изменении характеристик случайного возмущения возникает необходимость подстройки параметров такой системы. Основным недостатком системы управления, построенной по методу Винера, является зависимость ее параметров от характеристик входного воздействия.

Динамическая модель, соответствующая поставленной задаче [4], показана на рис. 1, на котором ξ – кинематическое внешнее воздействие, U – силовое управляющее воздействие; $m_1 = m_2 = 1000$ кг – масса первого и второго объекта; $b_1 = 7 \times 10^4 \ \frac{\text{Н·с}}{\text{м}}$, $b_2 = 6 \times 10^4 \ \frac{\text{Н·с}}{\text{м}}$, $c_1 = 7 \times 10^6 \ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$, $c_2 = 6 \times 10^6 \ \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ – коэффициенты линейного трения и жесткости упруго-диссипативных элементов. В дальнейшем все величины приведены в метрической системе СИ. Исследуемой модели соответствует однокаскадная система

виброзащиты объекта [3], состоящего из двух масс m_1 и m_2.

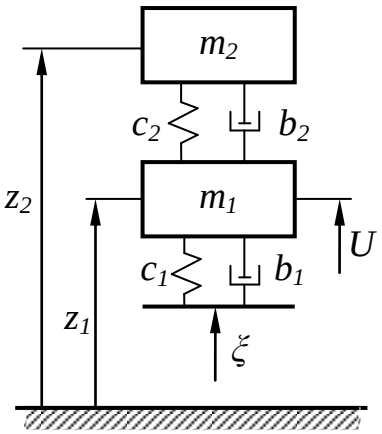


Рис.1. Динамическая модель активной виброзащиты двухмассовой системы

Целью виброзащиты является уменьшение колебаний верхней массы m_2, вызываемых кинематическим воздействием $\xi(t)$, а сила U прикладывается к нижней массе m_1 [6]. Возмущающее воздействие характеризуется спектральной плотностью [8], показанной на рис. 2.

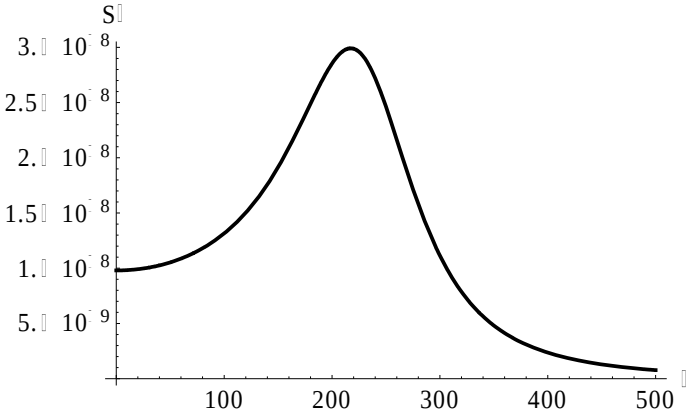


Рис.2. Спектральная плотность внешнего кинематического воздействия

Спектральная плотность $S_\xi(\omega)$ стационарного случайного процесса $\xi(t)$ представлена в виде:

$$S_\xi(\omega) = \frac{\sigma_\xi^2 4\beta\Omega^2}{(\omega^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2} \qquad (1)$$

где $\sigma_\xi^2 = 1{,}96 \times 10^{-6}$ – дисперсия случайного процесса ξ; $\Omega = 240$ – частота периодического процесса, лежащего в основе случайной функции $\xi(t)$; $\beta = 0{,}3\Omega$ – степень «размытости» функции $\xi(t)$; ω – текущая частота.

Уравнения движения объекта могут быть записаны в виде системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка.

$$\begin{cases} m_1\ddot{z}_1 = b_1(\dot{\xi} - \dot{z}_1) + c_1(\xi - z_1) + U + c_2(z_2 - z_1) + b_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) \\ m_2\ddot{z}_2 = b_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_2(z_1 - z_2) \end{cases} \quad (2)$$

Представим уравнения движения в операторном виде:

$$\begin{cases} [m_1p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2]z_1 - (b_2p + c_2)z_2 = (b_1p + c_1)\xi + U \\ [m_2p^2 + b_2p + c_2]z_2 - (b_2p + c_2)z_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $p \equiv \frac{d}{dt}$. Или

$$\begin{cases} z_1 = \dfrac{m_2p^2 + b_2p + c_2}{(b_2p + c_2)}z_2 \\ \dfrac{[m_1p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2](m_2p^2 + b_2p + c_2) - (b_2p + c_2)^2}{(b_2p + c_2)}z_2 = \\ = (b_1p + c_1)\xi + U \end{cases} \quad (4)$$

Дополним уравнения движения (4) функционалом качества системы виброзащиты [2, 5]:

$$J = \frac{1}{2}\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T (z_2^2 + \alpha U^2)dt \quad (5)$$

Задача состоит в построении реализуемой передаточной функции цепи обратной связи, оптимальной для определенных значений параметров внешнего воздействия по методу Винера, для которой функционал J достигает своего минимума [10]. Введем ряд обозначений:

оператор левой части второго уравнения движения (4)

$$P(p) \triangleq Ap^2 + Bp + C, \quad (6)$$

оператор объекта управления

$$M(p) \triangleq (Ap^2 + Bp + C)^{-1} \quad (7)$$

$$P(p) \triangleq M(p)^{-1} \quad (8)$$

Оптимальное управление связано с внешним воздействием и перемещением следующим образом:

$$U(t) = \mathrm{W}(p)q(t) \quad (9)$$

$$U(t) = \mathrm{K}(p)Q(t) \quad (10)$$

где $\mathrm{W}(p)$ – оператор обратной связи; $\mathrm{K}(p)$ – оператор связи внешнего воздействия с управлением.

$$q(t) = \mathrm{M}(p)[Q(t) - U(t)] \quad (11)$$

$$q(t) = \Phi(p)Q(t) = \mathrm{M(p)}Q(t) - M(p)U(t) = \mathrm{M(p)}Q(t) - M(p)K(p)Q(t) = \\ = M(p)[1 - K(p)]Q(t), \quad (12)$$

где $q(t)$ – абсолютная координата; $\Phi(p)$ – оператор связи внешнего воздействия со смещением $q(t)$ определяется из (12).

$$\Phi(p) = M(p)[1 - K(p)] \text{ или } \Phi(p) = P^{-1}(p)(1 - K(p)) \quad (13)$$

Выразим правую часть второго уравнения системы (4) через заданные параметры системы и внешнего воздействия.

$$(b_1p + c_1)\xi + U = (b_1p + c_1)\left(\xi + \frac{U}{b_1p + c_1}\right) = (b_1p + c_1)\left(\xi - \frac{\widetilde{K}(p)\xi}{b_1p + c_1}\right) \\ = (b_1p + c_1)\big(1 - K(p)\big)\xi,$$

где управление $U = -\widetilde{K}(p)\xi$. Передаточная функция системы

$$K(p) = \frac{\widetilde{K}(p)}{b_1 p + c_1}, \tag{14}$$

$$\frac{[m_1 p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2](m_2 p^2 + b_2 p + c_2) - (b_2 p + c_2)^2}{(b_2 p + c_2)} z_2 = \\ = (b_1 p + c_1)\big(1 - K(p)\big)\xi. \tag{15}$$

Выражение (15) можно записать в следующей форме $z_2 = \Phi(p)\xi$. Откуда

$$\Phi(p) = \frac{(b_1 p + c_1)\big(1 - K(p)\big)(b_2 p + c_2)}{[m_1 p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2](m_2 p^2 + b_2 p + c_2) - (b_2 p + c_2)^2}. \tag{16}$$

Выразим $P(p)$, подставив (13) в (16)

$$P(p) = \frac{[m_1 p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2](m_2 p^2 + b_2 p + c_2) - (b_2 p + c_2)^2}{(b_1 p + c_1)\big(1 - K(p)\big)(b_2 p + c_2)}. \tag{17}$$

Из (8) определим оператор объекта $M(p)$

$$M(p) = \frac{(b_1 p + c_1)(b_2 p + c_2)}{[m_1 p^2 + (b_1 + b_2)p + c_1 + c_2](m_2 p^2 + b_2 p + c_2) - (b_2 p + c_2)^2}. \tag{18}$$

Спектральная плотность $S_\xi(\omega)$ может быть записана в факторизованном виде как функция от комплексной переменной р.

$$S_\xi(p) = \frac{(\sigma_\xi 2\Omega\sqrt{\beta})(\sigma_\xi 2\Omega\sqrt{\beta})}{(p^2 + 2\beta p + \Omega^2)(p^2 - 2\beta p + \Omega^2)} \quad \text{или} \quad S_\xi(p) = \frac{\gamma(p)\gamma(-p)}{\Gamma(p)\,\Gamma(-p)}, \tag{19}$$

где $\gamma(p) \triangleq \sigma_\xi 2\Omega\sqrt{\beta}$; $\Gamma(p) \triangleq p^2 + 2\beta p + \Omega^2$.

Функционал (5) по формуле Парсеваля [11] может быть представлен в комплексной форме:

$$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \big[S_{z_2}(p) + \alpha S_u(p)\big]\, dp \tag{20}$$

где $S_{z_2}(p)$ – спектральная плотность случайной функции $z_2(t)$; $S_u(p)$ – спектральная плотность управляющего воздействия $U(t)$; α – весовой множитель, характеризующий ограничения на управление. Спектральные плотности преобразуются следующим образом:

$$S_{z_2}(p) = \Phi(p)\Phi(-p)S_\xi(p), \tag{21}$$

$$S_u(p) = K(p)K(-p)a(p)a(-p)S_\xi(p), \tag{22}$$

где $\Phi(p)$, $\Phi(-p)$, $K(p)$, $K(-p)$, $a(p)$, $a(-p)$ – функции комплексного аргумента p.

Идеальную систему реализовать невозможно. Тождества $J \equiv 0$ достигнуть нельзя. Поэтому для оптимальных систем показатель качества J достигает минимума, отличного от нуля.

$$J = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty} L(p)S_{\xi}(p)\,dp, \tag{23}$$

где $L(p) = \Phi(p)\Phi(-p) + \alpha K(p)K(-p)a(p)a(-p)$ (24)

Преобразуем подынтегральное выражение $L(p)$ при использовании (13), тогда $L(p)$ принимает вид

$$\begin{aligned} L(p) &= \frac{(1-K(p))(1-K(-p))}{P(p)P(-p)} + \alpha K(p)K(-p)a(p)a(-p) = \\ &= \frac{1-K(p)-K(-p)+K(p)K(-p)}{P(p)P(-p)} + \alpha K(p)K(-p)a(p)a(-p) = \\ &= \frac{\alpha}{P(p)P(-p)}\left\{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha}[K(p)+K(-p)] + K(p)K(-p)[\frac{1}{\alpha}\right. \\ &\left. + a(p)a(-p)P(p)P(-p)]\right\} = \\ &= \frac{\alpha}{P(p)P(-p)}\left\{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha}[K(p)+K(-p)] + G(p)G(-p)K(p)K(-p)\right\}, \end{aligned} \tag{25}$$

где $G(p)G(-p) = \frac{1}{\alpha} + a(p)a(-p)P(p)P(-p)$. Подставим в него (17)

$$\begin{aligned} G(p)G(-p) = {} & {c_1}^4{c_2}^2 + {c_1}^2c2^2\alpha + {m_1}^2{m_2}^2p^8\alpha + s^2(-{b_2}^2{c_1}^4 - 2{b_1}^2{c_1}^2{c_2}^2 \\ & - {b_2}^2{c_1}^2\alpha - {b_2}^2{c_2}^2\alpha + 2b_2(b_1+b_2)c_2^2\alpha - (b_1+b_2)^2c_2^2\alpha \\ & + 2c_1c_2^2m_1\alpha + 2c_1^2c_2m_2\alpha + 2c_1c2^2m_2\alpha) + p^4(2{b_1}^2{b_2}^2{c_1}^2 \\ & + {b_1}^4{c_2}^2 + {b_2}^4\alpha - 2{b_2}^3(b_1+b_2)\alpha + {b_2}^2(b_1+b_2)^2\alpha - 2{b_2}^2c_1m_1\alpha \\ & + {c_2}^2{m_1}^2\alpha - 2{b_2}^2c_1m_2\alpha - 2{b_2}^2c_2m_2\alpha + 4b_2(b_1+b_2)c_2m_2\alpha \\ & - 2(b_1+b_2)^2c_2m_2\alpha + 4c_1c_2m_1m_2\alpha + 2{c_2}^2m_1m_2\alpha + {c_1}^2{m_2}^2\alpha \\ & + 2c_1c_2{m_2}^2\alpha + {c_2}^2{m_2}^2\alpha) + p^6(-{b_1}^4{b_2}^2 - {b_2}^2{m_1}^2\alpha \\ & - 2{b_2}^2m_1m_2\alpha + 2c_2{m_1}^2m_2\alpha - (b_1+b_2)^2{m_2}^2\alpha + 2c_1m_1{m_2}^2\alpha \\ & + 2c_2m_1{m_2}^2\alpha) \end{aligned} \tag{26}$$

Представим (26) в виде отношения полиномов

$$G(p)G(-p) = \frac{\mathrm{Qg}(p)\mathrm{Qg}(-p)}{P\mathrm{g}(p)\mathrm{Pg}(-p)}$$

$$\mathrm{Qg}(p) = a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0;$$

$$\mathrm{Qg}(-p) = a_4s^4 - a_3s^3 + a_2s^2 - a_1s + a_0$$

$$\begin{aligned} \mathrm{Qg}(p)\mathrm{Qg}(-p) = {} & {a_0}^2 + (-{a_1}^2 + 2a_0a_2)p^2 + ({a_2}^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4)p^4 + (-{a_3}^2 \\ & + 2a_2a_4)p^6 + {a_4}^2p^8 \end{aligned}$$

$$P\mathrm{g}(p)\mathrm{Pg}(-p) = \alpha(c_1 - b_1p)^2(c_1 + b_1p)^2(c_2 - b_2p)(c_2 + b_2p)$$

Приравняем коэффициенты при равных степенях p и получим систему уравнений для определения неизвестных множителей.

$$\begin{cases} {c_1}^4{c_2}^2 + {c_1}^2{c_2}^2\alpha = {a_0}^2, \\ -{b_2}^2{c_1}^4 - 2{b_1}^2{c_1}^2{c_2}^2 - {b_2}^2{c_1}^2\alpha - {b_2}^2{c_2}^2\alpha + 2b_2(b_1+b_2){c_2}^2\alpha \\ \qquad - (b_1+b_2)^2{c_2}^2\alpha + 2c_1{c_2}^2m_1\alpha + 2{c_1}^2c_2m_2\alpha + 2c_1{c_2}^2m_2\alpha \\ \qquad = -{a_1}^2 + 2a_0a_2, \\ 2{b_1}^2{b_2}^2{c_1}^2 + {b_1}^4{c_2}^2 + {b_2}^4\alpha - 2{b_2}^3(b_1+b_2)\alpha + {b_2}^2(b_1+b_2)^2\alpha - 2{b_2}^2c_1m_1\alpha \\ \qquad + {c_2}^2{m_1}^2\alpha - 2{b_2}^2c_1m_2\alpha - 2{b_2}^2c_2m_2\alpha + 4b_2(b_1+\mathrm{b2})c_2m_2\alpha \\ \qquad - 2(b_1+b_2)^2c_2m_2\alpha + 4c_1c_2m_1m_2\alpha + 2{c_2}^2m_1m_2\alpha + {c_1}^2{m_2}^2\alpha \\ \qquad + 2c_1c_2{m_2}^2\alpha + {c_2}^2{m_2}^2\alpha = {a_2}^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4, \\ -{b_1}^4{b_2}^2 - {b_2}^2{m_1}^2\alpha - 2{b_2}^2m_1m_2\alpha + 2c_2{m_1}^2m_2\alpha - (b_1+b_2)^2{m_2}^2\alpha \\ \qquad + 2c_1m_1{m_2}^2\alpha + 2c_2m_1{m_2}^2\alpha = -{a_3}^2 + 2a_2a_4, \\ {m_1}^2{m_2}^2\alpha = {a_4}^2 \end{cases} \tag{27}$$

Интеграл (20) с использованием (21) записывается следующим образом

$$J = \frac{\alpha}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha}\big(K(p)+K(-p)\big) + K(p)K(-p)G(p)G(-p)\}\frac{\gamma(p)\gamma(-p)}{P(p)P(-p)\Gamma(p)\Gamma(-p)}\,dp \tag{28}$$

Оптимальная передаточная функция цепи обратной связи $K(p)$ соответствует стационарному значению функционала J. Для его отыскания найдем первую вариацию.

$$\begin{aligned} \delta J = \frac{\alpha}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\{\frac{1}{\alpha}\big(\delta K(p)+\delta K(-p)\big) + \delta K(p)K(-p)G(p)G(-p) \\ + K(p)\delta K(-p)G(p)G(-p)\}\cdot\frac{\gamma(p)\gamma(-p)}{P(p)P(-p)\Gamma(p)\Gamma(-p)}\,dp \\ = \frac{\alpha}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\{[-\frac{1}{\alpha} + K(-p)G(p)G(-p)]\delta K(p) + [-\frac{1}{\alpha} \\ + K(p)G(p)G(-p)]\delta K(-p)\}\cdot\frac{\gamma(p)\gamma(-p)}{P(p)P(-p)\Gamma(p)\Gamma(-p)}\,dp \\ = \frac{\alpha}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\{[-\frac{1}{\alpha G(p)G(-p)} + K(-p)]\delta K(p) + [-\frac{1}{\alpha G(p)G(-p)} \\ + K(p)]\delta K(-p)\}\cdot\frac{\gamma(p)\gamma(-p)G(p)G(-p)}{P(p)P(-p)\Gamma(p)\Gamma(-p)}\,ds \\ = \frac{\alpha}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty}\{[-\frac{1}{\alpha G(p)G(-p)} + K(-p)]\delta K(p) + [-\frac{1}{\alpha G(p)G(-p)} \\ + K(p)]\delta K(-p)\}\cdot\ D(p)\,D(-p)\,dp, \end{aligned} \tag{29}$$

где $D(p) = \frac{\gamma(p)G(p)}{P(p)\Gamma(p)}$ и $D(-p) = \frac{\gamma(-p)G(-p)}{P(-p)\Gamma(-p)}$

Передаточная функция оптимальной реализуемой системы управления находится из условия стационарности функционала $\delta J = 0$. Введем обозначение

$$B(p) \triangleq \frac{D(p)}{\alpha G(p) G(-p)} \tag{30}$$

Разобьем $B(p)$ на две части:

$$B(p) = B_+(p) + B_-(p) \tag{31}$$

где $B_+(p)$ – содержит все полюса в левой полуплоскости; $B_-(p)$ – содержит все полюса в правой полуплоскости [9]. Эта операция, связанная с разложением на простейшие дроби и соответствующей группировкой слагаемых, называется расщеплением.

$$B_+(p) \triangleq \left[\frac{D(p)}{\alpha G(p) G(-p)}\right]_+ \tag{32}$$

$$B_-(p) \triangleq \left[\frac{D(p)}{\alpha G(p) G(-p)}\right]_- \tag{33}$$

$$B(p) = \frac{D(p)}{\alpha G(p) G(-p)} = \frac{\gamma(p) G(p)}{\alpha G(p) G(-p) P(p) \Gamma(p)} = \frac{\gamma(p)}{\alpha G(-p) P(p) \Gamma(p)}$$

Оптимальная передаточная функция принимает вид

$$K(s) = \frac{1}{D(p)} B_+(p) \tag{34}$$

Для дальнейшего анализа зададимся численными значениями параметров. Произведем расщепление $B(p)$.

$$\frac{\mathrm{Pg}(-p)}{\Gamma(p) * P(p) * \mathrm{Qg}(-p)} = \\ = -\frac{2.08 \times 10^8}{-3.06 + 1.57p} + \frac{2.00 \times 10^9}{1.06 + 1.57p} - \frac{0.70}{270 + 2.70p} + \frac{12376}{341 + 2.70p} \\ - \frac{3682}{1290 + 2.70p} + \frac{0.0007}{176533 + 2.70p} + \frac{3113.51766 - 4595s}{57600 + 144p + p^2} \\ + \frac{9.41 \times 10^8 - 2.80 \times 10^9 p}{1.54 + 1.59p + 2.45p^2} \tag{35}$$

$$B_+(p) = \frac{2.00 \times 10^9}{1.06 + 1.56p} - \frac{0.70}{270 + 2.70p} + \frac{1.24 \times 10^5}{341 + 2.70p} - \frac{3.68 \times 10^4}{1290 + 2.70p} \\ + \frac{0.0007}{1.76 \times 10^5 + 2.70p} + \frac{3113 - 4595s}{0.58 \times 10^5 + 144p + p^2} \\ + \frac{9.41 \times 10^8 - 2.80 \times 10^9 s}{1.54 + 1.59p + 2.45p^2} \tag{36}$$

$$B_-(p) = -\frac{2.08 \times 10^8}{-3.06 + 1.57p} \tag{37}$$

Подставляя эти значения, найдем частотную характеристику

$$K(p) = \frac{Qk}{Pk} \tag{38}$$

где $Qk = 4.9 \times 10^{27} + 2.1 \times 10^{27}p + 6.6 \times 10^{26}p^2 + 1.4 \times 10^{25}p^3 + 1.2 \times 10^{23}p^4 + 5 \times 10^{20}p^5 + 1.5 \times 10^{18}p^6 + 1.8 \times 10^{15}p^7 + 2.7 \times 10^{10}p^8$

$Pk = p(2 \times 10^{18} + 5 \times 10^{18}p + 6.3 \times 10^{18}p^2 + 4.8 \times 10^{18}p^3 + 1.1 \times 10^{17}p^4 + 8.6 \times 10^{14}p^5 + 3.8 \times 10^{12}p^6 + 1.1 \times 10^{10}p^7 + 1.3 \times 10^{7}p^8 + 203.2p^9$

Из (14) и (38) оптимальная реализуемая частотная характеристика

$$\tilde{K}(p) = \frac{\tilde{Q}k}{\tilde{P}k} \tag{39}$$

где $\tilde{Q}k = 7 \times 10^{22} + 3 \times 10^{22}p + 9{,}5 \times 10^{21}p^2 + 2 \times 10^{20}p^3 + 1.6 \times 10^{18}p^4 + 7{,}1 \times 10^{15}p^5 + 2{,}1 \times 10^{13}p^6 + 2{,}6 \times 10^{10}p^7 + 386278p^8$

$\tilde{P}k = p(100 + p)(2 \times 10^{18} + 5 \times 10^{18}p + 6.3 \times 10^{18}p^2 + 4.8 \times 10^{18}p^3 + 1.1 \times 10^{17}p^4 + 8.6 \times 10^{14}p^5 + 3.8 \times 10^{12}p^6 + 1.1 \times 10^{10}p^7 + 1.3 \times 10^{7}p^8 + 203.2p^9$

Получен алгоритм нахождения оптимальной передаточной функции в цепи обратной связи по методу Винера для двухмассовой системы. Исследование поведения системы с оптимальной передаточной функцией и определение ее эффективности выходит за рамки данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брайсон А., Хо Ю-Ши Прикладная теория оптимального управления. – М., Издательство «МИР», 1972. – 544 с.
2. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В 41 В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т.6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. К.В. Фролова. 1981. – 456 с.
3. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Смирнов Г.А. Роторные стенды для воспроизведения параметров движения. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 1999. № 3. С. 89.
4. Евграфов А.Н., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1. С. 92-96.
5. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, используемых при компьютеризированном синтезе механизмов. Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 48-52.
6. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами. – М.: Наука, 1976.
7. Коловский М.З. Об оптимизации активных виброзащитных систем. – М.: Наука, 1977.

8. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 883 с.
9. Растригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. Радио, 1980. – 232 с.
10. Фролов К.В., Фурман Ф.А. Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1980.
11. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.

P.A. Konovalova, V.A. Tereshin

WIENER FILTER FOR ACTIVE VIBRATION PROTECTION OF DUAL-MASS ELASTIC-DISSIPATIVE SYSTEMS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In this paper we consider the problem of optimal active vibration isolation of two-mass system. An algorithm to find the optimal transfer function in the feedback loop.

Key words: active vibration isolation system, optimization, the Wiener method.

REFERENCES

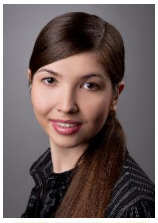
[1] Braison A., Ho U-Shi Prikladnaya teoriya optimalnogo ypravleniya. – M., Izdatelstvo «MIR», 1972. – 544 p. (rus)
[2] Vibracii v tehnike: Spravochnik. V 6 t. / Red. Sove«МИР»t: V 41 V.N. Chelomei (pred.). – M.: Mashinostroenie. 1981. – T.6. Zashita ot vibracii i ydarov / Pod red. K.V. Frololva. 1981. – 456 p. (rus)
[3] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Smirnov G.A. Rotornie stendi dlya vosproizvedeniya parametrov dvigeniya. Naychno-tehnicheskie vedomosti SPbGPY. 1999. № 3. P. 89. (rus)
[4] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Hlebosolov I.O. Vosproizvedenie parametrov dvigeniya na rotacionnih stendah. Teoriya mehanizmov I mashin. 2003. T. 1. № 1. P. 92-96. (rus)
[5] Evgrafov A.N., Petrov G.N. O nekotorih kriteriyah kachestva, ispolzyemih pri komputerizirovannom sinteze mehanizmov. Sovremennoe mashinostroenie. Nayka i obrazovanie. 2012. № 2. P. 48-52. (rus)
[6] Kolovskii M.Z. Avtomaticheskoe ypravlenie vibrozashitnimi systemami. – M.: Nayka, 1976. (rus)

[7] Kolovskii M.Z. Ob optimizacii aktivnih vibrozashitnih system. – M.: Nayka, 1977. (rus)
[8] Pugachev V.S. Teoriya slychanih fynkcii i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo ypravleniya. – M.: Gosydarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoi literatyri, 1960. – 883 p. (rus)
[9] Rastrigin L.A. Sovremennie principi ypravleniya slognimi obektami. – M.: Sov. Radio, 1980. – 232 p. (rus)
[10] Frolov K.V., Fyrman F.A. Prikladnaya teoriya vibrozashitnih system. – M.: Mashinostroenie, 1980. (rus)
[11] Cipkin Ya.Z. Osnovi teorii avtomaticheskih system. – M.: Nayka, 1977. – 560 p. (rus)

УДК 62-503.54

Ф.Р. Нигматуллина[1], В.А. Терешин[2]

КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА



[1]Фарида Расимовна Нигматуллина, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)980-3795, E-mail: farida_17@mail.ru

[2]Валерий Алексеевич Терешин, доцент, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: terva@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена кинематическому исследованию трехосного телескопа, изучению программного движения, решению обратной задачи кинематики и выбору работающей пары приводов, в зависимости от орбиты наблюдаемого объекта.

Ключевые слова: орбиты ИСЗ, механика телескопа, обратная задача кинематики, переходные режимы.

Для сопровождения космических объектов с помощью оптических телескопов опорно-поворотное устройство (ОПУ) может иметь две степени свободы. Однако если космический объект перемещается со сравнительно высокой угловой скоростью, то на некоторых углах механизмы ОПУ приобретают очень большие ускорения, приводящие к значительным динамическим нагрузкам и колебаниям оптической оси [5], что недопустимо. Поэтому для наблюдений за быстролетящими космическими объектами используются ОПУ телескопа с трехосной поворотной опорой [1].

В работе решена обратная задача геометрии [8] для двух вариантов работы ОПУ и определены законы программного движения приводов, как функций времени при сопровождении объектов искусственных спутников земли (ИСЗ), движущихся равномерно по круговым орбитам.

Исследуемый оптический комплекс, состоящий из десяти телескопов, предназначен для изучения космического пространства. В настоящее время комплекс, входящий в состав космических войск Российской Федерации, частично модернизируется. На рис.1 изображен общий вид и кинематическая схема телескопа. Общая компоновка ОПУ состоит из трех

частей: вращающаяся часть массой m_1=8406 кг предназначена для поворота входного устройства вокруг азимутальной оси *A*, опирается на три гидростатические опоры; наклоняющаяся часть массой m_2=6231 кг поворачивается вокруг полярной оси *L* на двух гидростатических опорах; качающаяся часть массой m_3=3407 кг имеет возможность поворачиваться вокруг орбитальной оси *R* на двух подшипниковых опорах и служит несущей конструкцией для установки на ней входного оптического устройства [4]. Механическая система телескопа осуществляет перемещение входного устройства по полярной, азимутальной и орбитальной осям, обеспечивая два диапазона скоростей: "быстро" – более 5’/сек и "медленно"– от 5"/сек до 5’/сек, что осуществляется переключением соответствующих кинематических цепей редукторов. Таким образом происходит изучение некоторых участков ночного неба, выявление наиболее интересных объектов и дальнейшее наблюдение за ними.

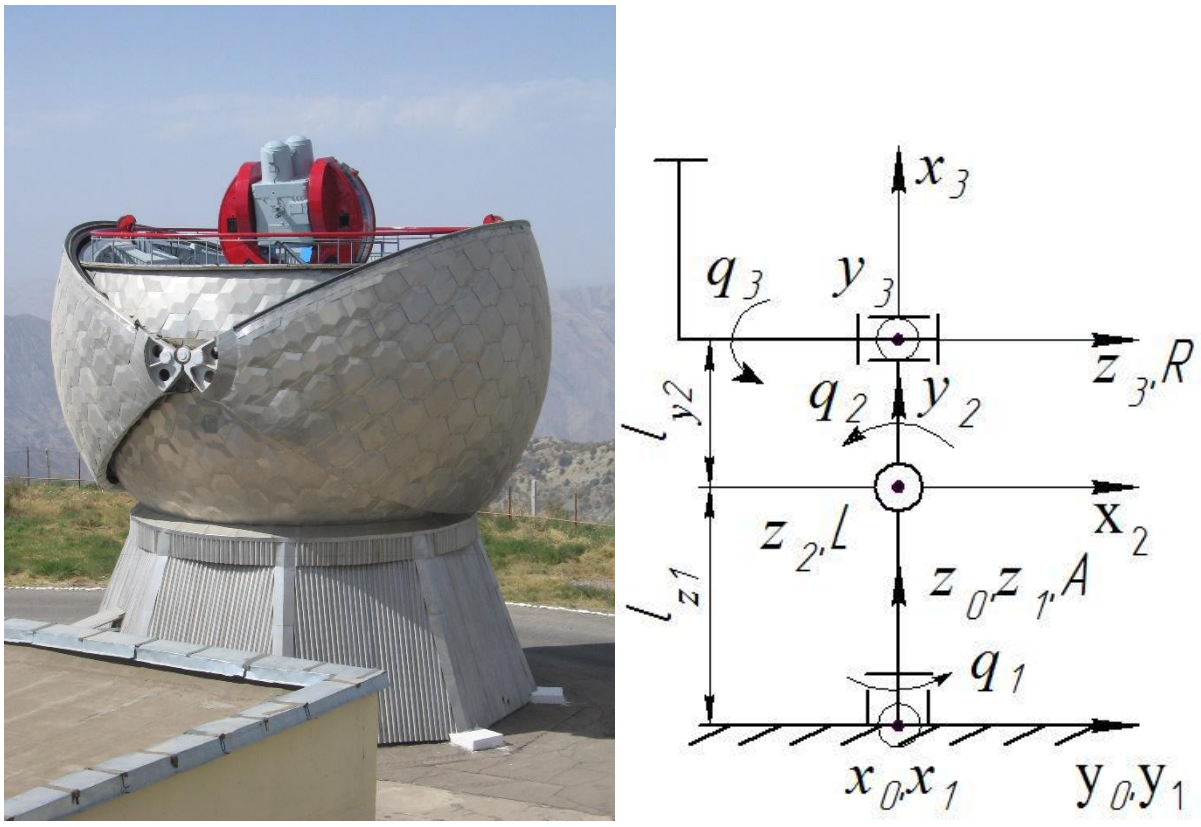


Рис. 1. Общий вид и кинематическая схема телескопа

Для расчета динамических процессов требуется знание законов программного изменения обобщенных координат [2]. Программными будем полагать значения обобщенных координат, как функций времени,

соответствующие характерным движениям ИСЗ. Для пересчета астрономических координат в обобщенные необходимо решить обратную задачу кинематики. На рис. 2 изображены все требуемые для этого системы координат.

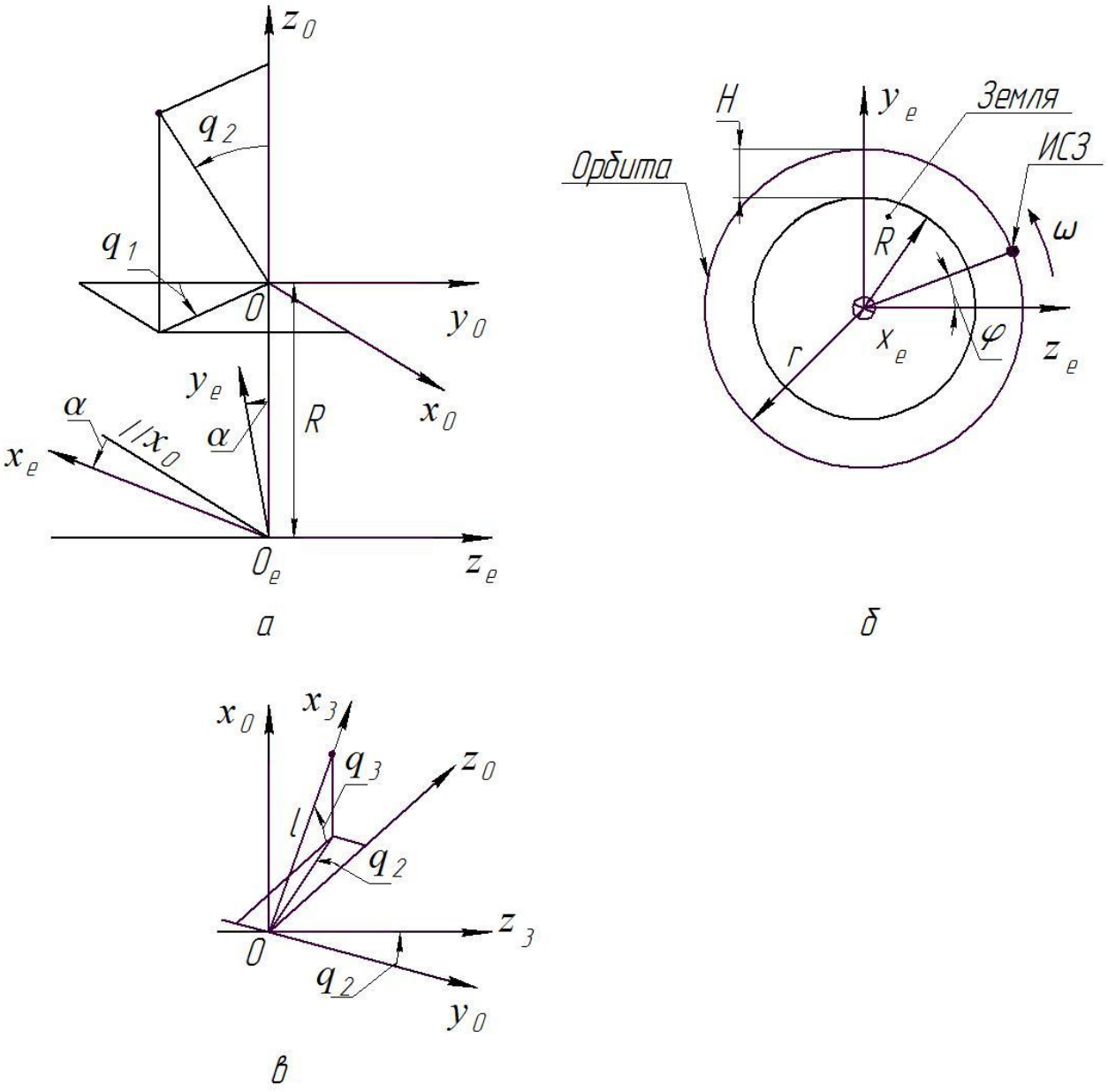


Рис. 2. Системы координат для ИСЗ

На рис. 2, *а* точка O_e располагается в центре земного шара, точка O – центр нулевой системы координат ОПУ. Плоскость (x_0, y_0) – «местный горизонт». Плоскость (y_e, z_e) – совпадает с плоскостью круговой орбиты ИСЗ. Направим горизонтальную ось y_0 параллельно плоскости орбиты в сторону восхождения ИСЗ. Примем z_e параллельной y_0. Тогда угол α является углом наклона плоскости орбиты относительно вертикальной

плоскости (z_0, y_0). Запишем преобразование астрономических координат x_e, y_e, z_e в координаты телескопа x_0, y_0, z_0.

$$\begin{cases} x_0 = -x_e \cos\alpha - y_e \sin\alpha \\ y_0 = z_e \\ z_0 = -x_e \sin\alpha + y_e \cos\alpha - R \end{cases}$$

Для получения программных законов изменения обобщенных координат $q_{p1,}, q_{p2,}, q_{p3}$, как функций времени, примем, что движение отслеживаемого ИСЗ происходит равномерно по круговой орбите. На рис. 2.б радиус орбиты обозначен буквой r; радиус Земли $-R$; высота спутника над поверхностью земли $-H$; полярный угол движения спутника по орбите $\varphi = \omega t + \varphi_0$; ω – постоянная угловая скорость спутника, определяемая высотой орбиты $\omega = \sqrt{g \cdot \frac{R^2}{r^3}}$; g – ускорение свободного падения; φ_0 – значение полярного угла при пересечении орбитой плоскости «местного» горизонта. Именно этот момент в дальнейшем принимается за начало отсчета времени. Из рис. 2, *б* видно, что

$$\begin{cases} x_e = 0 \\ y_e = r \sin\varphi \\ z_e = r \cos\varphi \end{cases},$$

следовательно,

$$\begin{cases} x_0 = -r \sin\alpha \sin\varphi \\ y_0 = r \cos\varphi \\ z_0 = r \cos\alpha \sin\varphi - R \end{cases}.$$

Из последнего равенства при $z_0 = 0$ получим

$$\varphi_0 = \arcsin\frac{R}{r\cos\alpha}.$$

На рис. 3 изображены траектории спутников в проекции на горизонтальную плоскость при различных углах наклона орбиты α от $0{,}9^0$ до 20^0.

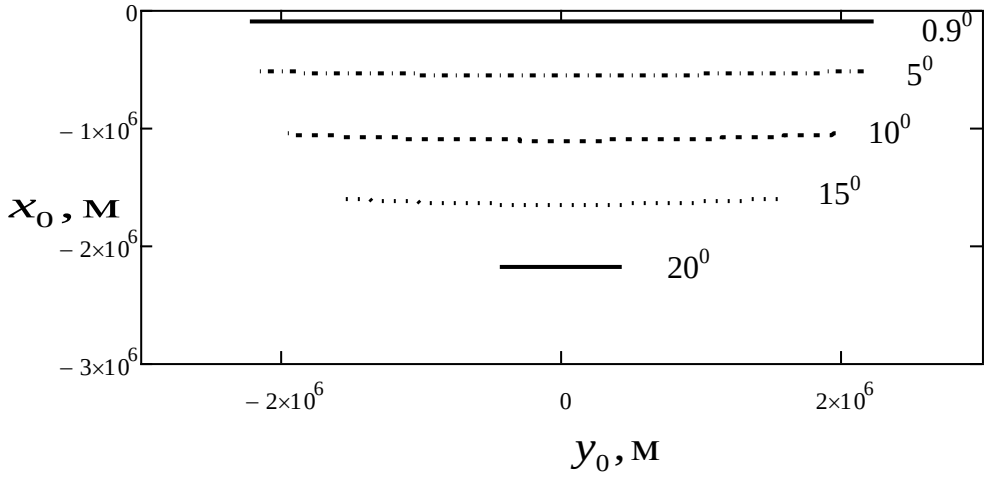


Рис. 3.Траектории движения ИСЗ с различными углами наклона орбиты, движущихся на высотах 400 км

Дальнейшие исследования показали, что при больших углах наклона орбиты лучше использовать приводы q_1, q_2, а при малых q_2, q_3. Таким образом обратная задача кинематики, то есть отыскание алгоритма пересчета абсолютных координат x_0, y_0, z_0 в обобщенные, состоит из двух частей. При больших углах наклона орбиты можно принять ограничения:

$$q_1 \in [0;\pi];\ q_2 \in \left[-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}\right];\ q_3 = 0.$$

При этом угол q_1 определяется из равенства

$$y_0 = \sqrt{x_0{}^2 + y_0{}^2}\cos q_1.$$

Из всех решений этого уравнения следует выбрать только те, которые удовлетворяют интервалу указанному в ограничениях с учетом знака x_0. Опустим несложные преобразования и запишем окончательное выражение:

$$q_1 = \arccos\left(\frac{y_0}{\sqrt{x_0{}^2 + y_0{}^2}}\right).$$

Из равенства

$$\sin(q_1) = \frac{x_0}{\sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2}\sin(q_2)}$$

следует, что

$$q_2 = \arcsin\left[\frac{x_0}{\sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2}\sin(q_1)}\right].$$

При малых углах наклона орбиты можно принять ограничения:

$$q_1 = 0;\ q_2 \in \left[-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}\right];\ q_3 \in \left[-\frac{\pi}{2};\frac{\pi}{2}\right].$$

При таких ограничениях обратная задача решается несколько проще, чем для больших углов. Выразим координаты космического объекта (x_0, y_0, z_0) через q_1, q_2, q_3 с помощью матриц перехода телескопа $H_{01}(q_1),\ H_{12}(q_2),\ H_{23}(q_3)$ [6], определив объект как точку, расположенную на оптической оси x_3 на расстоянии $l = \sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2}$ от ОПУ.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_{01}(q_1)\cdot H_{12}(q_2)\cdot H_{23}(q_3)\cdot \begin{bmatrix} \sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

При $q_1 = 0$ из последнего равенства с учетом малости размеров ОПУ по сравнению с координатами ИСЗ следует:

$$\begin{cases} x_0 = l\sin q_3 \\ y_0 = -l\cos q_3 \sin q_2 \\ z_0 = l\cos q_3 \cos q_2 \end{cases}.$$

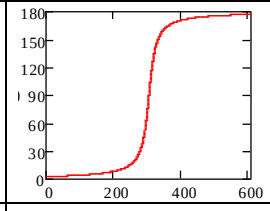
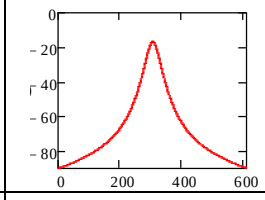
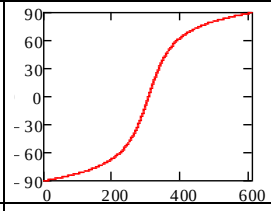
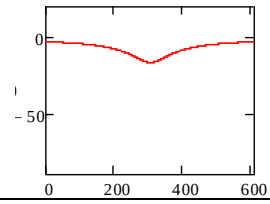
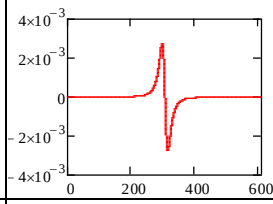
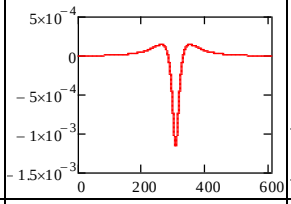
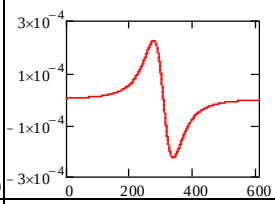
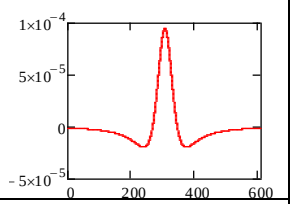
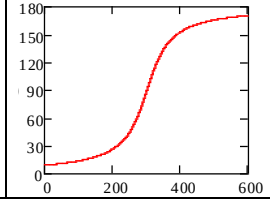
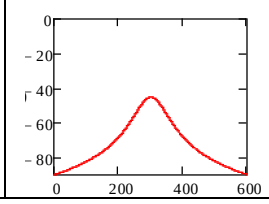
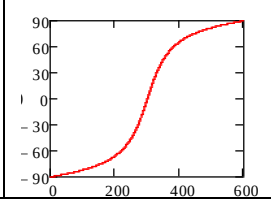
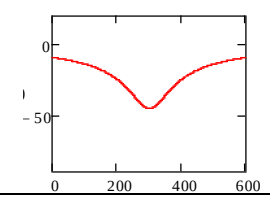
Таким образом, с учетом наложенных на q_2, q_3 ограничений справедливы равенства:

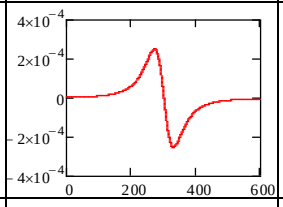
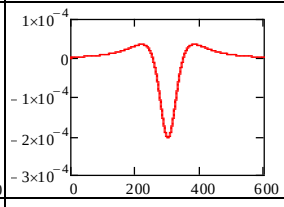
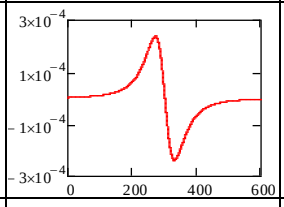
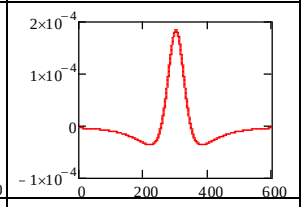
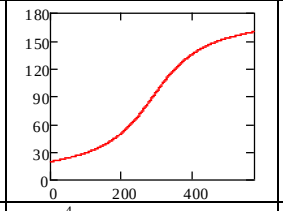
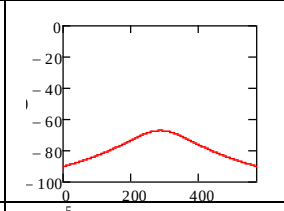
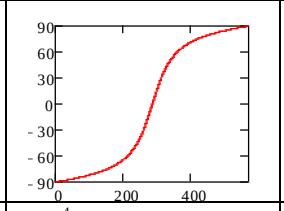
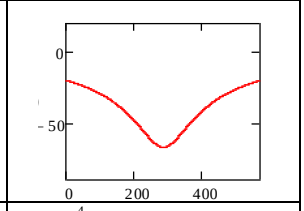
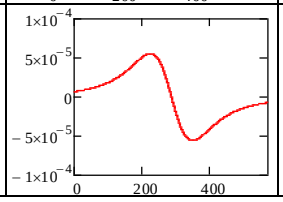
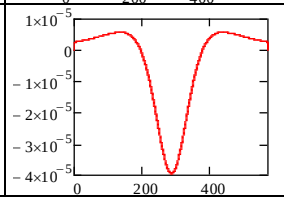
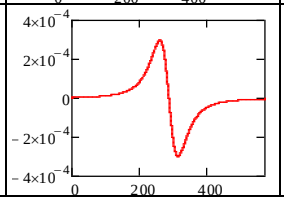
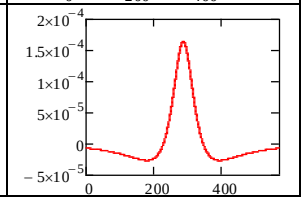
$$q_3 = \arcsin\left[\frac{x_0}{\sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2}}\right],$$

$$q_2 = -\arcsin\left[\frac{y_0}{\sqrt{{x_0}^2 + {y_0}^2 + {z_0}^2}\cos q_3}\right].$$

Эти равенства представляют собой решение обратной задачи кинематики [3] (геометрии) и позволяют определить искомые углы $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$ и их производные при заданных параметрах орбиты. В таблице приведены графики углов и угловых ускорений при различных углах наклона орбиты в двух возможных режимах сопровождения, когда работают первый и второй приводы (1-2) и, когда работают второй и третий привод (2-3) [10].

Таблица

α^0		Режим 1-2		Режим 2-3	
		$i=1$	$i=2$	$i=2$	$i=3$
1	q_i				
	$\ddot{q}_i$				
3,3	q_i				

α^0		Режим 1-2		Режим 2-3	
		$i=1$	$i=2$	$i=2$	$i=3$
7	$\ddot{q}_i$				
	q_i				
	$\ddot{q}_i$				

Из таблицы видно, что при $\alpha < 3{,}3^0$ максимальные угловые ускорения в режиме 1-2 больше, чем в режиме 2-3, а при $\alpha > 3{,}3^0$ наоборот. Следовательно, режим 1-2 должен использоваться на больших углах наклона орбиты [7], а при малых углах ($\alpha < 3{,}3^0$) правильнее использовать режим 2-3.

Приведенное в работе кинематическое исследование трехосного телескопа, а также изучение программного движения позволило решить обратной задачу кинематики и выбрать пару приводов, наиболее подходящую для наблюдений [9] за космическим объектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинько В.И., Яцкевич Н.Г. Окно в космос. Воздушно-Космическая оборона №2, 2010г.
2. Вейц В.Л., Коловский М.З.,Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука, 1984. 352с.
3. Евграфов А.Н., Петров Г.Н. О некоторых критериях качества, исполь-зуемых при компьютеризированном синтезе механизмов. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 48-52

4. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Взаимовлияние приводов астробашни. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 2-й международной научно-технической конференции. 14-15 июня 2012 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 540-547.
5. Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Режим разгона опорно-поворотного устройства телескопа. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й международной научно-практической конференции. 20-21 июня 2013 года, Санкт-Петербург / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 804-810.
6. Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С. 170-176.
7. D Chablat, J Angeles. On the kinetostatic optimization of revolute-coupled planar manipulators. Mechanism and Machine Theory, Volume 37, Issue 4, April 2002, Pages 351-374
8. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag, 2000, 394 p.
9. Ouarda Ibrahim, Wisama Khalil. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots. Mechanism and Machine Theory, Volume 45, Issue 4, April 2010, Pages 627-640
10. Yi Yue, Feng Gao, Xianchao Zhao, Q. Jeffrey Ge. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-DOF perpendicular parallel micro-manipulator. Mechanism and Machine Theory, Volume 45, Issue 5, May 2010, Pages 756-771

F.R.Nigmatullina, V.A. Tereshin

TELESCOPE KINEMATIC RESEARCH

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to kinematic research of a three-axis telescope, studying of program movement, to the solution of the reverse task of kinematics and a choice of the working couple of drives, depending on an orbit of observed object.

*Key words:*artificial satellite orbits, telescope mechanics, return problem of kinematics, transitional modes.

REFERENCES

[1] Bel'skiy A.B., Zdor S.E., Kolin'ko V.I., Yatskevich N.G. Okno v kosmos. Vozdushno-Kosmicheskaya oborona №2, 2010g. (rus.)

[2] Veyts V.L., Kolovskiy M.Z.,Kochura A.E. Dinamika upravlyaemykh mashinnykh agregatov. M.: Nauka, 1984. 352s. (rus)

[3] Evgrafov A.N., Petrov G.N. O nekotorykh kriteriyakh kachestva, ispol'-zuemykh pri komp'yuterizirovannom sinteze mekhanizmov. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 14-15 iyunya 2012 goda, Sankt-Peterburg / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – S. 48-52 (rus)

[4] Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Vzaimovliyanie privodov astrobashni. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 14-15 iyunya 2012 goda, Sankt-Peterburg / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – S. 540-547. (rus)

[5] Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Rezhim razgona oporno-povorotnogo ustroystva teleskopa. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 20-21 iyunya 2013 goda, Sankt-Peterburg / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – S. 804-810. (rus)

[6] Khrostitskiy A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometriya i kinematika prostranstvennogo shestizvennika s izbytochnymi svyazyami. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2011. № 123. S. 170-176. (rus)

[7] D Chablat, J Angeles. On the kinetostatic optimization of revolute-coupled planar manipulators. Mechanism and Machine Theory, Volume 37, Issue 4, April 2002, Pages 351-374

[8] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag, 2000, 394 p.

[9] Ouarda Ibrahim, Wisama Khalil. Inverse and direct dynamic models of hybrid robots. Mechanism and Machine Theory, Volume 45, Issue 4, April 2010, Pages 627-640

[10] Yi Yue, Feng Gao, Xianchao Zhao, Q. Jeffrey Ge. Relationship among input-force, payload, stiffness and displacement of a 3-DOF perpendicular parallel micro-manipulator. Mechanism and Machine Theory, Volume 45, Issue 5, May 2010, Pages 756-771

УДК 539.3:534.1

Г.В. Филиппенко

КОЛЕБАНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОПОР ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, ЧАСТИЧНО ПОГРУЖЕННЫХ В ЖИДКОСТЬ

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

Аннотация

В статье рассмотрены колебания системы концентрических цилиндрических оболочек частично погруженных в жидкость и вертикально прикрепленных к дну водоема. Подобные системы могут в известной степени моделировать процессы в опорах гидротехнических сооружений, нефтяных платформ, ветроэлектростанциях, стоящих на шельфе, а также резервуары с жидкостью и т.д.В основу берется схема нахождения вектора смещений подводной части одной оболочки. На базе этого решения получены обобщения метода, а также использован метод входных импедансов для нахождения дисперсионных уравнений и обобщенных сил и смещений.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, свободные колебания оболочек, гранично-контактные задачи акустики.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В конструкции опор гидротехнических сооружений, нефтяных платформ, ветроэлектростанций, стоящих на шельфе, а также резервуаров с жидкостью и других гидротехнических сооружений используются цилиндрические оболочки, порой многослойные. Расчет столь сложных систем требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому актуально рассмотрение сравнительно простых модельных задач, имеющих точное аналитическое решение [1-14]. На этих моделях можно аналитически исследовать основные эффекты, а также использовать их в качестве тестовых задач для вычислительных пакетов. Решение базируется на общей схеме, изложенной в [7] для одной оболочки, а также на технике входных импедансов [15].

Введем цилиндрическую систему координат, где ось z совпадает с образующей оболочки. В качестве переменных, описывающих акустическое поле в системе, выберем акустическое давление в жидкости P и вектор смещений поверхности оболочки $\mathbf{u}$. Введем в рассмотрение слой идеальной сжимаемой жидкости, акустическое давление P в которой подчиняется уравнению Гельмгольца $(\Delta + k^2)P(r,\varphi,z) = 0$; $k = \dfrac{\omega}{c}$, $R < r < +\infty$, $0 \le \varphi < 2\pi$, $0 < z < H$. Зависимость всех процессов от времени предполагаем гармонической, а временной фактор $e^{-i\omega t}$ условимся всюду опускать. Жидкость предполагается идеальной, глубиной H, плотностью ρ_w, скорость распространения звука в ней равна c. Поверхность жидкости $z = H$ является свободной, а дно водоема $z = 0$ – жестким: $P(r,\varphi,z)\big|_{z=H} = 0$, $\left.\dfrac{\partial P(r,\varphi,z)}{\partial z}\right|_{z=0} = 0$ ($R < r < +\infty$, $0 \le \varphi < 2\pi$). К дну водоема торцом жестко прикреплен вертикально стоящий, пустотелый цилиндр (жидкости внутри нет). Он частично выступает $(H < z < l)$ над поверхностью воды. Источником акустического поля в волноводе, заполненном идеальной, сжимаемой жидкостью, являются свободные колебания оболочки в волноводе. Уравнение, описывающее колебания оболочки имеет вид

$$\mathbf{L}^{\partial}\mathbf{u} = \frac{R^2\, P(r,\varphi,z)\big|_{r=R}}{\rho c_s^2} \begin{bmatrix} (0,0,1)^T, & 0 < z < H, & 0 \le \varphi < 2\pi \\ (0,0,0)^T, & H < z < l, & 0 \le \varphi < 2\pi \end{bmatrix}$$

Для погруженной части оболочки, на границе поверхность оболочки - жидкость, имеет место безотрывность движения жидкости и оболочки

$$u_n(R,\varphi,z) = \frac{1}{\rho_w \omega^2} \left.\frac{\partial P(r,\varphi,z)}{\partial r}\right|_{r=R+0}; \qquad 0 < z < H, \quad 0 \le \varphi < 2\pi$$

Здесь введены следующие обозначения: $\mathbf{u} = (u_t, u_z, u_n)^T$ (T — знак транспонирования) вектор смещений оболочки, $\mathbf{L}^{\partial}$ — матричный дифференциальный оператор [7, 16]

$$\mathbf{L}^{\partial} \equiv \begin{pmatrix} w^2 + \alpha_1[\nu_-\partial_z{}^2 + \partial_\varphi^2] & \nu_+\partial_\varphi\partial_z & \partial_\varphi(1 + 2\alpha^2[1 - \partial_\varphi^2 - \partial_z{}^2]) \\ \left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{21} & w^2 + \partial_z{}^2 + \nu_-\partial_\varphi^2 & \nu\partial_z \\ \left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{31} & \left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{32} & w^2 - 1 + \alpha^2(2\nu\partial_z{}^2 + 2\partial_\varphi^2 - 1 - [\partial_z{}^2 + \partial_\varphi^2]^2) \end{pmatrix},$$

Где $\partial_z = R\partial_z$, $\left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{21} = \left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{12}$, $\left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{31} = -\left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{13}$, $\left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{32} = -\left(\mathbf{L}^{\partial}\right)_{23}$, $\nu_+ = (1+\nu)/2$, $\nu_- = (1-\nu)/2$, $\alpha_1 = 1 + 4\alpha^2$, $w = \omega R / c_s$. Введен безразмерный параметр

$\alpha^2 = (h/R)^2/12$, характеризующий относительную толщину оболочки. Используются следующие параметры цилиндрической оболочки: R - радиус оболочки, h - его толщина, l - высота, D_c - цилиндрическая жесткость. Свойства материала оболочки характеризуют величины E, ν и ρ_s --- модуль Юнга, коэффициент Пуассона и объемная плотность соответственно. Также введены: ρ --- поверхностная плотность оболочки $\rho = \rho_s h$, c_s - скорость волн деформации срединной поверхности оболочки $c_s = \sqrt{E/(1-\nu^2)\rho}$.

На нижнем $z_0 = 0$ и верхнем $z_0 = H$ краях оболочки ставится одно из четырех граничных условий [12, 16]. Например, в случае закрепленного края – это условие отсутствия смещений и поворота

$$\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{u}\right)\Big|_{z=z_0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \qquad \mathbf{U}^{\partial} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \partial_z \end{pmatrix},$$

а в случае свободного края - это условие отсутствия сил и моментов

$$\left(\mathbf{F}^{\partial}\mathbf{u}\right)\Big|_{z=0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \qquad \mathbf{F}^{\partial} = \frac{\rho c^2}{R}\begin{pmatrix} -\nu\_\alpha_1\partial_z & -\nu\_\partial_\varphi & 4\nu\_\alpha^2\partial_z\partial_\varphi \\ -\nu\partial_\varphi & -\partial_z & -\nu \\ -2\alpha^2\partial_z\partial_\varphi & 0 & \alpha^2\left[(2-\nu)\partial_\varphi^2 - \nu + \partial_z{}^2\right]\partial_z \\ -2\alpha^2 R\nu\partial_\varphi & 0 & \alpha^2 R\left[\partial_z{}^2 - \nu(1-\partial_\varphi^2)\right] \end{pmatrix}$$

В месте входа оболочки в жидкость $z = H$, имеет место непрерывность обобщенных смещений и сил

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}^{\partial} \\ \mathbf{F}^{\partial} \end{pmatrix}\mathbf{u}\Big|_{z=H+0} - \begin{pmatrix} \mathbf{U}^{\partial} \\ \mathbf{F}^{\partial} \end{pmatrix}\mathbf{u}\Big|_{z=H-0} = (0,0,0,0,0,0,0,0)^T.$$

Предполагая отсутствие на бесконечности источника поля, мы будем учитывать только волны, расходящиеся от оболочки и затухающие по мере удаления от него.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО И ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЕЙ

Точное выражение для смещений оболочки можно получить, только точно определяя и акустическое поле в среде. Тем самым мы приходим к

гранично-контактной задаче для уравнения Гельмгольца, относительно акустического давления в жидкости, которое будем искать в виде разложения по плоским волнам (нормальным модам волновода), распространяющимся и затухающим по мере удаления от оболочки

$$P(r,\varphi,z)=\sum_{m,n=0}^{\infty} p_{mn}\cos(m\varphi+\varphi_m^0)\, f_n(z)\, H_m^{(1)}(\lambda_n r), \tag{1}$$

где $f_n(z)=\cos(\mu_n z),\quad \mu_n=\dfrac{\pi}{H}(n+\dfrac{1}{2}),\quad \lambda_n=\sqrt{k^2-\mu_n^2},\quad n=0,1,2,\ldots$ Здесь введены следующие обозначения: $H_m^{(1)}$ - функция Ханкеля первого рода с индексом m, p_{mn} - амплитуды гармоник, φ_m^0 - сдвиг фазы в m-ой гармонике. Построение решения приведено в [7]. Общее решение для подводной части оболочки имеет вид

$$\mathbf{u}=\sum_{m=0}^{\infty}\begin{pmatrix} A_m\sin(m\varphi+\varphi_m^0)\\ B_m\cos(m\varphi+\varphi_m^0)\\ C_m\cos(m\varphi+\varphi_m^0)\end{pmatrix},\qquad \mathbf{u}_m:=\begin{pmatrix} A_m\\ B_m\\ C_m\end{pmatrix}=\sum_{j=1}^{8} t_{jm}\left\{\mathbf{u}_{jm}^0+\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\psi_{mn}^j\,\beta_{mn}}{h_{mn}}\mathbf{u}_{mn}\right\}; \tag{1б}$$

$$\mathbf{u}_{jm}^0=e^{i\lambda_{jm}z}\begin{pmatrix}\eta_{jm}\\ \xi_{jm}\\ \varsigma_{jm}\end{pmatrix},\qquad \mathbf{u}_{mn}=\begin{pmatrix}\widehat{l}_{31}^m\cos(\mu_n z)\\ \widehat{l}_{32}^m\sin(\mu_n z)\\ \widehat{l}_{33}^m\cos(\mu_n z)\end{pmatrix}$$

Заметим, что $\mathbf{u}_m^0=\sum_{j=1}^{8} t_{jm}\mathbf{u}_{jm}^0$ общее решение соответствующей однородной системы. Введены обозначения:

$$\psi_{mn}^j=\frac{2}{H}\int_0^H e^{i\lambda_{jm}z} f_n(z)\,dz,\qquad \beta_{mn}=-\frac{R^2}{\rho c_s^2}\frac{H_m^{(1)}(\lambda_n R)}{\Delta_{mn}},\qquad h_{mn}=\frac{1}{\rho_w\omega^2}\left.\frac{\partial H_m^{(1)}(\lambda_n r)}{\partial r}\right|_{r=R+0}-\beta_{mn}\,\widehat{l}_{33}.$$

Здесь $t_{jm},(j=1,\ldots,8)$ пока неизвестные константы, $\lambda_{jm},(j=1,\ldots,8)$ собственные значения, а $\left(\eta_{jm},\xi_{jm},\varsigma_{jm}\right)^T$ нормированные на единицу собственные вектора соответствующей однородной задачи о свободных колебаниях бесконечной «сухой» оболочки; Δ_{mn} определитель матрицы $\{l_{ij}\};\ i,j=1,2,3$

$$\{l_{ij}\}=\begin{pmatrix} w^2-\alpha_1[\nu_-\mu_n^2+m^2] & -\nu_+ m\mu_n & -m(1+2\alpha^2[1+m^2+\mu_n^2]) \\ l_{21} & w^2-\mu_n^2-\nu_- m^2 & -\nu\mu_n \\ l_{31} & l_{32} & w^2-1-\alpha^2(1+2\nu\mu_n^2+2m^2+[\mu_n^2+m^2]^2) \end{pmatrix}$$

где $\mu_n = R\mu_n,\ l_{21}=l_{12}, l_{31}=l_{13}\ ,\ l_{32}=l_{23}$. Через $\hat{l}_{31}, \hat{l}_{32}, \hat{l}_{33}$ обозначены соответствующие алгебраические дополнения элементов этой матрицы. Например, элементу l_{31} соответствует алгебраическое дополнение $\hat{l}_{31}$.

СЛУЧАЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ЧАСТИЧНО НАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Рассмотрим теперь случай, когда жидкость находится не снаружи, а внутри оболочки и заполняет его до высоты H. В этом случае все основные уравнения и граничные условия сохраняют свой вид. Схема решения остается той же. Отметим только отличия. Давление в жидкости $\tilde{P}$ теперь будет выражаться через функции Бесселя J_m

$$\tilde{P}(r,\varphi,z)=\sum_{m,n=0}^{\infty}\tilde{p}_{m,n}\cos(m\varphi+\varphi_m^0)\,f_n(z)\,J_m(\lambda_n r), \qquad (2)$$

а само давление $\tilde{P}$ будет входить в условие динамического равновесия с другим знаком

$$\mathbf{L}^{\partial}\mathbf{u}=-\frac{R^2}{\rho c_s^2}(0,0,\tilde{P})^T;\qquad 0<z<H,\quad 0\le\varphi<2\pi.$$

СЛУЧАЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ЧАСТИЧНО НАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ И ОКРУЖЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Рассмотрим теперь случай, когда жидкость, в общем случае различная, находится и снаружи, и внутри цилиндрической оболочки, но уровень ее одинаков и равен H. Для удобства обозначений, параметры, связанные с жидкостью внутри оболочки будем обозначать буквами с «волной» наверху.

Давление $\tilde{P}$ в жидкости внутри цилиндрической оболочки будет иметь вид (2), а давление P снаружи (1). При этом оно будет следующим образом входить в условия динамического равновесия

$$\mathbf{L}^{\partial}\mathbf{u}=\frac{R^2}{\rho c_s^2}(0,0,P\big|_{r=R+0}-P\big|_{r=R-0})^T;\qquad 0<z<H,\quad 0\le\varphi<2\pi \qquad (3)$$

и непрерывности

$$u_n = \frac{1}{\rho_w \omega^2} \frac{\partial P(r,\varphi,z)}{\partial r}\bigg|_{r=R+0} = \frac{1}{\rho_w \omega^2} \frac{\partial P(r,\varphi,z)}{\partial r}\bigg|_{r=R-0}; \qquad 0 < z < H, \quad 0 \le \varphi < 2\pi$$

Из последнего условия следует связь между коэффициентами разложения $\tilde{p}_{m,n}$ и $p_{m,n}$ во внутреннем и внешнем разложениях. Тем самым условие динамического равновесия (3) превращается в

$$\mathbf{L}^{\partial}\mathbf{u} = \frac{R^2}{\rho c_s^2} \sum_{m,n=0}^{\infty} p_{mn} G_{mn} \cos(m\varphi + \varphi_m^0)\, f_n(z)\,(0,0,1)^T;$$

$$G_{mn} = H_m^{(1)}(\lambda_n R) - J_m(\lambda_n R) \frac{\rho_w}{\rho_w} \left[\frac{\partial H_m^{(1)}(\lambda_n r)}{\partial r}\bigg|_{r=R+0} \right] \left[\frac{\partial J_m(\lambda_n r)}{\partial r}\bigg|_{r=R-0} \right]^{-1}$$

Дальше действуем по общей схеме решения, при этом заменяем функцию $H_m^{(1)}$ на G_{mn}.

СЛУЧАЙ ДВУХ КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ЖИДКОСТЬЮ МЕЖДУ НИМИ

Рассмотрим обобщение метода на случай двух концентрических цилиндрических поверхностей с жидкостью между ними, уровень которой равен H. Параметры внешнего оболочки в отличие от параметров внутреннего оболочки будем обозначать буквами с "волной" наверху. Заметим, что различными могут быть как материальные, так и геометрические параметры цилиндров, а также граничные условия на их торцах. Давление в жидкости теперь будет представляться в виде

$$P(r,\varphi,z) = \sum_{m,n=0}^{\infty} \cos(m\varphi + \varphi_m^0)\, f_n(z)[\,p_{mn}^{'} J_m(\lambda_n r) + p_{mn} N_m(\lambda_n r)]$$

Условия динамического равновесия для внутренней и внешней оболочки имеют вид

$$\mathbf{L}^{\partial}\mathbf{u} = \frac{R^2}{\rho c_s^2}(0,0,P\big|_{r=R})^T, \quad \tilde{\mathbf{L}}^{\partial}\mathbf{u} = -\frac{R^2}{\rho \tilde{c}_s^2}(0,0,P\big|_{r=R})^T; \qquad 0 < z < H, \quad 0 \le \varphi < 2\pi$$

соответственно. Сначала, согласно общей схеме, находим общее решение $\mathbf{u}_m$ неоднородной задачи для погруженной части внутренней оболочки

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{u}_m^0 + \sum_{n=0}^{\infty} \langle \mathbf{p}_{mn}, \mathbf{a}_{mn} \rangle \mathbf{u}_{m,n}; \qquad \mathbf{a}_{mn} = \begin{pmatrix} \alpha_{mn} \\ \alpha_{mn}^{'} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p}_{mn} = \begin{pmatrix} p_{mn} \\ p_{mn}^{'} \end{pmatrix} \tag{4}$$

Здесь

$$\langle \mathbf{p}_{mn}, \mathbf{a}_{mn} \rangle = p_{mn}\,\alpha_{mn} + p_{mn}^{'}\,\alpha_{mn}^{'}; \qquad \alpha_{mn} = -\frac{R^2}{\rho c_s^2}\frac{N_m(\lambda_n R)}{\Delta_{mn}}, \qquad \alpha_{mn}^{'} = -\frac{R^2}{\rho c_s^2}\frac{J_m(\lambda_n R)}{\Delta_{mn}}$$

Для поля смещений внешней оболочки $\mathbf{u}$ мы получим выражение аналогичное (4)

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_m^0 + \sum_{n=0}^{\infty} (p_{mn}\,\alpha_{mn} + p_{mn}^{'}\,\alpha_{mn}^{'})\mathbf{u}_{m,n} = \mathbf{u}_m^0 + \sum_{n=0}^{\infty} \langle \mathbf{p}_{mn}, \tilde{\mathbf{a}}_{mn} \rangle \mathbf{u}_{m,n}$$

где $\mathbf{u}^0$ - общее решение однородной системы для внешней оболочки. Воспользуемся условием непрерывности на внутренней и внешней оболочке. В результате получим линейную алгебраическую систему из двух уравнений относительно p_{mn} и $p_{mn}^{'}$, решение которой запишем в векторной форме по формулам Крамера

$$\mathbf{p}_{mn} = \frac{1}{\delta_{mn}} \sum_{j=1}^{8} \mathbf{A}_{mn}^{j} \mathbf{z}_{jm}; \qquad \mathbf{A}_{mn}^{j} = \begin{pmatrix} \psi_{mn}^{j}\,\tilde{j}_{mn} & -\tilde{\psi}_{mn}^{j} j_{mn} \\ -\psi_{mn}^{j}\,\tilde{y}_{mn} & \tilde{\psi}_{mn}^{j} y_{mn} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{z}_{jm} = \begin{pmatrix} t_{jm} \\ \tilde{t}_{jm} \end{pmatrix}, \quad \delta_{mn} = \begin{vmatrix} y_{mn} & j_{mn} \\ \tilde{y}_{mn} & \tilde{j}_{mn} \end{vmatrix};$$

$$y_{mn} = \frac{1}{\rho_w \omega^2} \frac{\partial N_m^{(1)}(\lambda_n r)}{\partial r}\bigg|_{r=R+0} - \alpha_{mn}\,\hat{l}_{33}\,, \qquad j_{mn} = \frac{1}{\rho_w \omega^2} \frac{\partial J_m^{(1)}(\lambda_n r)}{\partial r}\bigg|_{r=R+0} - \alpha_{mn}^{'}\,\hat{l}_{33}$$

Для удобства явно выразим в структуре решения зависимость от констант t_{jm} и $\tilde{t}_{jm}$. Подставляя выражение для $\mathbf{p}_{mn}$ в (4) получим

$$\mathbf{u}_m = \sum_{j=1}^{8} \left\{ t_{jm} \mathbf{u}_{jm}^0 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\delta_{mn}} \left\langle \left(\mathbf{A}_{mn}^{j}\right)^T \mathbf{a}_{mn}, \mathbf{z}_{jm} \right\rangle \mathbf{u}_{m,n} \right\}$$

Тем самым линейно выражено общее решение неоднородной системы для внутренней оболочки через 16 пока неизвестных констант: восемь t_{jm} и восемь $\tilde{t}_{jm}$.

Заметим, что метод построения решения для подводной части оболочки естественно обобщается на случай любого числа

концентрических соосных цилиндрических оболочек (с различными параметрами) и различных жидкостей между ними. Для этого нужно комбинировать методы, рассмотренные в предыдущих разделах. Единственное требование – равенство уровней жидкости во всех объемах.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПЕДАНСА

Понятие входного импеданса для цилиндрической оболочки

Введем обобщенные вектора скоростей $\mathbf{v}$ и сил $\mathbf{f}$ по формулам $\mathbf{v} = \left(v_1, v_2, v_3, v_4,\right)^T = \mathbf{U}^{\partial}\mathbf{u}$, $\mathbf{f} = \left(f_1, f_2, f_3, f_4\right)^T = \mathbf{F}^{\partial}\mathbf{u}$. И пусть смещение $\mathbf{u}$ можно представить в виде $\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{4} t_j \mathbf{u}^j = \mathbf{Ut}$. Здесь для удобства дальнейшей записи введем в рассмотрение вектор $\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3, t_4)^T$ и матрицу $\mathbf{U} = (\mathbf{u}^1; \mathbf{u}^2; \mathbf{u}^3; \mathbf{u}^4)$, столбцы которой образованы из векторов $\mathbf{u}^j$, $j = 1,2,3,4$. Тогда $\mathbf{v} = \mathbf{U}^{\partial}\mathbf{u} = \mathbf{U}^{\partial}\mathbf{Ut} \equiv \mathbf{Ut}$. Аналогично представим и силу $\mathbf{f} = \mathbf{F}^{\partial}\mathbf{u} = \mathbf{F}^{\partial}\mathbf{Ut} \equiv \mathbf{Ft}$.

Рассмотрим сечение $z = z_0$ оболочки. Входной импеданс оболочки[15] при $z = z_0$, определяется как матрица $\mathbf{Z}$, связывающая кинематические переменные (вектор обобщенных скоростей) и динамические переменные (вектор обобщенных сил), вычисленные при $z = z_0$, $\mathbf{f} = \mathbf{Z}\partial_t\mathbf{u}$. Учитывая стационарность процесса, вектор обобщенных скоростей отличается от вектора обобщенных координат лишь множителем $(-i\omega)$, который, для удобства, будем относить к матрице, сохраняя за ней прежнее обозначение, т.е. $\mathbf{f} = \mathbf{Zu}$. Подставляя сюда выражения для $\mathbf{f}$ и $\mathbf{u}$ получим $\mathbf{Ft} = \mathbf{ZUt}$. Отсюда, ввиду произвола в задании вектора $\mathbf{t}$, получаем выражение для импеданса $\mathbf{Z} = \mathbf{FU}^{-1}$. Заметим, что для получения явного выражения для импеданса $\mathbf{Z}$, нам достаточно знать явные выражения для вектор-функций $\mathbf{u}^j$. Способ их определения будет виден из нижеприведенного рассмотрения.

Входной импеданс подводной части цилиндрической оболочки

В качестве примера найдем входной импеданс при $z = H$ подводной части $0 < z < H$ цилиндрической оболочки, жестко закрепленной при $z = 0$ и окруженной жидкостью до уровня $z = H$. Поле (1б) в погруженной части оболочки представим в виде (достаточно рассматривать фиксированную гармонику по m и этот индекс будем опускать)

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{8} t_j \mathbf{u}^j = (\mathbf{U}; \mathbf{U})(\mathbf{t}; \hat{\mathbf{t}}) = \mathbf{Ut} + \mathbf{U}\hat{\mathbf{t}}.$$

Здесь блок-матрица $(\mathbf{U};\mathbf{U})$ образована из двух блоков – матриц $\mathbf{U}$ и $\mathbf{U}$ размерности 3*4, составленных из векторов-столбцов $\mathbf{u}^j$; $\mathbf{U}=\left(\mathbf{u}^1;\mathbf{u}^2;\mathbf{u}^3;\mathbf{u}^4\right)$, $\mathbf{U}=\left(\mathbf{u}^5;\mathbf{u}^6;\mathbf{u}^7;\mathbf{u}^8\right)$, а вектор $(\mathbf{t};\hat{\mathbf{t}})$ - из компонент двух векторов $\mathbf{t}$ и $\hat{\mathbf{t}}$; $\mathbf{t}=(t_1,t_2,t_3,t_4)$, $\hat{\mathbf{t}}=(t_5,t_6,t_7,t_8)$. Рассмотрим условие закрепленного основания оболочки $\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{u}\right)\Big|_{z=0}=\mathbf{0}$. В результате получим линейную однородную систему из четырех уравнений относительно восьми неизвестных. При условии, что ранг матрицы равен четырем, можно выразить (если надо переобозначив) все неизвестные через первые четыре неизвестных. Тем самым решение исходной системы можно представить в виде

$$\mathbf{u}=\mathbf{U}\mathbf{t}+\mathbf{U}\hat{\mathbf{t}}=\left(\mathbf{U}-\mathbf{U}\mathbf{U}_0^{-1}\mathbf{U}_0\right)\mathbf{t}\equiv\mathbf{U}\mathbf{t}=\sum_{j=1}^{4}t_j\mathbf{u}^j;\qquad \mathbf{U}=\mathbf{U}-\mathbf{U}\mathbf{U}_0^{-1}\mathbf{U}_0,\qquad \mathbf{U}_0=(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=0},$$

где обозначим через $\mathbf{u}^j$ вектор, образованный из j-ого столбца матрицы $\mathbf{U}$. Далее, действуя как в начале предыдущего раздела, получаем явное выражение для матрицы импеданса $\mathbf{Z}$ при $z=H$, которое распишем подробнее с учетом полученных представлений для матриц $\mathbf{U}$

$$\mathbf{Z}=\mathbf{F}\mathbf{U}^{-1}=\left[\left(\mathbf{F}^{\partial}\mathbf{U}\right)\Big|_{z=H}\right]\left[\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{U}\right)\Big|_{z=H}\right]^{-1}=\left[\mathbf{F}_H-\mathbf{F}_H\mathbf{U}_0^{-1}\mathbf{U}_0\right]\left[\mathbf{U}_H-\mathbf{U}_H\mathbf{U}_0^{-1}\mathbf{U}_0\right]^{-1}$$

Здесь введены новые (числовые) матрицы $\mathbf{F}_H=(\mathbf{F}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=H}$, $\mathbf{U}_H=(\mathbf{V}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=H}$, $\mathbf{F}_H=(\mathbf{F}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=H}$, $\mathbf{U}_H=(\mathbf{V}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=H}$. В случае же свободного основания $z=0$ цилиндрической оболочки - получим аналогичные формулы, но уже с заменой матрицы $\mathbf{U}_0$ на матрицу $\mathbf{F}_0=(\mathbf{F}^{\partial}\mathbf{U})\Big|_{z=0}$.

Дисперсионное уравнение для цилиндрической оболочки, частично погруженной в жидкость, в терминах импедансов

Рассмотрим надводную часть оболочки, занимающую положение $H<z<l$. Пусть она жестко закреплена при $z=l$. Входной импеданс надводной части оболочки при $z=H$ находится аналогично, с учетом отсутствия его контакта с жидкостью. Значком «+» пометим полученный импеданс $\mathbf{Z}_+$ надводной части, а также обозначения обобщенных скоростей $\mathbf{v}_+$ и сил $\mathbf{f}_+$ на границе $z=H$ со стороны верхней, надводной части оболочки, а знаком «-» импеданс подводной части $\mathbf{Z}_-$ и значения обобщенных скоростей и сил со стороны подводной части границы $z=H$ (через $\mathbf{v}_-$ и $\mathbf{f}_-$ соответственно). Импедансы $\mathbf{Z}_\pm$ связывают

соответствующие вектора обобщенных скоростей и сил: $\mathbf{Z}_{-}\mathbf{v}_{-}=\mathbf{f}_{-}$, при $z=H-0$ и $\mathbf{Z}_{+}\mathbf{v}_{+}=\mathbf{f}_{+}$, при $z=H+0$. Запишем условие непрерывности обобщенных векторов скоростей $\mathbf{v}$ и сил $\mathbf{f}$ при переходе через границу раздела $z=H$ подводной и надводной частей оболочки: $\mathbf{v}_{-}=\mathbf{v}_{+}\equiv\mathbf{v},\ \mathbf{f}_{-}=\mathbf{f}_{+}\equiv\mathbf{f}$. Отсюда $(\mathbf{Z}_{-}-\mathbf{Z}_{+})\mathbf{v}=\mathbf{0}$. Условие существования нетривиального решения этой системы имеет вид $\det(\mathbf{Z}_{-}-\mathbf{Z}_{+})=0$. Решая это дисперсионное уравнение, мы получаем собственные частоты системы жидкость-цилиндр и, соответственно, собственные вектора системы. Пока это значение обобщенных смещений только на границе $z=H$. Учитывая выражения

$$\mathbf{v}=\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{u}_{-}\right)\Big|_{z=H-0}=\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{U}_{-}\mathbf{t}_{-}\right)\Big|_{z=H-0}=\left(\mathbf{U}^{\partial}\mathbf{U}_{-}\right)\Big|_{z=H-0}\mathbf{t}_{-}\equiv\mathbf{U}_{-}\mathbf{t}_{-}$$

получим для подводной и надводной частей оболочки значения векторов $\mathbf{t}_{-}=\mathbf{U}_{-}^{-1}\mathbf{v}$, $\mathbf{t}_{+}=\mathbf{U}_{+}^{-1}\mathbf{v}$ соответственно, а, следовательно, и явный вид для собственных мод подводной и надводной частей оболочки: $\mathbf{u}_{-}=\mathbf{U}_{-}\mathbf{t}_{-}=\mathbf{U}_{-}\mathbf{U}_{-}^{-1}\mathbf{v}$, $\mathbf{u}_{+}=\mathbf{U}_{+}\mathbf{t}_{+}=\mathbf{U}_{+}\mathbf{U}_{+}^{-1}\mathbf{v}$. Тем самым, мы имеем законченный вид решения задачи в терминах вектора смещений оболочки $\mathbf{u}(\varphi,z)$ и давления в среде $P(r,\varphi,z)$.

Отметим важный частный случай импедансов, когда надводная часть оболочки $H<z\le l$ отсутствует. Тогда, в случае свободного края при $z=H$, дисперсионное уравнение превращается в $\det\mathbf{Z}_{-}=0$. Учитывая, что дисперсионное уравнение можно записать и в терминах матриц адмитансов $\det(\mathbf{Z}_{+}^{-1}-\mathbf{Z}_{-}^{-1})=0$, в случае жесткого закрепления верхнего края $z=H$, получим $\det\mathbf{Z}_{-}^{-1}=0$.

Падение волны по цилиндру, частично погруженному в жидкость

Рассмотрим случай, когда надводная часть оболочки уходит на $+\infty$. Пусть из $+\infty$ по оболочке бежит волна $t_5\mathbf{u}^5$ (здесь t_5 заданная амплитуда). Тогда поле в надводной части оболочки имеет вид $\mathbf{u}_{+}=\sum_{j=1}^{4}t_j\mathbf{u}^j+t_5\mathbf{u}^5=\mathbf{U}_{+}\mathbf{t}_{+}+t_5\mathbf{u}^5$ (учтем, что все волны в надводной части должны выбираться согласно принципу предельного поглощения [17], поэтому, в частности $t_j=0,\ j=6,7,8$). Рассмотрим вектора обобщенных смещений и сил

$$\begin{Bmatrix}\mathbf{v}_{+}\\ \mathbf{f}_{+}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\mathbf{U}^{\partial}\\ \mathbf{F}^{\partial}\end{Bmatrix}\mathbf{u}_{+}=\begin{Bmatrix}\mathbf{U}^{\partial}\\ \mathbf{F}^{\partial}\end{Bmatrix}\left(\mathbf{U}_{+}\mathbf{t}_{+}+t_5\mathbf{u}^5\right)=\begin{Bmatrix}\mathbf{U}_{+}\\ \mathbf{F}_{+}\end{Bmatrix}\mathbf{t}_{+}+t_5\begin{Bmatrix}\mathbf{v}^5\\ \mathbf{f}^5\end{Bmatrix}$$

Воспользуемся условием непрерывности на границе $z = H$ обобщенных векторов скоростей и сил и тем, что импеданс ($\mathbf{Z}_{-}\mathbf{v}_{-} = \mathbf{f}_{-}$) связывает соответствующие вектора обобщенных скоростей и сил для погруженной части оболочки при $z = H - 0$. Отсюда находится вектор неизвестных $\mathbf{t}_{+}$:

$$\mathbf{Z}_{-}\left(\mathbf{U}_{+}\mathbf{t}_{+} + t_5\mathbf{v}^5\right) = \mathbf{F}_{+}\mathbf{t}_{+} + t_5\mathbf{f}^5 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{t}_{+} = t_5\left(\mathbf{Z}_{-}\mathbf{U}_{+} - \mathbf{F}_{+}\right)^{-1}\left(\mathbf{f}^5 - \mathbf{Z}_{-}\mathbf{v}^5\right)$$

и, следовательно, определяется поле в надводной части оболочки. Чтобы найти поле в подводной части, действуем, так же, как и в предыдущем разделе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено точное аналитическое решение задачи о стационарных колебаниях системы цилиндрических оболочек, частично погруженных в жидкость. Решение выписано в терминах входных импедансов, что позволяет рассматривать в качестве надводной части не только тонкие оболочки, но и более сложные конструкции, при условии, что известны их входные импедансы. На базе полученных решений, можно строить решения задач о вынужденных колебаниях, раскладывая их по соответствующим модам однородной задачи.

Автор выражает искреннюю признательность профессору Д.П. Коузову за полезное обсуждение и конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
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.
3. J.A. Lavrov. On the free vibrations of acoustical resonator with elastic cylindrical wall and rigid flat end. Acoustical Journal, 1997, 3, p. 425-428
4. J.A. Lavrov. On the frequencies of free vibrations in the liquid, separating rigid and elastic walls of the finite length. Papers of scientific seminars of PDMI, 2002

5. G.V. Filippenko, D.P. Kouzov. On the vibration of membrane partially protruding above the surface of a liquid. Journal of Computational Acoustics (JCA), 2001, **9**, 4, p.1599-1609
6. Filippenko G.V. Vibration of the cylindrical supports and tubes partially submerged into the water // Proceedings of the 8th International Symposium "Transport Noise and Vibration", St.-Petersburg, Russia, June 4-6, 2006, CD format, 2006. Article s2-5, 7 pages, Published by East-European Acoustical Association, ISBN 5-900703-92-4
7. Filippenko G.V. Vibration of the cylindrical supports and tubes partially submerged into the water // Proceedings of the 8th International Symposium "Transport Noise and Vibration", St.-Petersburg, Russia, June 4-6, 2006, CD format, 2006. Article s2-5, 7 pages, Published by East-European Acoustical Association, ISBN 5-900703-92-4
8. Kouzov D.P., Filippenko G.V. Vibrations of an elastic plate partially immersed in a liquid. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2010, Т. 74, № 5, С. 617-626
9. 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
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Елисеев В.В. Механика упругих тел. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.

17.Sveshnikov, A. V. The limit absorption principle for a wave guide //Doklady Akademiji Nauk SSSR 1951, 80, 345–347 (In Russian)

George V.Filippenko

THE VIBRATIONS OF RESERVOIRS AND CYLINDRICAL SUPPORTS OF HYDRO TECHNICAL CONSTRUCTIONS PARTIALLY SUBMERGED INTO THE LIQUID.

Institute of Mechanical Engineering, St.Petersburg, Russia

Abstract

Thefree oscillations of system of concentric cylindrical shells partially submerged in to the fluid and vertically attached to a reservoir bottom are considered. The statement of the problem is considered in the rigorous statement. The dispersion equation and reflection coefficients are found on the base of exact analytical solution of the submerged part of the single cylindrical shell. The generalizations of this method are discussed. The method of input impedances is used for constructing the dispersion equations and generalized displacements and forces. Look-alike systems can model the supports of hydro technical constructions, oil rigs, wind electro stations, standing on the shelf, reservoirs with fluid etc.

Key words: cylindrical shell, free vibrations of the shell, income impedance of the shell, boundary contact problem of acoustics

УДК 621.01/.03

М.Г. Яруллин[1], И.А. Галиуллин[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ЗВЕНЬЕВ МОДИФИКАЦИЙ МЕХАНИЗМА БРИКАРДА

[1]Мунир Гумерович Яруллин: д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Машиноведение и инженерная графика» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Yarullinmg@yahoo.com

[2]Ильнар Айратович Галиуллин**:** аспирант кафедры «Машиноведение и инженерная графика» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, TGaliullin@gmail.com

Аннотация

Рассматривается проблема исследования кинематики новых модификаций механизма Брикарда. Для определения кинематических параметров механизма выбраны системы координат, связанные с шарнирами и звеньями механизма специальным образом, определены матрицы перехода между этими системами координат и выявлены зависимости углов поворота ведомых звеньев от угла поворота ведущего. Для простоты здесь излагаются результаты теоретических исследований модификации механизма Брикарда с параметрами $L_i=L$, $\alpha_i=90$.

Ключевые слова: механизм Брикарда, шестизвенный шарнирный механизм, кинематика механизма, вращательные пары, оси шарниров.

Рассмотрим пространственный механизм, показанный на рис. 1. Он состоит из шести одинаковых звеньев (AB, BC, CD, DE, EF, FA), соединённых между собой с помощью одноподвижных вращательных кинематических пар (A, B, C, D, E, F).

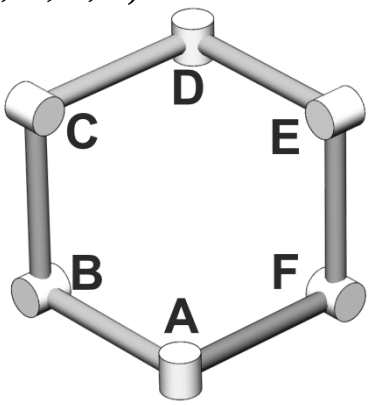


Рис. 1. Структурная схема механизма Брикарда

Звено AB механизма принимается за стойку, звено BC принимается ведущим. Рассматриваемый механизм известен как механизм Брикарда [1]. Теоретический расчет степени подвижности механизмов описан в обширной литературе (см., напр., [2–6]). Однако данный механизм интересен своей парадоксальной единичной подвижностью, которая не совпадает с теоретической [7]. Существуют предложения по практическому применению механизма Брикарда [8-11], исследование его кинематики является актуальной задачей.

Для исследования кинематики звеньев механизма, а также его характерных точек, необходимо выбрать системы координат шарниров механизма.

Для пояснения принципа выбора систем координат обратимся к рис. 2 и рассмотрим звено AB.

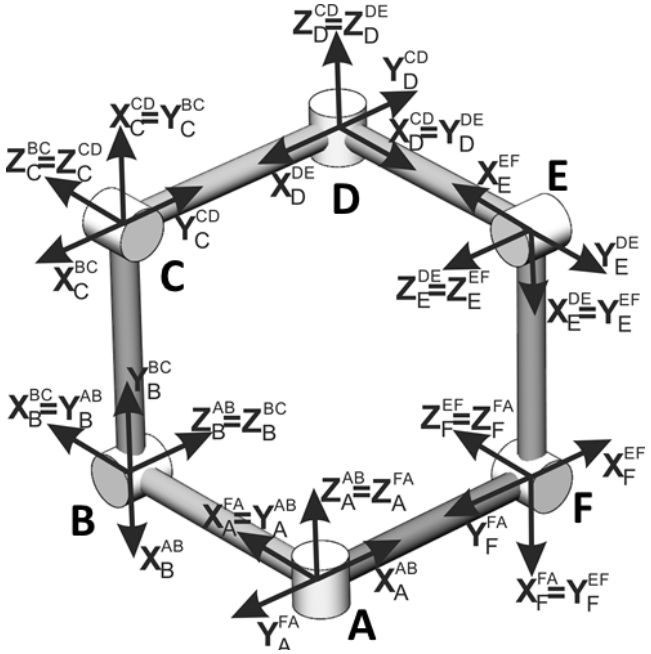


Рис. 2. Схема систем координат для исследования кинематики

Звено AB механизма имеет два шарнира (шарниры A и B на рис. 2). В центре шарнира A расположим систему координат так, чтобы ось Z_A совпадала с направлением оси шарнира. Причём положительное направление оси Z_A первого шарнира первого звена выбирается произвольным образом. Ось Y_A расположим вдоль звена в направлении шарнира B. Ось X_A расположим так, чтобы тройка векторов X_A, Y_A и Z_A образовывала правую систему координат.

Аналогично в центре шарнира B расположим систему координат так, чтобы ось Z_B совпадала с осью шарнира B. Положительное направление оси Z_B выберем так, чтобы при взгляде на звено B со стороны звена A поворот оси Z_B происходил по часовой стрелке. Ось Y_B расположим вдоль звена в направлении от шарнира A. Ось X_B расположим так, чтобы тройка векторов X_B, Y_B и Z_B образовывала правую систему координат.

Далее рассмотрим соединение звеньев AB и BC. Шарнир B будет иметь две системы координат:

$X_B^{AB}, Y_B^{AB}, Z_B^{AB}$ – системы координат шарнира B как части звена AB,

$X_B^{BC}, Y_B^{BC}, Z_B^{BC}$ – системы координат шарнира B как части звена BC.

Ось Z_B^{BC} шарнира совпадает с осью Z_B^{AB}. Ось Y_B^{AB} направлена вдоль звена AB в направлении от звена A. Ось Y_B^{BC} направлена вдоль звена BC в направлении к звену C. Оси X_B^{AB} и X_B^{BC} выбираются так, чтобы образовывались правые системы координат.

Таким образом, каждый шарнир механизма будет иметь две системы координат. Для исследования кинематики звеньев механизма необходимо 12 систем координат, которые показаны на рис. 2.

Обозначим α_A – угол между осями X систем координат шарнира A, как показано на рис. 3.

Аналогично обозначим:

α_B – угол между осями X систем координат шарнира B, α_C– угол между осями X систем координат шарнира C, α_D– угол между осями X систем координат шарнира D, α_E– угол между осями X систем координат шарнира E, α_F– угол между осями X систем координат шарнира F.

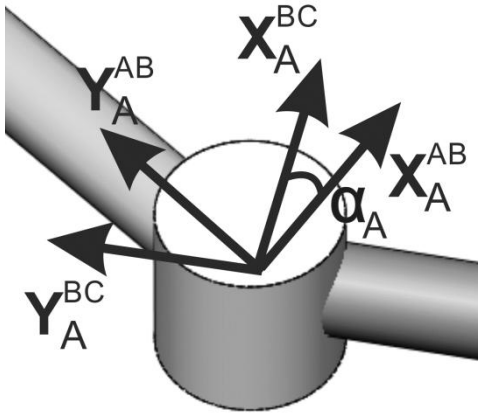


Рис. 3. Схема ориентации осей различных систем координат

Проблема исследований

Звено BC рассматриваемого механизма является ведущим. Следовательно α_B – угол поворота ведущего звена. Значение α_B является входным параметром системы. Целью данного исследования является выявление зависимости $\alpha_C, \alpha_D, \alpha_E, \alpha_F, \alpha_A$ от угла поворота ведущего звена α_B.

Принцип перехода от одной системы координат к другой

Обозначим систему координат шарнира A, принадлежащую звену AB ($X_A^{AB}, Y_A^{AB}, Z_A^{AB}$) через M_A^{AB}. Аналогично обозначим систему координат шарнира A как часть звена FA через M_A^{FA}.

Проекцию X_A^{FA} на X_A^{AB} обозначим как ($X_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB}$). Тогда:

($X_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB}$) - проекция X_A^{FA} на X_A^{AB}, ($X_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB}$) - проекция X_A^{FA} на Y_A^{AB}, ($X_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB}$) - проекция X_A^{FA} на Z_A^{AB}.

Аналогично:

$(Y_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB})$ - проекция Y_A^{FA} на X_A^{AB}, $(Y_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB})$ - проекция Y_A^{FA} на Y_A^{AB}, $(Y_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB})$ - проекция Y_A^{FA} на Z_A^{AB}, $(Z_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB})$ - проекция Z_A^{FA} на X_A^{AB}, $(Z_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB})$ - проекция Z_A^{FA} на Y_A^{AB},$(Z_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB})$ - проекция Z_A^{FA} на Z_A^{AB}.

Записав полученные проекции в виде матрицы, получим матрицу перехода от одной системы координат к другой:

$$(M_A^{AB} \rightarrow M_A^{FA}) = \begin{pmatrix} X_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & X_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & X_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \\ Y_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Y_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Y_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \\ Z_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Аналогично матрица перехода от M_A^{FA} к M_F^{FA} будет иметь вид:

$$(M_A^{FA} \rightarrow M_E^{FA}) = \begin{pmatrix} X_E^{FA} \rightarrow X_A^{FA} & X_E^{FA} \rightarrow Y_A^{FA} & X_E^{FA} \rightarrow Z_A^{FA} \\ Y_E^{FA} \rightarrow X_A^{FA} & Y_E^{FA} \rightarrow Y_A^{FA} & Y_E^{FA} \rightarrow Z_A^{FA} \\ Z_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тогда матрица перехода от системы координат M_E^{FA} к системе координат M_A^{AB} может быть получена путём последовательного перехода от M_E^{FA} к M_A^{FA}, и от M_A^{FA} к M_A^{AB}. Таким образом:

$$(M_A^{AB} \rightarrow M_E^{FA}) = (M_A^{FA} \rightarrow M_E^{FA})\,(M_A^{AB} \rightarrow M_A^{FA}). \quad (3)$$

Подставив (1) и (2) в (3) получим:

$$(M_A^{AB} \rightarrow M_E^{FA}) = \begin{pmatrix} X_E^{FA} \rightarrow X_A^{FA} & X_E^{FA} \rightarrow Y_A^{FA} & X_E^{FA} \rightarrow Z_A^{FA} \\ Y_E^{FA} \rightarrow X_A^{FA} & Y_E^{FA} \rightarrow Y_A^{FA} & Y_E^{FA} \rightarrow Z_A^{FA} \\ Z_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \end{pmatrix} \cdot$$

$$\cdot \begin{pmatrix} X_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & X_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & X_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \\ Y_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Y_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Y_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \\ Z_A^{FA} \rightarrow X_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Y_A^{AB} & Z_A^{FA} \rightarrow Z_A^{AB} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Применение к механизму Брикарда

Применим описанный принцип перехода к механизму Брикарда. Систему координат шарнира B звена AB примем за неподвижную базовую систему координат, а систему координат шарнира D звена DE примем за целевую систему координат, то есть:

M_B^{AB} – базовая система координат,

M_D^{DE} – целевая система координат.

Перейти от целевой системы координат к базовой можно двумя разными направлениями, показанными на рис. 4.

Переход от M_D^{DE} к M_B^{AB} через шарниры D, C, B:

$$(M_D^{DE} \rightarrow M_B^{AB}) = (M_D^{CD} \rightarrow M_D^{DE}) \cdot (M_C^{CD} \rightarrow M_D^{CD}) \cdot (M_C^{BC} \rightarrow M_C^{CD}) \cdot$$
$$\cdot (M_B^{BC} \rightarrow M_C^{BC}) \cdot (M_B^{AB} \rightarrow M_B^{BC}). \quad (5)$$

Переход от M_D^{CD} к M_B^{AB} через шарниры D, E, F, A, B:

$$(M_D^{DE} \to M_B^{AB}) = (M_E^{DE} \to M_D^{DE}) \cdot (M_E^{EF} \to M_E^{DE}) \cdot (M_F^{EF} \to M_E^{EF}) \cdot$$
$$\cdot (M_F^{FA} \to M_F^{EF}) \cdot (M_A^{FA} \to M_F^{FA}) \cdot (M_A^{AB} \to M_A^{FA}) \cdot (M_B^{AB} \to M_A^{AB}). \quad (6)$$

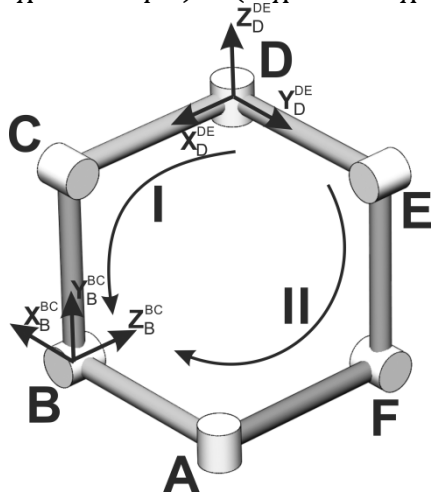


Рис. 4. Два направления перехода к базовой системе координат

Матрицы переходов от одних систем координат шарниров к другим показаны в таблице. Подставив их в (5) и (6), получим:

$$(M_D^{DE} \to M_B^{AB}) = \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_D) & \sin(-\alpha_D) & 0 \\ -\sin(-\alpha_D) & \cos(-\alpha_D) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha_C) & \sin(\alpha_C) & 0 \\ -\sin(\alpha_C) & \cos(\alpha_C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha_B) & \sin(\alpha_B) & 0 \\ -\sin(\alpha_B) & \cos(\alpha_B) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

$$(M_D^{DE} \to M_B^{AB}) = \begin{pmatrix} N_{XX}^{DCB} & N_{XY}^{DCB} & N_{XZ}^{DCB} \\ N_{YX}^{DCB} & N_{YY}^{DCB} & N_{YZ}^{DCB} \\ N_{ZX}^{DCB} & N_{ZY}^{DCB} & N_{ZZ}^{DCB} \end{pmatrix},$$

где

$N_{XX}^{DCB} = \cos(\alpha_C)\sin(\alpha_B)\sin(\alpha_D) - \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_D)$,
$N_{XY}^{DCB} = -\cos(\alpha_D)\sin(\alpha_B) - \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_C)\sin(\alpha_D)$,
$N_{XZ}^{DCB} = -\sin(\alpha_D)\sin(\alpha_C)$,
$N_{YX}^{DCB} = -\cos(\alpha_B)\sin(\alpha_D) - \cos(\alpha_D)\cos(\alpha_C)\sin(\alpha_B)$,
$N_{YY}^{DCB} = \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_D)\cos(\alpha_C) - \sin(\alpha_B)\sin(\alpha_D)$,
$N_{YZ}^{DCB} = \cos(\alpha_D)\sin(\alpha_C)$,
$N_{ZX}^{DCB} = -\sin(\alpha_B)\sin(\alpha_C)$,
$N_{ZY}^{DCB} = \cos(\alpha_B)\sin(\alpha_C)$,
$N_{ZZ}^{DCB} = -\cos(\alpha_C)$.

С другой стороны:

$$(M_D^{DE} \to M_B^{AB}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha_E) & \sin(\alpha_E) & 0 \\ -\sin(\alpha_E) & \cos(\alpha_E) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(-\alpha_F) & \sin(-\alpha_F) & 0 \\ -\sin(-\alpha_F) & \cos(-\alpha_F) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot$$
$$\cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha_A) & \sin(\alpha_A) & 0 \\ -\sin(\alpha_A) & \cos(\alpha_A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

$$(M_D^{DE} \to M_B^{AB}) = \begin{pmatrix} N_{XX}^{DEFAB} & N_{XY}^{DEFAB} & N_{XZ}^{DEFAB} \\ N_{YX}^{DEFAB} & N_{YY}^{DEFAB} & N_{YZ}^{DEFAB} \\ N_{ZX}^{DEFAB} & N_{ZY}^{DEFAB} & N_{ZZ}^{DEFAB} \end{pmatrix},$$

где

$N_{XX}^{DEFAB} = -\cos(\alpha_F)$,
$N_{XY}^{DEFAB} = \cos(\alpha_A)\sin(\alpha_F)$,
$N_{XZ}^{DEFAB} = -\sin(\alpha_F)\sin(\alpha_A)$,
$N_{YX}^{DEFAB} = \cos(\alpha_E)\sin(\alpha_F)$,
$N_{YY}^{DEFAB} = \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_A)\cos(\alpha_E) - \sin(\alpha_A)\sin(\alpha_E)$,
$N_{YZ}^{DEFAB} = -\cos(\alpha_A)\sin(\alpha_E) - \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_E)\sin(\alpha_A)$,
$N_{ZX}^{DEFAB} = -\sin(\alpha_F)\sin(\alpha_E)$,
$N_{ZY}^{DEFAB} = -\cos(\alpha_E)\sin(\alpha_A) - \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_A)\sin(\alpha_E)$,
$N_{ZZ}^{DEFAB} = \cos(\alpha_F)\sin(\alpha_A)\sin(\alpha_E) - \cos(\alpha_A)\cos(\alpha_E)$.

$$\begin{cases} N_{XX}^{DCB} = N_{XX}^{DEFAB}, \\ N_{XY}^{DCB} = N_{XY}^{DEFAB}, \\ N_{XZ}^{DCB} = N_{XZ}^{DEFAB}, \\ N_{YX}^{DCB} = N_{YX}^{DEFAB}, \\ N_{YY}^{DCB} = N_{YY}^{DEFAB}, \\ N_{YZ}^{DCB} = N_{YZ}^{DEFAB}, \\ N_{ZX}^{DCB} = N_{ZX}^{DEFAB}, \\ N_{ZY}^{DCB} = N_{ZY}^{DEFAB}, \\ N_{ZZ}^{DCB} = N_{ZZ}^{DEFAB}. \end{cases}$$

то

$$\begin{cases} \cos(\alpha_C)\sin(\alpha_B)\sin(\alpha_D) - \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_D) = -\cos(\alpha_F), \\ -\cos(\alpha_D)\sin(\alpha_B) - \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_C)\sin(\alpha_D) = \cos(\alpha_A)\sin(\alpha_F), \\ -\sin(\alpha_D)\sin(\alpha_C) = -\sin(\alpha_F)\sin(\alpha_A), \\ -\cos(\alpha_B)\sin(\alpha_D) - \cos(\alpha_D)\cos(\alpha_C)\sin(\alpha_B) = \cos(\alpha_E)\sin(\alpha_F), \\ \cos(\alpha_B)\cos(\alpha_D)\cos(\alpha_C) - \sin(\alpha_B)\sin(\alpha_D) = \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_A)\cos(\alpha_E) - \sin(\alpha_A)\sin(\alpha_E), \\ \cos(\alpha_D)\sin(\alpha_C) = -\cos(\alpha_A)\sin(\alpha_E) - \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_E)\sin(\alpha_A), \\ -\sin(\alpha_B)\sin(\alpha_C) = -\sin(\alpha_F)\sin(\alpha_E), \\ \cos(\alpha_B)\sin(\alpha_C) = -\cos(\alpha_E)\sin(\alpha_A) - \cos(\alpha_F)\cos(\alpha_A)\sin(\alpha_E), \\ -\cos(\alpha_C) = \cos(\alpha_F)\sin(\alpha_A)\sin(\alpha_E) - \cos(\alpha_A)\cos(\alpha_E). \end{cases} \quad (10)$$

Решив систему, получим: $\alpha_A = \alpha_C = \alpha_E$ и $\alpha_B = \alpha_D = \alpha_F$.

$$\alpha_A = arccos\left(-\frac{\cos(\alpha_B)}{(1+\cos(\alpha_B))}\right) \quad (11)$$

Учитывая, что $\alpha_A = \alpha_C = \alpha_E$ и $\alpha_B = \alpha_D = \alpha_F$, последняя формула позволяет найти значения углов поворота всех звеньев механизма. Взяв первую производную от (11), получаем выражение для определения угловых скоростей звеньев (уравнение представлено в виде, принятом в системах компьютерных вычислений).

ω = -(sin(x)/(cos(x) + 1) - (cos(x)·sin(x))/(cos(x) + 1)^2)/(1 - cos(x)^2/(cos(x) + 1)^2)^(1/2).

Взяв вторую производную, получаем выражение для определения угловых ускорений звеньев (уравнение представлено в виде, принятом в системах компьютерных вычислений):

ε = (cos(x)^2/(cos(x) + 1)^2 - (2·sin(x)^2)/(cos(x) + 1)^2 - cos(x)/(cos(x) + +1) + (2·cos(x)·sin(x)^2)/(cos(x) + 1)^3)/(1 - cos(x)^2/(cos(x) + 1)^2)^(1/2) - -((sin(x)/(cos(x) + 1) - (cos(x) ·sin(x))/(cos(x) + 1)^2) · · ((2·cos(x)^2·sin(x))/(cos(x) + 1)^3 - (2·cos(x) ·sin(x))/(cos(x) + 1)^2))/(2· (1 - -cos(x)^2/(cos(x) + 1)^2)^(3/2)).

Таким образом, определены необходимые уравнения для исследования кинематики звеньев механизма Брикарда, составлением векторных уравнений соответствующих контуров и матрицами перехода от одной системы координат к другой.

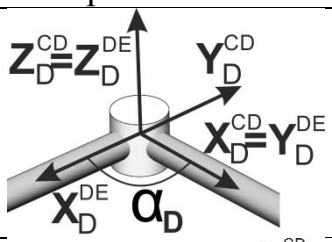
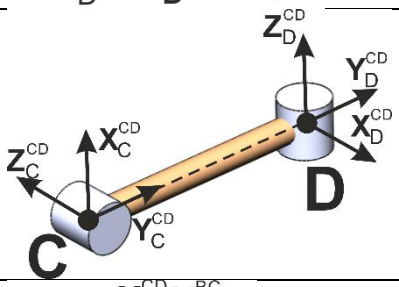
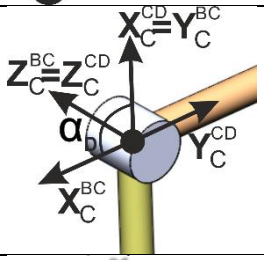
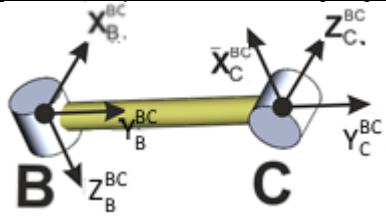
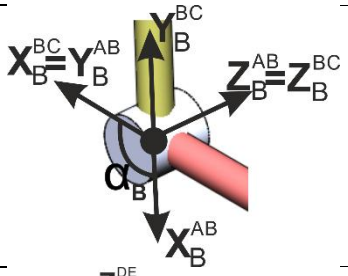
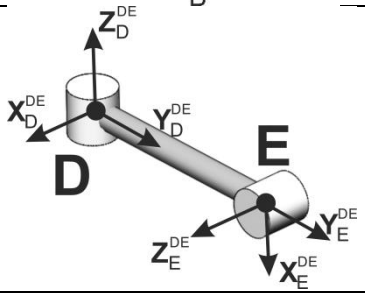
Получены зависимости углов поворота ведомых звеньев от угла поворота ведущего звена, которые позволят определить диапазоны вращения звеньев. Кроме того, полученные теоретические уравнения являются основой для кинематического анализа механизма в целом.

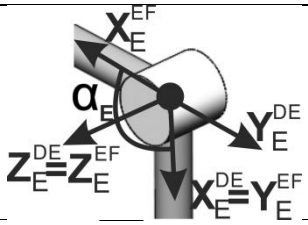
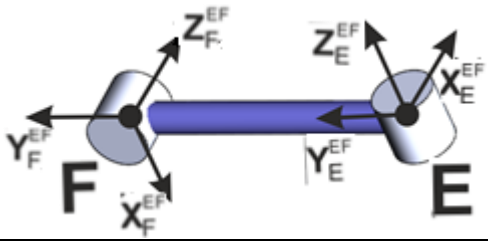
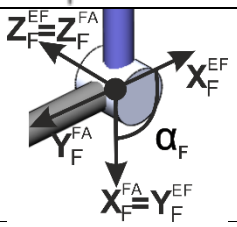
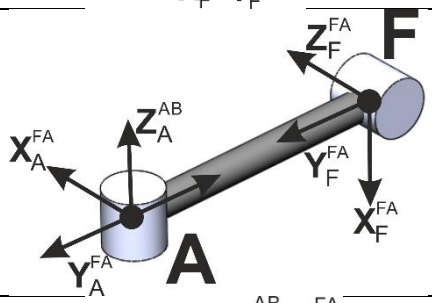
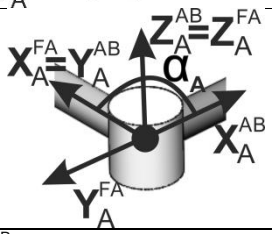
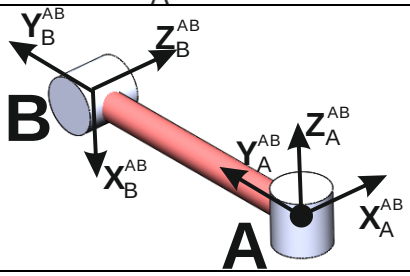
Также выявлено, что углы поворота звеньев через одного, начиная с ведущего звена, изменяются по линейному закону, а зависимости углов поворота остальных звеньев от угла поворота ведущего звена описываются одинаковыми законами.

Указанный метод применим ко всем полученным нами новым модификациям механизма Брикарда [12].

Таблица

Матрицы переходов осей шарниров

Матрица	Изображение	Значение
$(M_D^{CD} \rightarrow M_D^{DE})$		$\begin{pmatrix} \cos(-\alpha_D) & \sin(-\alpha_D) & 0 \\ -\sin(-\alpha_D) & \cos(-\alpha_D) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_C^{CD} \rightarrow M_D^{CD})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(M_C^{BC} \rightarrow M_C^{CD})$		$\begin{pmatrix} \cos(\alpha_C) & \sin(\alpha_C) & 0 \\ -\sin(\alpha_C) & \cos(\alpha_C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_B^{BC} \rightarrow M_C^{BC})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(M_B^{AB} \rightarrow M_B^{BC})$		$\begin{pmatrix} \cos(\alpha_B) & \sin(\alpha_B) & 0 \\ -\sin(\alpha_B) & \cos(\alpha_B) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_E^{DE} \rightarrow M_D^{DE})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$(M_E^{EF} \rightarrow M_E^{DE})$		$\begin{pmatrix} \cos(\alpha_E) & \sin(\alpha_E) & 0 \\ -\sin(\alpha_E) & \cos(\alpha_E) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_F^{EF} \rightarrow M_E^{EF})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(M_F^{FA} \rightarrow M_F^{EF})$		$\begin{pmatrix} \cos(-\alpha_F) & \sin(-\alpha_F) & 0 \\ -\sin(-\alpha_F) & \cos(-\alpha_F) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_A^{FA} \rightarrow M_F^{FA})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(M_A^{AB} \rightarrow M_A^{FA})$		$\begin{pmatrix} \cos(\alpha_A) & \sin(\alpha_A) & 0 \\ -\sin(\alpha_A) & \cos(\alpha_A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$(M_B^{AB} \rightarrow M_A^{AB})$		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bricard R. Lecons decinematique. Vol. 2. Paris, 1927.
2. 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.
3. Диментберг Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов.

– М.: Наука, 1982. – 336 с.
4. Зиновьев В.А. Пространственные механизмы с низшими парами. – М.: Гостехиздат, 1952. – 432 с.
5. Мерцалов Н.И. Теория пространственных механизмов. – М.: Гостехиздат, 1951. – 206 с.
6. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1976. – 264 с
7. И.А.Галиуллин, М.Г.Яруллин. Аналитико-критический обзор исследований шарнирных шестизвенных механизмов. // Труды X международной Четаевской конференции. – 2012. – Т.1. – С. 117-126.
8. Chen Y. Design of Structural Mechanisms. St Hugh's College., 2003.
9. Racila L., Dahan M. Bricard Mechanism Used as Translator. 12th IFToMM World Congress, Besançon., 2007.
10. Racila L., Dahan M. 6R Parallel Translational Device. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México., 2011.
11. Yaozhi L., Ying Y., Jingjing L.. A retractable structure based on Bricard linkages and rotating rings of tetrahedra. International Journal of Solids and Structures 45., 2008.
12. И.А.Галиуллин, М.Г.Яруллин. Синтез подвижных шестизвенных механизмов. // Международная научно-техническая конференция «АНТЭ-2013». – 2013. – С. 23-31.

M.G. Yarullin, I.A. Galiullin

KINEMATIC RESEARCH OF BRICARD LINKAGE MODIFICATIONS

KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY
named after A.N.TUPOLEV.

Abstract

This article considers the problem of kinematic research of Bricard linkage modifications. Coordinate systems associated with the joints are chosen to determine the kinematic parameters of the mechanism. Also defined relation between rotation angles of links. For simplicity, here we present the results of theoretical research of Brikard linkage modification with parameters L_i=L, α_i=90.

Keywords: Bricard linkage, 6-R mechanism, kinematics, rotation joints.

REFERENCES

[1] Bricard R. Lecons decinematique. Vol. 2. Paris, 1927.

[2] 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.)
[3] Dimentberg F.M. Teoriya prostranstvennyih sharnirnyih mehanizmov. – M.: Nauka, 1982. – 336 p. (rus.)
[4] Zinovev V.A. Prostranstvennyie mehanizmyi s nizshimi parami. – M.: Gostehizdat, 1952. – 432 p. (rus.)
[5] Mertsalov N.I. Teoriya prostranstvennyih mehanizmov. – M.: Gostehizdat, 1951. – 206 p. (rus.)
[6] Mudrov P.G. Prostranstvennyie mehanizmyi s vraschatelnyimi parami. – Kazan: Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1976. – 264 p. (rus.)
[7] I.A.Galiullin, M.G.Yarullin. Analitiko-kriticheskiy obzor issledovaniy sharnirnyih shestizvennyih mehanizmov. // Trudyi H mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferentsii. – 2012. – T.1. – P. 117 126. (rus.)
[8] Chen Y. the Design of Structural Mechanisms. St Hugh"s College., 2003.
[9] Racila L. M. Dahan Bricard Mechanism Used as Translator. 12th IFToMM World Congress, Besançon., 2007.
[10] Racila L. M. Dahan 6R Parallel Translational Device. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexico., 2011.
[11] Yaozhi L. Y. Ying, Jingjing L.. A retractable structure based on Bricard linkages and rotating rings of tetrahedra. International Journal of Solids and Structures 45., 2008.
[12] I.A.Galiullin, M.G.Yarullin. Sintez podvizhnyih shestizvennyih mehanizmov. // Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «ANTE-2013». – 2013. – P. 23-31. (rus.)

УДК 621.81/85

М.Г. Яруллин[1], М.Р. Мингазов[2]

СИНТЕЗ СТРУКТУРНЫХ МОДИФИКАЦИЙ МЕХАНИЗМА БЕННЕТТА*

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

Марат Ринатович Мингазов
аспирант кафедры «Машиноведение и инженерная графика»
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ)
Россия, Казань
Тел.: 9047679519, E-mail: MaratMingazovR@gmail.com

Аннотация

В статье представлены 32 модификации механизма Беннетта в зависимости от ориентации осей шарниров его звеньев в различных квадрантах пространства. Для каждой модификации определен тип механизма: параллелограмм или антипараллелограмм Беннетта. По результатам системного анализа исследований установлено, что если в механизме Беннетта углы скрещивания осей шарниров находятся в смежных квадрантах, то такой механизм будет являться параллелограммом Беннетта вне зависимости от того, какое звено зафиксировано. Если углы скрещивания осей шарниров находятся в одной квадранте или в накрест лежащих квадрантах, то такой механизм будет являться антипараллелограммом Беннетта.

Ключевые слова: пространственные механизмы, шарнир, звено, вращательная пара, структура, подвижность механизма, скрещивающиеся оси, кривошип, шатун.

Механизм Беннетта – пространственный шарнирный четырехзвенник, впервые описанный английским математиком Беннеттом в 1903 году [9]. Изучением механизма занимались многие авторы [1-8]. Зависимость вращения ведомого звена по отношению к ведущему звену описана в работах [4, 9-10]. Хотя пространственный шарнирный четырехзвенный (4R) механизм является одним из самых простых

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-97090\14).

пространственных механизмов, способных передавать вращательное движение из одной плоскости в другую, на практике он пока не находит широкого применения. Механизм содержит всего четыре звена, связанных четырьмя вращательными парами (рис. 1). 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.

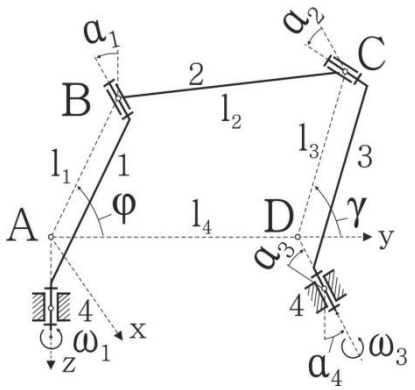


Рис. 1. Структурная схема пространственного 4R механизма

На практике механизм Беннетта подвижен, и его подвижность обусловлена дополнительными условиями, которые накладываются на механизм:

1) длины кратчайших расстояний противолежащих звеньев равны:

$$l_1 = l_3, \qquad l_2 = l_4, \tag{1}$$

где:

l_1 – длина кратчайшего расстояния ведущего кривошипа,

l_3 – длина кратчайшего расстояния ведомого кривошипа.

l_2 – длина кратчайшего расстояния шатуна,

l_4 – длина кратчайшего расстояния стойки.

2) геометрические оси противоположных кинематических пар развернуты относительно друг друга на равные углы α_1 и α_3:

$$\alpha_1 = \alpha_3, \qquad \alpha_2 = \alpha_4, \tag{2}$$

где:

α_1 – угол скрещивания осей шарниров ведущего кривошипа,

α_3 – угол скрещивания осей шарниров ведомого кривошипа,

α_2 – угол скрещивания осей шарниров шатуна,

α_4 – угол скрещивания осей шарниров стойки.

3) концы кратчайших расстояний звеньев совпадают,

4) выполняется равенство:

$$\frac{l_1}{l_2} = \pm \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}. \qquad (3)$$

Наличие знака ± в уравнении (3) указывает на то, что у механизма Беннетта могут быть различные модификации в зависимости от сочетаний значения угла скрещивания геометрических осей кинематических пар соседних звеньев.

В нашей предыдущей работе [7] представлен краткий анализ модификаций пространственного 4R механизма. Данный доклад является её продолжением и посвящена определению 32 модификаций механизма Беннетта в зависимости от ориентации осей шарниров его звеньев в различных квадрантах пространства. Для каждой модификации будет определен тип механизма (параллелограмм или антипараллелограмм Беннетта), а также зависимость вращения ведомого звена по отношению к ведущему.

Модификации пространственного 4R механизма

Согласно тригонометрическим формулам приведения имеем:

$$sin(\pi - \alpha) = sin(\alpha), \qquad (4)$$
$$sin(\pi + \alpha) = -sin(\alpha), \qquad (5)$$
$$sin(2\pi + \alpha) = -sin(\alpha), \qquad (6)$$

На основании формул 4, 5, 6 уравнение 3 можно представить следующим образом:

1) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$, (7)

2) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha'_2}$, (8)

3) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\pi + \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha''_2}$, (9)

4) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin(2\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha'''_2}$, (10)

5) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi - \alpha_1)}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha_2}$, (11)

6) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi - \alpha_1)}{\sin(\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha'_2}$, (12)

7) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi - \alpha_1)}{\sin(\pi + \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha''_2}$, (13)

8) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi - \alpha_1)}{\sin(2\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha'_1}{\sin \alpha'''_2}$, (14)

9) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi + \alpha_1)}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \alpha''_1}{\sin \alpha_2}$, (15)

10) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi + \alpha_1)}{\sin(\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha''_1}{\sin \alpha'_2}$, (16)

11) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi + \alpha_1)}{\sin(\pi + \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha''_1}{\sin \alpha''_2}$, (17)

12) $\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sin(\pi + \alpha_1)}{\sin(2\pi - \alpha_2)} = \frac{\sin \alpha''_1}{\sin \alpha'''_2}$, (18)

13) $$\frac{l_1}{l_2}=\frac{\sin(2\pi-\alpha_1)}{\sin\alpha_2}=\frac{\sin\alpha'''_1}{\sin\alpha_2}\,,\qquad(19)$$

14) $$\frac{l_1}{l_2}=\frac{\sin(2\pi-\alpha_1)}{\sin(\pi-\alpha_2)}=\frac{\sin\alpha'''_1}{\sin\alpha'_2}\qquad(20)$$

15) $$\frac{l_1}{l_2}=\frac{\sin(2\pi-\alpha_1)}{\sin(\pi+\alpha_2)}=\frac{\sin\alpha'''_1}{\sin\alpha''_2}\qquad(21)$$

16) $$\frac{l_1}{l_2}=\frac{\sin(2\pi-\alpha_1)}{\sin(2\pi-\alpha_2)}=\frac{\sin\alpha'''_1}{\sin\alpha'''_2}\,,\qquad(22)$$

На основании формул с (7) по (22) построена схема расположения углов скрещивания шарниров (рис. 2).

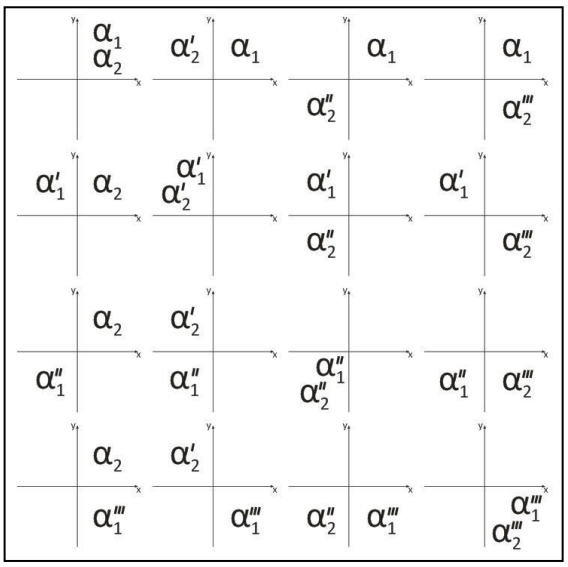


Рис. 2. Схема расположения углов скрещивания осей шарниров

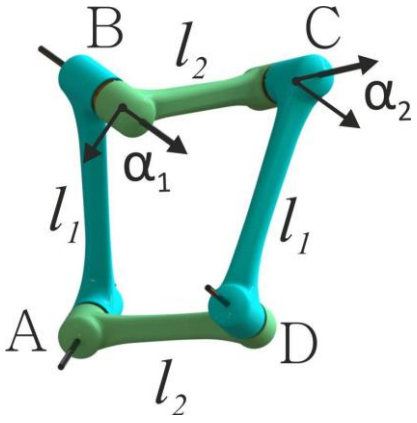


Рис. 3. Пространственный четырехзвенный механизм $l_1 > l_2$

Возьмем пространственный шарнирный четырехзвенный механизм со структурными параметрами l_1, α_1, l_2, α_2 (рис. 3), причем $0° < \alpha_1 < 90°$, $0° < \alpha_2 < 90°$, $l_1 > l_2$. Располагая углы скрещивания осей α_1 и α_2 в различных квадрантах (рис. 3), получим 16 модификаций пространственного механизма (табл. 1). В представленных модификациях пространственных 4R механизмов угол поворота j ведомого звена не пропорционален углу поворота φ ведущего звена и вычисляется по одной из представленных формул:

$$\sin\gamma=\frac{\sin(\varphi)\bullet K_3}{K_1-\cos(\varphi)\bullet K_2}\qquad(23)$$

$$\cos\gamma=\frac{K_1\bullet\cos(\varphi)-K_2}{K_1-\cos(\varphi)\bullet K_2}\qquad(24)$$

где:

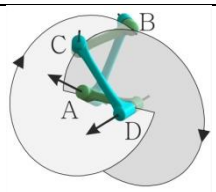
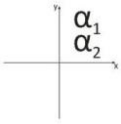
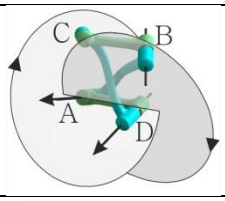
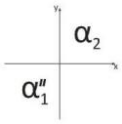
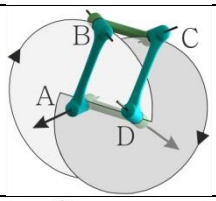
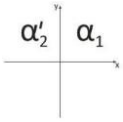
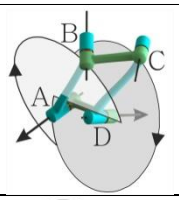
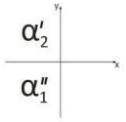
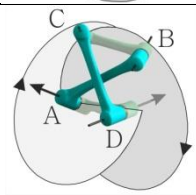
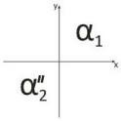
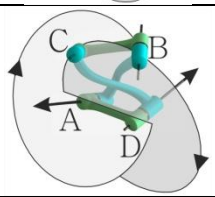
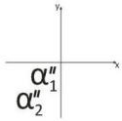
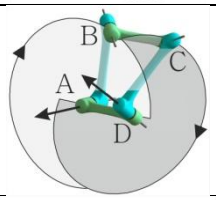
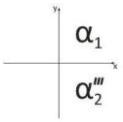
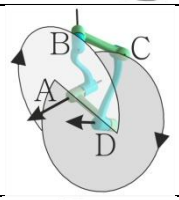
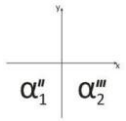
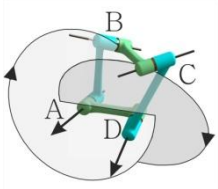
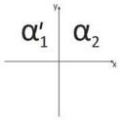
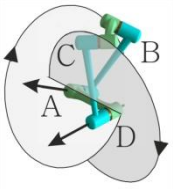
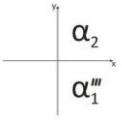
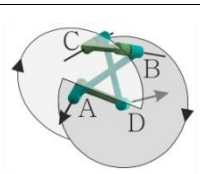
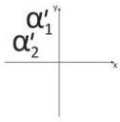
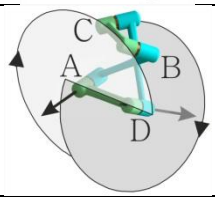
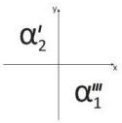
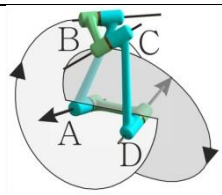
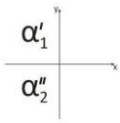
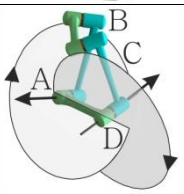
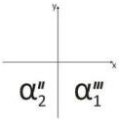
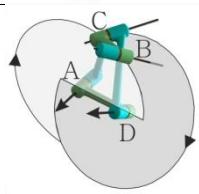
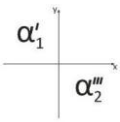
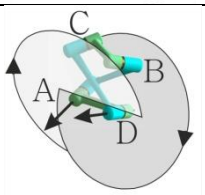
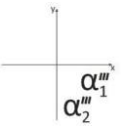
$$K_1 = l_2^2\cdot\cos(\alpha_1)+ l_1^2\cdot\cos(\alpha_2),\qquad(25)$$

$$K_2 = l_1\cdot l_2\cdot(\cos(\alpha_1)+ \cos(\alpha_2)),\qquad(26)$$

$$K_3 = l_2^2 - l_1^2.\qquad(27)$$

Таблица 1

Модификации механизма Беннетта при $l_1(const) > l_2(const)$

№	пара метры	3D модель	Схема	№	пара метры	3D модель	Схема
1	$\alpha_1=60°$ $\alpha_2=30°$			9	$\alpha_1=240°$ $\alpha_2=30°$		
2	$\alpha_1=60°$ $\alpha_2=150°$			10	$\alpha_1=240°$ $\alpha_2=150°$		
3	$\alpha_1=60°$ $\alpha_2=210°$			11	$\alpha_1=240°$ $\alpha_2=210°$		
4	$\alpha_1=60°$ $\alpha_2=330°$			12	$\alpha_1=240°$ $\alpha_2=330°$		
5	$\alpha_1=120°$ $\alpha_2=30°$			13	$\alpha_1=300°$ $\alpha_2=30°$		
6	$\alpha_1=120°$ $\alpha_2=150°$			14	$\alpha_1=300°$ $\alpha_2=150°$		
7	$\alpha_1=120°$ $\alpha_2=210°$			15	$\alpha_1=300°$ $\alpha_2=210°$		
8	$\alpha_1=120°$ $\alpha_2=330°$			16	$\alpha_1=300°$ $\alpha_2=330°$		

В ходе анализа компьютерных моделей модификаций механизма было установлено, что если углы скрещивания осей шарниров лежат в смежных

квадрантах, то по своей структуре такой механизм является параллелограммом Беннетта (рис. 4, а). Если углы скрещивания осей находятся либо в одной, либо в накрест лежащих квадрантах, то такой механизм по своей структуре является антипараллелограммом Беннетта (рис. 4, б).

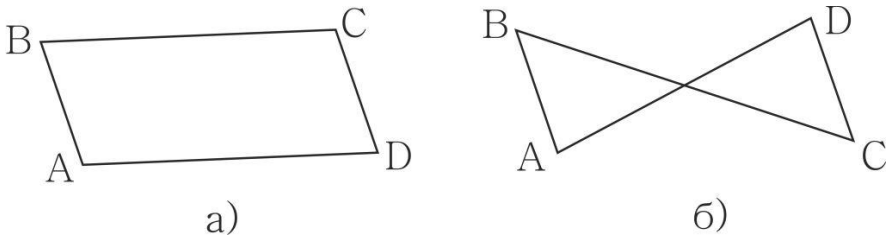


Рис. 4. Структура а - параллелограмм, б – антипараллелограмм

Если угол скрещивания осей α_2 стойки находится на интервале [-90°…90°], то вращение ведомого и ведущего звеньев происходит в одном направлении по отношению к ходу часовой стрелки (рис. 5, а). Если угол скрещивания осей α_2 стойки находится на интервале [90°…270°], то вращение ведомого и ведущего звеньев происходит в разных направлениях по отношению к ходу часовой стрелки (рис. 5, б).

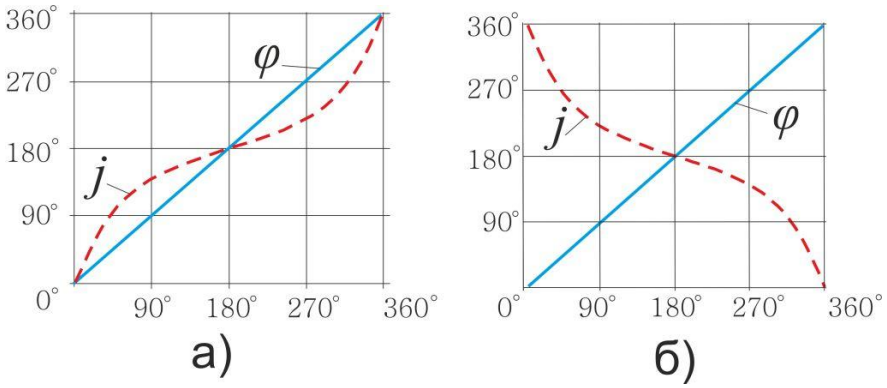


Рис. 5. Вращение ведомого и ведущего звеньев
а – в одном направлении, б – в разных направлениях

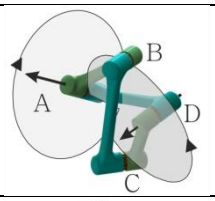
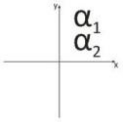
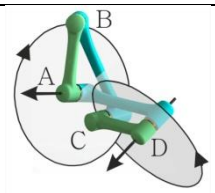
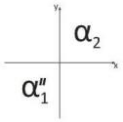
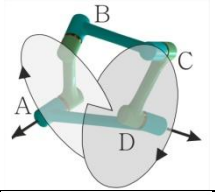
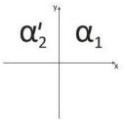
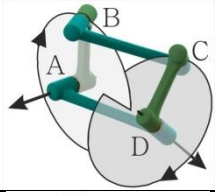
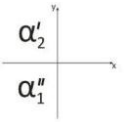
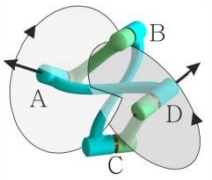
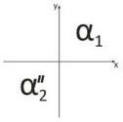
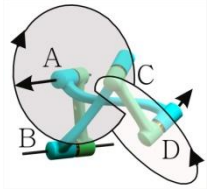
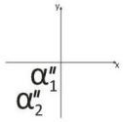
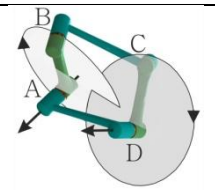
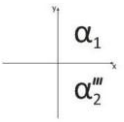
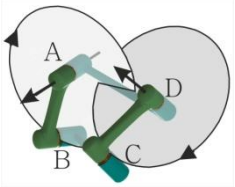
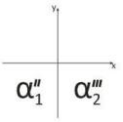
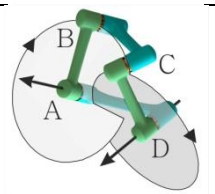
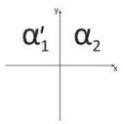
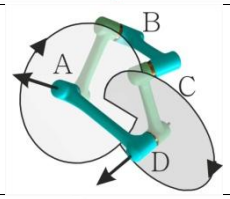
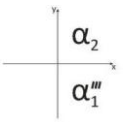
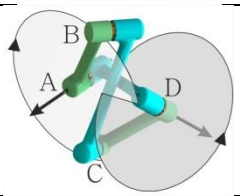
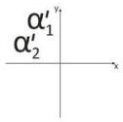
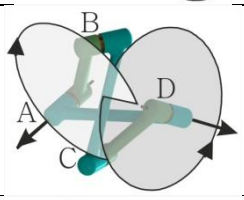
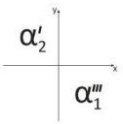
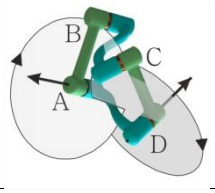
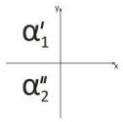
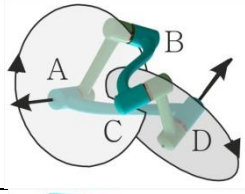
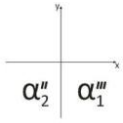
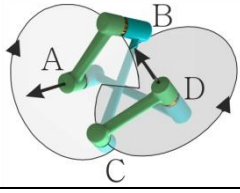
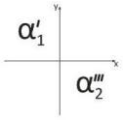
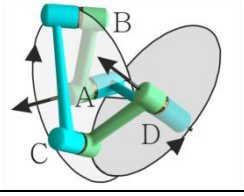
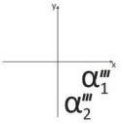
Возьмем пространственный шарнирный четырехзвенный механизм со структурными параметрами l_1, α_1, l_2, α_2, причем $0° < \alpha_1 < 90°$, $0° < \alpha_2 < 90°$, $l_1 < l_2$.Располагая углы скрещивания осей α_1 и α_2 в различных квадрантах, получим еще 16 модификаций пространственного механизма (табл. 2).

Анализируя 16 модификации механизма Беннетта (табл. 2), выявлены следующие закономерности по структуре механизма:

1) если в механизме Беннетта оба угла скрещивания осей шарниров лежат в одной квадранте, то полученный механизм является антипараллелограммом Беннетта;
2) если углы находятся в смежных квадрантах, то полученный механизм является параллелограммом Беннетта;
3) если углы расположены в накрест лежащих квадрантах, то полученный механизм – антипараллелограмм Беннетта.

Таблица 2

Модификации механизма Беннетта при $l_1(const) < l_2(const)$

№	параметры	3D модель	Схема	№	параметры	3D модель	Схема
1	$\alpha_1=30°$ $\alpha_2=60°$			9	$\alpha_1=210°$ $\alpha_2=60°$		
2	$\alpha_1=30°$ $\alpha_2=120°$			10	$\alpha_1=210°$ $\alpha_2=120°$		
3	$\alpha_1=30°$ $\alpha_2=240°$			11	$\alpha_1=210°$ $\alpha_2=240°$		
4	$\alpha_1=30°$ $\alpha_2=300°$			12	$\alpha_1=210°$ $\alpha_2=300°$		
5	$\alpha_1=150°$ $\alpha_2=60°$			13	$\alpha_1=330°$ $\alpha_2=60°$		
6	$\alpha_1=150°$ $\alpha_2=120°$			14	$\alpha_1=330°$ $\alpha_2=120°$		
7	$\alpha_1=150°$ $\alpha_2=240°$			15	$\alpha_1=330°$ $\alpha_2=240°$		
8	$\alpha_1=150°$ $\alpha_2=300°$			16	$\alpha_1=330°$ $\alpha_2=300°$		

Для проверки проворачиваемости звеньев модификаций механизмов

были изготовлены несколько действующих моделей методом 3D печати (рис. 6).

Рис. 6. Действующие модели модификаций 4R механизмов

Общие выводы

1. Если в механизме Беннетта углы скрещивания осей шарниров находятся в смежных квадрантах, то такой механизм по своей структуре будет являться параллелограммом Беннетта вне зависимости от того, какое звено зафиксировано.
2. Если в механизме Беннетта оба угла скрещивания осей шарниров находятся либо в одной квадранте, либо в накрест лежащих квадрантах, то такой механизм будет являться антипараллелограммом Беннетта.
3. Если в механизме Беннетта углы скрещивания осей шарниров находятся в смежных квадрантах, то зависимость вращения ведомого кривошипа относительно стойки при вращении ведущего кривошипа относительно стойки не меняется при фиксации другого звена.

Заключение

В ходе работы выявлены 32 модификации механизма Беннетта в зависимости от ориентации осей шарниров его звеньев в различных квадрантах пространства. Для каждой модификации определен тип механизма (параллелограмм или антипараллелограмм Беннетта), а также зависимость вращения ведомого звена по отношению к ведущему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 100 лет механизму Беннетта. Материалы международной конференции по теории механизмов и машин / Под ред. профессоров А.Г. Мудрова и М.Г. Яруллина. – Казань: РИЦ «Школа», 2004. – 292 с.

2. Дворников Л. Т. Нетрадиционные рассуждения о существовании механизма Беннетта / Теория механизмов и машин. 2009. №1 (13). – С.5-10.
3. Мингазов М. Р., Яруллин М. Г. Анализ исследований пространственных механизмов с вращательными парами// Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Международной Четаевской конференции. Т.1. Секция 1. Аналитическая механика. Казань, 12-16 июня 2012 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – с. 358-366.
4. Мингазов М. Р. Кинематика ведомого кривошипа пространственного четырехзвенного шарнирного механизма особой структуры// XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, 19 – 21 ноября 2013 г.: сборник докладов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. с. 214-218.
5. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 1976. – 264 с.
6. Мудров А. Г. Пространственные механизмы с особой структурой. – Казань: Школа, 2003. – 300 с.
7. Яруллин М. Г., Мингазов М. Р. Краткий анализ модификации механизмов Беннетта// Проблемы механики современных машин. Материалы V международной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. Т. 1. – с. 177-181.
8. Baker J. E. The Bennett linkage and its associated quadric surfaces // Mech. Mach. Theory. – 1988. – vol. 23. – p. 147-156.
9. Bennett G.T. A new mechanism // Engineering. – 1903. – vol. 76. – p.777-778.
10. Bennett G.T. The skew isograms mechanism // Proc. Lond. Math. Soc. 2s. – 1913. – vol. 13. – p. 151-173.

M.G.Yarullin, M.R.Mingazov

STRUCTURAL MODIFICATIONS SYNTHESIS OF BENNETT MECHANISM

Kazan National Research Technical University
named after A.N.Tupolev

Abstract

The article presents 32 models of Bennett mechanism modifications depending on the orientation axes of his links in different quadrants of the space. Two types of mechanism identified – parallelogram and antiparallelogram of Bennett's mechanism. Based on the results of the system analysis research

established that if Bennett mechanism angle crossing axis hinges are in adjacent quadrants, that such a mechanism would be a parallelogram Bennett regardless of which link fixed. If the corners of the crossing axis hinges are in one quadrant or in the criss cross of quadrants, that such a mechanism would be antiparallelogram of Bennett.

Keywords: spatial mechanisms, structure, mobility of mechanism, joint, revolute pair, skew axes, crank, rod.

REFERENCES

[1] 100 let mechanismy Bennetta. Materialy mezhdunarodnoi konferencii po teorii mechanismov i machin / Pod red. Professorov A.G.Mudrova I M.G. Yarullina. – Kazan: RIC “Shcola”, 2004. – 292 c. (rus.)

[2] Dvornikov L. T. Netradicionye rassuzhdeniya o suchestvovanii mechanism Bennetta / Teoriya mechanismov I machin. 2009. № 1 (13). – C.5-10. (rus.)

[3] Mingazov M.R., Yarullin M.G. Analys issledovaniy prostranstvennyh mechanismov s vrachatelnymi parami // Analyticheskaya mechanika, ustoychivost I upravlenye: Trudy X Mezhdunarodnoy Chetaevskoy konferencii. T.1. Sekciya 1. Analyticheskaya mechanika. Kazan: Isd-vo Kazan. Gos. Tech. Un-ta, 2012. – 358-366. (rus.)

[4] Mingazov M.R. Kinematica vedomogo krivoshipa prostranstvennogo chetyrehzvennogo sharnirnogo mechanism osoboy structury // XXI Tupolevskie chteniya (shkola molodyh uchenyh): Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya, 19-21 noyabra 2013 g.: sbornik dokladov. – Kazan: Isd-vo Kazan. gos. Tech. un-ta, 2013. C 214-218. (rus.)

[5] Mudrov P.G. Prostranstvennye mechanism s vrachatelnymi parami. – Kazan: Isd-vo Kazanskogo gos. un-ta., 1976. – 264 c. (rus.)

[6] Mudrov A.G. Prostranstvennye mechanism s osoboi structuroy. – Kazan: Shkola, 2003. – 300 c. (rus.)

[7] Yarullin M.G., Mingazov M.R. Kratkii analys modofokacii mechanismov Bennetta // Problemy mechaniki sovremennyh mashin. Materialy V mezhdunarodnoy konferencii. – Ulan-Ude: Isd-vo VSGUTU, 2012. T. 1. – c. 177-181 (rus.)

[8] Baker J. E. The Bennett linkage and its associated quadric surfaces // Mech. Mach. Theory. – 1988. – vol. 23. – p. 147-156.

[9] Bennett G.T. A new mechanism // Engineering. – 1903. – vol. 76. – p.777-778.

[10] Bennett G.T. The skew isograms mechanism // Proc. Lond. Math. Soc. 2s. – 1913. – vol. 13. – p. 151-173.

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

УДК 62-762.4, 62-762.8, 678

А.А.Ашейчик[1], В. Л. Полонский[1]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ЭЛАСТОМЕРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

[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.

[1]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 определения энергии активации эластомеров, используемых для изготовления резиновых уплотнений в узлах нефтяного оборудования. Показано, что энергия активации может быть определена по результатам экспериментальных испытаний образцов из резин на усталостную выносливость при знакопеременном изгибе с вращением.

Ключевые слова: энергия активации, эластомеры, экспериментальные характеристики, усталостная выносливость, термофлуктуационная теория

Целью работы являлось определение энергии активации резины HNBR марки 1088 фирмы FMC [1,6,8]. Для определения энергии активации эластомеров в данной работе использовались экспериментальные характеристики резины, полученные по ГОСТ 10952-75 «Метод определения характеристик усталостной выносливости при знакопеременном изгибе эластомеров с вращением» [2,9,10]. Для расчета энергии активации данного эластомера использовались основные положения термофлуктуационной теории [7].

В основе термофлуктуационной теории положен экспериментально установленный факт зависимости основной прочностной константы материала - предела его прочности, от времени и температуры испытаний. В качестве основного фактора механического разрушения по этой теории были выделены происходящие во времени тепловые флуктуации

(колебания) положений атомов, находящихся в неравновесном состоянии [1,7]. В этом случае разрушение твёрдых тел под нагрузкой рассматривается не как единовременное критическое событие, а как временной процесс постепенного накопления деструкций материала в виде разрыва структурных связей. Механическая сила, приложенная к телу, не вызывает распада всех межатомных (или межмолекулярных) связей, а лишь деформирует их и приводит к увеличению амплитуды флуктуаций. Поскольку сами флуктуации имеют случайный характер, то случайный (статистический) характер приобретает и сам процесс разрушения. Данные представления, впервые высказанные Журковым С. Н., получили название кинетической концепции прочности, которая нашла применение в описании явления разрушения и его прогнозирования [7].

Энергия активации разрушения в отсутствие напряжения меняется от материала к материалу. Однако для каждого материала она является своего рода физической константой, независящей от состояния материала. Достоинством этой концепции является возможность прогнозирования момента разрушения и неразрушающего контроля прочности.
Для прогнозирования времени до разрушения эластомеров используется уравнение термофлуктуационной теории

$$\tau = C \cdot \sigma^{-b} \cdot \exp \frac{U}{RT}, \qquad (1)$$

где τ – время до разрушения, с; U – энергия активации, кДж/моль; R – постоянная Больцмана; Т – абсолютная температура, ºК; b и С – постоянные, характеризующие процесс разрушения.

Сущность метода определения характеристик усталостной выносливости при знакопеременном изгибе эластомеров с вращением заключается во вращении под определенным углом образца из резины до его разрушения: для метода А - при заданной температуре на поверхности образца; для метода Б - при температуре саморазогрева.

Схема установки для определения характеристик усталостной выносливости эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением представлена на рис.1, внешний вид установки – на рис. 2 [3, 4,5].

На рис.1 образец 1 закреплен в зажимах 5 таким образом, что создается угол изгиба α, имитирующий величину угловой несоосности валов. Один из зажимов установлен на роторе электродвигателя 2, а другой на свободной оси, подшипники которой установлены в стойке 6. Стойка 6 крепится в пазу подвижной платформы 7, закрепленной на вертикальной оси. Стойку 6 можно перемещать по криволинейному пазу для задания произвольных углов α, шкала которых 9 нанесена вдоль паза. Паз представляет собой геометрическое место точек, в которых

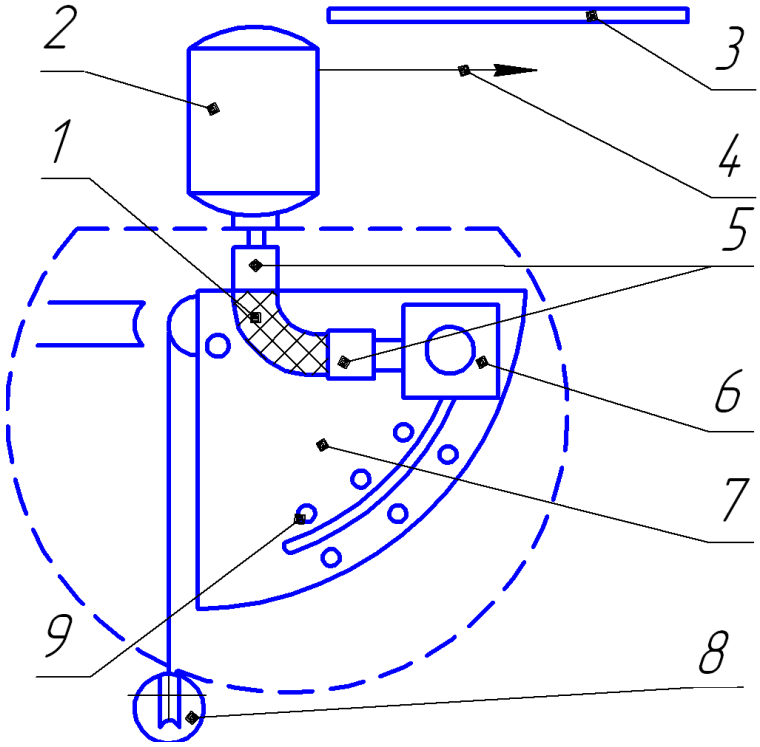


Рис.1. Схема установки для исследования усталости эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением

Рис.2. Внешний вид установки для исследования усталости эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением

требуется удерживать свободный зажим для создания деформаций чистого изгиба образца из эластомера. При такой форме паза перерезывающих сил при изгибе не возникает. Изгибающий момент

определяется по весу грузов 8, уравновешивающих положение платформы 7. Платформа установлена в термокамере, ограничивающей объем, указанный на рис.1 пунктиром. Установка обеспечивает: задание угла α до 90 градусов (деформации до 30%), частоту вращения до 6000 об/мин, температуру в камере до 150°С.

Испытываются стандартные образцы (рис.3) диаметром 8 мм и длиной рабочей части образца 23,5 мм при изгибе с заданной амплитудой деформаций и заданными частотой вращения и температурой окружающей среды.

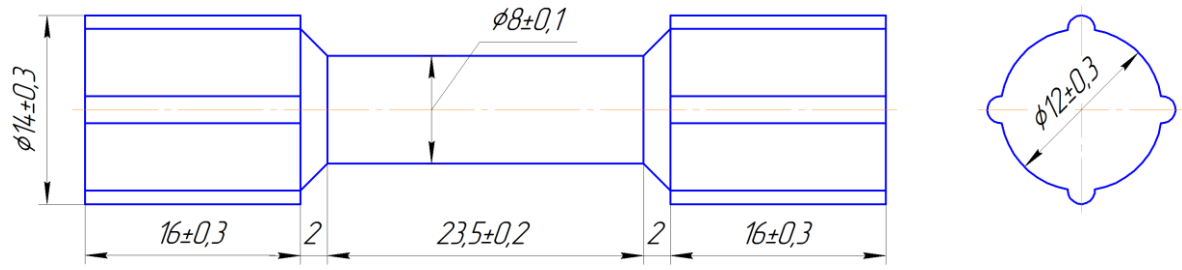


Рис.3. Чертеж образцов для исследования усталости эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением

Образцы испытывают не ранее чем через 16 суток и не позднее чем через 28 суток после вулканизации. Проведение испытаний проводилось в данной работе по ГОСТ 10952-75 по методу Б при частоте вращения образцов из резины 3000 об/мин. Испытания по методу Б проводились в следующей последовательности:

1. Образцы закрепляют в зажимах и устанавливают на заданную относительную деформацию ε_α путем изменения угла изгиба α . Включают прибор и проводят испытание до разрушения образцов. Не допускается выползание образцов из зажимов при испытании. Контроль осуществляется визуально. За разрушение образца принимают разделение его на две части на рабочем участке. Установившуюся температуру на поверхности образца измеряют бесконтактным методом.
2. Если необходимо провести испытания при повышенной температуре окружающей среды, в камере устанавливают заданную температуру. Температуру окружающей среды определяют и зависимости от условий работы резины в изделиях.
3. После разрушения образца записывают показания счетчика и вычисляют число циклов разрушения.
4. Для получения зависимости усталостной выносливости от величины деформации рекомендуют начинать испытания с наибольших деформаций. Деформации подбирают так, чтобы среднее значение усталостной выносливости при максимальной деформации было не менее $1 \cdot 10^3$ циклов, а при минимальной не менее 10^5 циклов.

Для прогнозирования числа циклов до разрушения образца уравнение термофлуктуационной теории (1) может быть представлено в виде

$$N = C \cdot \varepsilon_{\alpha}^{-b} \cdot \exp\left(U \big/ RT\right), \tag{2}$$

Результаты испытаний резины HNBR марки 1088 фирмы FMC, проведенные по вышеприведенной методике приведены в табл.1.

Таблица 1

Экспериментальные характеристики усталостной выносливости резины 1088 фирмы FMC

№ опыта	ε_a	N, циклов	t,°C	T,°K
1	0,100	$3{,}5 \cdot 10^5$	172	445
2	0,125	$6{,}0 \cdot 10^4$	182	455
3	0,150	$1{,}8 \cdot 10^4$	187	460
-	0,200	$3{,}8 \cdot 10^3$	191	464

Уравнение (1), записанное для каждого из трех опытов, результаты которых приведены в табл.1, с использованием номера опыта в качестве индекса экспериментально найденной величины примет вид

$$\lg N_1 = \lg C - b \cdot \lg \varepsilon_{\alpha 1} + \lg e \cdot \left(U \big/ RT_1\right), \tag{3}$$

$$\lg N_2 = \lg C - b \cdot \lg \varepsilon_{\alpha 2} + \lg e \cdot \left(U \big/ RT_2\right), \tag{4}$$

$$\lg N_3 = \lg C - b \cdot \lg \varepsilon_{\alpha 3} + \lg e \cdot \left(U \big/ RT_3\right). \tag{5}$$

Вычтем из (3) выражение (4) и из (4) - (5). Получим систему

$$\begin{cases} \lg \dfrac{N_1}{N_2} = -b \cdot \lg \dfrac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}} + \lg e \cdot \dfrac{U}{R}\left(\dfrac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right); \\ \lg \dfrac{N_2}{N_3} = -b \cdot \lg \dfrac{\varepsilon_{\alpha 2}}{\varepsilon_{\alpha 3}} + \lg e \cdot \dfrac{U}{R}\left(\dfrac{T_3 - T_2}{T_3 T_2}\right). \end{cases} \tag{6}$$

Для удобства перепишем систему (6) в виде

$$\begin{cases} b\left(-\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}}\right)+U\left(\dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_2-T_1}{T_1T_2}\right)\right)=\lg\dfrac{N_1}{N_2}, \\ b\left(-\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 2}}{\varepsilon_{\alpha 3}}\right)+U\left(\dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_3-T_2}{T_3T_2}\right)\right)=\lg\dfrac{N_2}{N_3}. \end{cases} \quad (7)$$

Решим полученную систему (7) относительно U и b, используя исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

$$b=\frac{\begin{vmatrix} \lg\dfrac{N_1}{N_2} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_2-T_1}{T_1T_2}\right) \\ \lg\dfrac{N_2}{N_3} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_3-T_2}{T_3T_2}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_2-T_1}{T_1T_2}\right) \\ -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 2}}{\varepsilon_{\alpha 3}} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_3-T_2}{T_3T_2}\right) \end{vmatrix}}=\frac{\begin{vmatrix} \lg\dfrac{3,5\cdot 10^5}{6\cdot 10^4} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{455-445}{445\cdot 455}\right) \\ \lg\dfrac{6\cdot 10^4}{1,8\cdot 10^4} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{460-455}{460\cdot 455}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{0,1}{0,125} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{455-445}{445\cdot 455}\right) \\ -\lg\dfrac{0,125}{0,150} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{460-455}{460\cdot 455}\right) \end{vmatrix}}=4,50$$

Энергия активации

$$U=\frac{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}} & \lg\dfrac{N_1}{N_2} \\ -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 2}}{\varepsilon_{\alpha 3}} & \lg\dfrac{N_2}{N_3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 1}}{\varepsilon_{\alpha 2}} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_2-T_1}{T_1T_2}\right) \\ -\lg\dfrac{\varepsilon_{\alpha 2}}{\varepsilon_{\alpha 3}} & \dfrac{\lg e}{R}\left(\dfrac{T_3-T_2}{T_3T_2}\right) \end{vmatrix}}=\frac{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{0,1}{0,125} & \lg\dfrac{3,5\cdot 10^5}{6\cdot 10^4} \\ -\lg\dfrac{0,125}{0,150} & \lg\dfrac{6\cdot 10^4}{1,8\cdot 10^4} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\lg\dfrac{0,1}{0,125} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{455-445}{445\cdot 455}\right) \\ -\lg\dfrac{0,125}{0,150} & \dfrac{\lg e}{8,314}\left(\dfrac{460-455}{460\cdot 455}\right) \end{vmatrix}}=$$

$$= 124 \text{ кДж/моль}$$

Определим постоянную C

$$C = \frac{N_1}{\varepsilon_{a1}^{-b} \cdot \exp\left(\frac{U}{RT_1}\right)} = \frac{3{,}5 \cdot 10^5}{0{,}1^{-4{,}5} \cdot \exp\left(\frac{124 \cdot 10^3}{8{,}314 \cdot 445}\right)} = 2{,}864 \cdot 10^{-14} \cdot$$

Таким образом, уравнение термофлуктуационной теории (2) примет вид

$$N = 2{,}864 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon^{-4{,}5} \cdot \exp\left(\frac{124 \cdot 10^3}{8{,}3 \cdot T}\right), \qquad (8)$$

Установлено, что для резины марки 1088 фирмы FMC энергия актививации составляет U = 124 кДж/моль; постоянная C = 2,864· 10^{-14}; постоянная b = 4,50. Результаты усталостных испытаний резины 1088 HNBR фирмы FMC приведены на рис. 4.

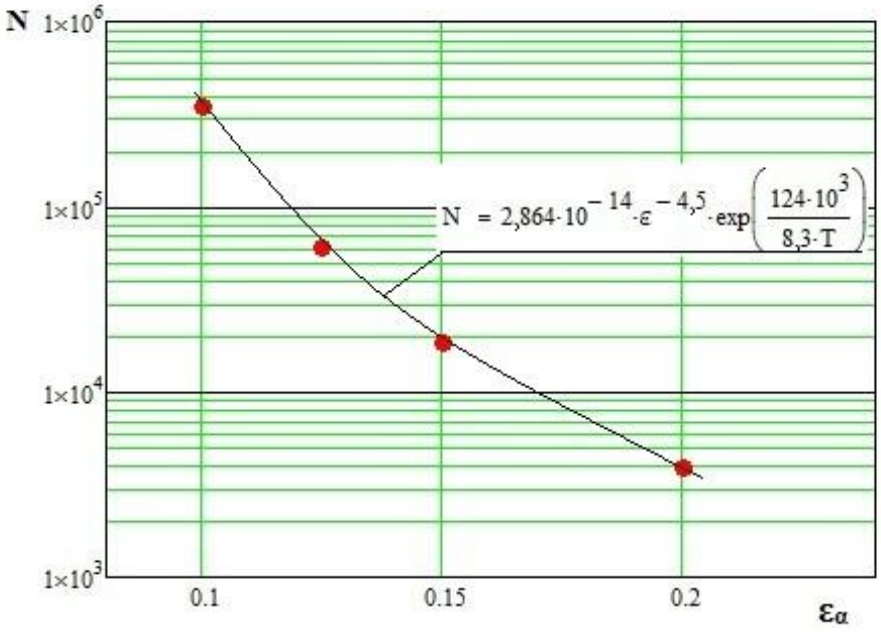


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний резины 1088 фирмы FMC

На рис.4 в виде точек приведены экспериментальные значения числа циклов до разрушения образца N, а в виде сплошной линии приведена зависимость, описывающая этот процесс по уравнению (8) термофлуктуационной теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашейчик А.А., Чулкин С.Г. Экспериментальная механика: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.– 107 с.
2. Ашейчик А.А., Полонский В.Л., Чулкин С.Г. Вычислительная механика. Расчет деталей машин методом конечных элементов: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.– 301 с.

3. Ашейчик А. А. Стенд для исследования динамического модуля и модуля внутреннего трения эластомеров // XIV Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы, Фундаментальные исследования в технических университетах: тезисы докл./ СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010 – С. 140-141.
4. Ашейчик А.А., Ахметшин Т.Д. Испытание эластомеров при знакопеременном изгибе с вращением // XL Неделя науки СПб : тезисы докл./ СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011– С. 156-157.
5. Ашейчик А.А., Чулкин С.Г., Селин С.Н. Применение подшипников из углепластиков в судостроении, турбиностроении, горнодобывающей технике // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы Междунар. научн. – практ. конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 805-816.
6. Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Прогнозирование изменения физико-механических свойств эластомеров при термическом старении // Современное машиностроение. Наука и образование Материалы Междунар. научн. – практ. конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 – С. 265-272.
7. Бартенев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. – М.: Химия, 1979. – 287 с.
8. Лазарев С. О., Полонский В. Л., Ашейчик А. А. Вычислительная механика. Ч 2.: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.– 122 с.
9. Чулкин С.Г., Ашейчик А.А., Селин С.Н. Использование композитных материалов в узлах трения нефтяного оборудования // Вопросы машиностроения. 2012. – № 4. – СПб, Изд-во ЦНИИ «Прометей». – С. 240-244.
10. ГОСТ 10952-75 «Резина. Методы определения усталостной выносливости при знакопеременном изгибе с вращением».

A.A.Asheichik, V.L.Polonsky

DEFINITION OF ENERGY OF ACTIVATION OF ELASTOMERS BY THE EXPERIMENTALLY-THEORETICAL METHOD

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The questions of definition of energy of activation of elastomers, used for manufacturing the rubber seals in knots of the oil equipment are considered in the article. It is shown that energy of activation can be defined by results of experimental tests of samples from rubbers on fatigue endurance at a sign-

variable bend with rotation.

Key words: energy of activation, elastomers, experimental characteristics, fatigue endurance, thermofluctuation theory.

REFERENCES

[1] Ashejchik A.A., CHulkin S.G. JEksperimental'naja mehanika: Ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2008.– 107 p. (rus.)

[2] Ashejchik A.A., Polonskij V.L., CHulkin S.G. Vychislitel'naja mehanika. Raschet detalej mashin metodom konechnyh jelementov: Ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011.– 301 p. (rus.)

[3] Ashejchik A. A. Stend dlja issledovanija dinamicheskogo modulja i modulja vnutrennego trenija jelastomerov // XIV Vserossijskaja konferencija po problemam nauki i vysshej shkoly, Fundamental'nye issledovanija v tehnicheskih universitetah: tezisy dokl./ SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2010 – P. 140-141. (rus.)

[4] Ashejchik A.A., Ahmetshin T.D. Ispytanie jelastomerov pri znakoperemennom izgibe s vrashheniem // XL Nedelja nauki SPb : tezisy dokl./ SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2011– P. 156-157. (rus.)

[5] Ashejchik A.A., CHulkin S.G., Selin S.N. Primenenie podshipnikov iz ugleplastikov v sudostroenii, turbinostroenii, gornodobyvajushhej tehnike // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materialy Mezhdunar. nauchn. – prakt. konferencii. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012 – P. 805-816. (rus.)

[6] Ashejchik A.A., Polonskij V.L. Prognozirovanie izmenenija fiziko-mehanicheskih svojstv jelastomerov pri termicheskom starenii // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie Materialy Mezhdunar. nauchn. – prakt. konferencii. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013 – P. 265-272. (rus.)

[7] Bartenev G.M. Struktura i relaksacionnye svojstva jelastomerov. – M.: Himija, 1979. – 287 p. (rus.)

[8] Lazarev S. O., Polonskij V. L., Ashejchik A. A. Vychislitel'naja mehanika. CH 2.: Ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2007.– 122 p. (rus.)

[9] CHulkin S.G., Ashejchik A.A., Selin S.N. Ispol'zovanie kompozitnyh materialov v uzlah trenija neftjanogo oborudovanija // Voprosy mashinostroenija. 2012. – № 4. – SPb, Izd-vo CNII «Prometej». – P. 240-244. (rus.)

[10] GOST 10952-75 «Rezina. Metody opredelenija ustalostnoj vynoslivosti pri znakoperemennom izgibe s vrashheniem». (rus.)

УДК 7822

M.R.Bahrami

A NOVEL DESIGN OF ELECTRICAL TRANSMISSION LINE INSPECTION MACHINE

Mohammad Reza Bahrami, Ph.D student,
St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
Тел.: +7-968-534-6473, E-mail:mr.bahrami1982@gmail.com.

Abstract

This article is aimed at modeling of transmission line inspection robot in order to improve the mechanical mechanism and achieving dynamical stability to navigate through overhead electrical transmission lines while passing obstacles. A new mechanical mechanism design is developed that allows robot navigate more stable than current commercial inspection systems. The behavior of investigation machine while passing obstacle for four critical modes as follows has been studied: 1) Moving on a cable with maximum slope of 30-degrees 2) Passing over aircraft warning lights 3) Passing over aircraft clamps and dampers 4) Passing from the strain insulators with/without twist in the horizon plane.

Key words: investigation machine, electrical transmission line.

Introduction

Nowadays high-voltage transmission lines play important roles in human life. The electricity power is transmitted from the generators to the cities and industrial centers through transmission lines. Consequently, if any damage and disruption happened to these lines human life and industries could face with problems. In order to prevent from further damages in the mentioned areas, inspection and maintenance of high-voltage transmission lines are necessary and important. On the other hand, inspection of high-voltage transmission lines performed by human forces would be faced with danger, but by improvement of technology, robots have been used as reliable machines instead of human forces in potentially dangerous environments such as hot lines. Considering the fact that repair works are often complex to be accomplished by a robot on the hot lines, power companies have mainly used robots for automating inspection tasks.

Robotic inspection means the usage of autonomous or remotely controlled machines that combine imaging, sensing, and other technologies to diagnose the

condition and situation of transmission line components. The idea is to decrease or eliminate human exposure to potentially dangerous environments while collecting the data required for inspection of transmission lines in order to decrease the cost of repair. Transmission lines are faced with variety of factors, which cause different problems and limit lifetime of the lines, such as corrosion and wind induced vibrations.

In the past two decades, some efforts have been done to make fully autonomous and intelligent robots for inspection electrical transmission lines. The simplest power lines have one conductor per phase hung on insulator strings, which can be either suspension or strain insulators. Besides insulators, there are other obstacles on the conductors, such as dampers, aircraft warning lights, and clamps. These robots are able to pass the line equipment and the tower with obstacle avoidance capability by using necessary sensors for hot line inspection. The other challenge is that in windy climates and even during the navigation sometimes the captured images of the line became blurry, then in most of the proposed designs the image processing which is used for navigation of robot may face with problems.

The robot travels suspended from the conductor and has to cross obstacles along the power line that requires complex robotic mechanisms including conductor grasping systems and robot driving mechanisms. Moreover, an obstacle detection and recognition system, robot control system, communication, inspection platform equipped with necessary sensors and measurement devices, power supply and electromagnetic shielding have to be considered in robot mechanism design and construction. The robot's mechanical mechanism as main part of the robot design may significantly affect other issues in the whole design process such as energy consumption and inspection data quality.

The first prototype of inspection robots was proposed to inspect telephone-lines by Aoshima et al. [1]. As an initial prototype, it suffered several limitations such as complexity of control system and its low speed of movement. Sawada et al. [2] designed a robot in order to inspect the optical fiber lines. The latter robots was capable of moving on the lines with 30-degree slope and pass the mast tips, however, it still lacked the speed of motion and stability. Higichi et al. [3] suggested a more advanced robot for inspection of power lines. They tried to solve the stability problem while passing over the obstacles, although they still had problems when passing over clamps and other complicated hurdles. Tsujimura et al. [4] designed a wired - suspended mobile robot for inspection of telecommunication cables. Their robot was able to pass different kinds of obstacles in a snake like motion on the wires using linkage mechanism. Although their robot was ideal because of its constant speed, it was not able to pass mast tips with changing of line direction. One of the most advanced power transmission line inspection robots was LineScout developed by Montambault and Pouliot in 2007 [5]. This robot was able to pass different kinds of obstacles

on the phase lines with high-speed motion. However, in spite of high performance of the robot in field tests for moving on straight transmission lines, it still required more improvements in order to pass the mast tips with change of line direction. A variety of other electrical line inspection robots with different purposes are introduced and described in [6]-[9] for interested readers [10].

According to the mentioned issues, a novel and simple design for a kind of power line inspection machine is needed. In order to accomplish this in the next sections design of the robot, included environment design assumption has been reviewed.

Description of novel electrical transmission line investigation machine

In order to design mechanical mechanism of inspection robot, firstly it is necessary to have some knowledge about the environment where the robot is desired to work.

The environment design

As one knows power lines are also complicated environment, and navigation for robots are difficult. In the simplest power lines one can see one conductor per phase, which hung on insulator strings, these insulators can be either suspension or strain. Besides insulators, other types of obstacles on the conductors also exist, such as clamps, dampers, aircraft warning lights e.t. (Fig.1).

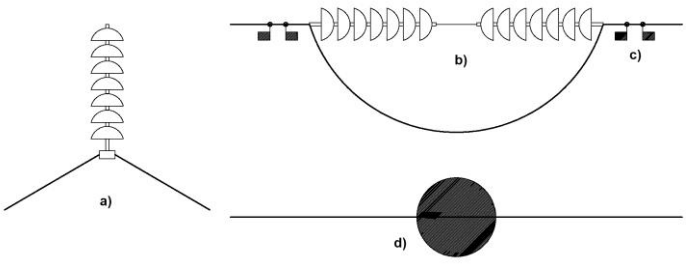


Fig. 1. Different obstacles on electrical line conductors: (a) suspension insulator, (b) strain insulator, (c) damper, (d) aircraft warning sphere.

In this article assumption of environment design parameters are shown in table.

Table. Design parameters

Line components	Value
Conductor diameter	15 – 50 mm
Maximum obstacle length	0.76 m

Number of conductors	1
Maximum slope in span	30°

Basic Mechanical Concepts

The basic mechanical schematic of the robot can be seen in figure 2. Diagnostic Machine has been considered by having around three independent frames (Fig. 2): the wheel frame (blue parts), which includes two couple motorized traction wheels, the arm frame (brown parts), with one arms and one grippers, and the center frame (grey box), which links together the first two frames (called “main body”) and allows them to slide and rotate. In the proposed robot active and passive mechanisms enable it to move over various obstacles on wires, such as dampers, clamps, warning balls e.t.

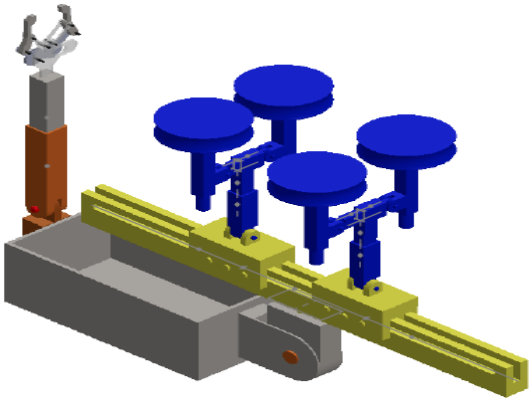


Fig. 2. Robot schematic

The main body has an important role in system of the mobile platform since the movement of the two other frames is generated by sliding them in opposite directions, and also it should be mentioned that about 40% of the platform’s weight is related to this part. Therefore, the main body has to be stiff for expected platform behavior as flexible enough to adapt to particular situations, like when the robot faces with a change in direction of the conductor at a suspension clamp.

The passive mechanisms also include a set of spring dampers installed in each joint of robot arms.

The behavior of robot while passing obstacle for five critical modes as follows has been considered:

1) *Moving on a cable with maximum slope of 30-degrees*

   Fig. 3 shows mounting of the robot on a conductor with the slope. As shown in Fig.3 by rotating wheels and using passive mechanisms, the main body maintains horizontal, which leads to an improved stability and mobility at any cable slope. Also at this situation, in order to prevent from sliding of the robot on the conductor the spring mechanism has been used between couple wheels that can produce enough interaction force.

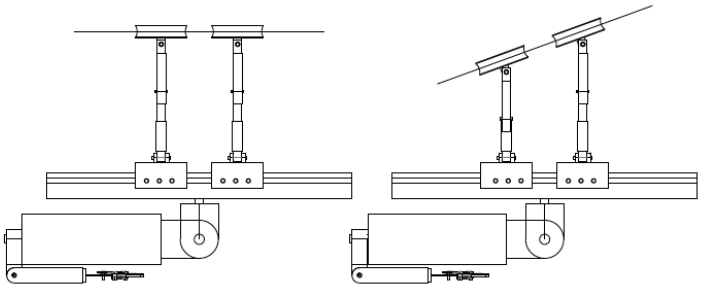


Fig. 3. Moving on a cable with maximum slope of 30-degrees

2) *Passing over aircraft warning lights*
The robot can pass the warning ball in the eight-stage process (Fig.4). As a warning ball is reached, the arm frame is used. In this case the arm and gripper with the help of one of couple wheels can temporarily support the robot while the other wheels are transferring to the other side of the obstacle (Fig.4 1-4). To accomplish this, the wheels themselves are needed to flip down under the obstacle. Then the arm frame is transferring to the other side of the robot, and in last stages with the help of one of couple wheels can temporarily support the robot while the other wheels are transferring to the other side of the obstacle as shown in Fig.4 5-8.

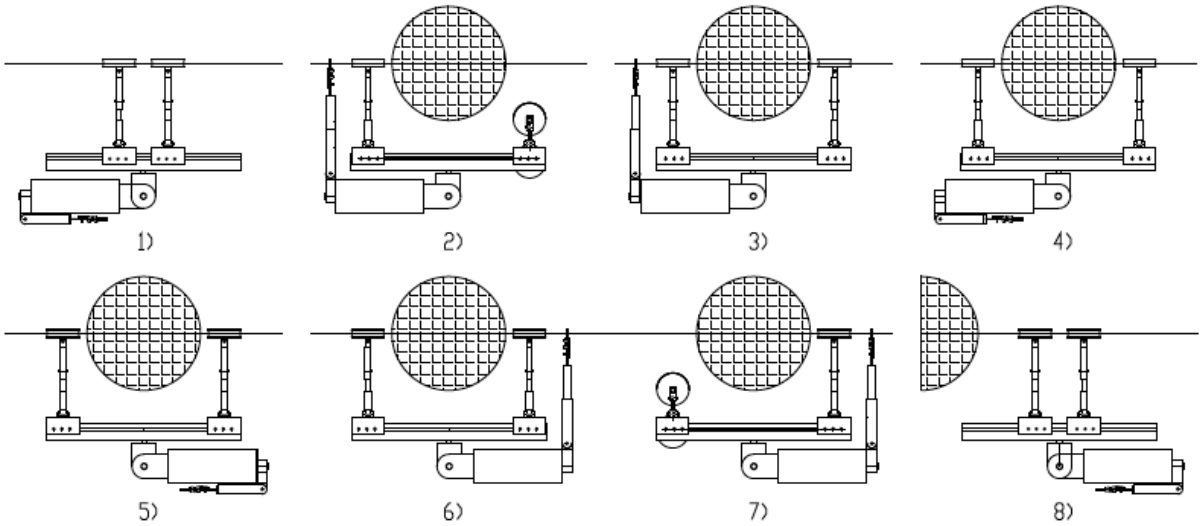


Fig. 4. Passing from aircraft warning balls

3) *Passing over clamps and dampers*
The robot can pass the clamps and dampers by using passive mechanisms. As shown in Fig.5 as one of these kinds of obstacles is reached, wheels are separated from each other meanwhile the interaction force between the wheels and conductor produced by passive systems (spring between wheels links) is enough in order to prevent from disconnecting wheels and conductor.
4) *Passing from the strain insulators with/without twist in the horizon plane*
As a strain insulator is reached, the arm frame is used. In this case the arm

and gripper can temporarily support the robot while the wheels are transferring to the plane vertical to the conductor by the help of rotary joints located on the main body. When the wheels are grabbing the conductor then the arm frame will return to its stationary position to the robot, and the robot will continue the movement as movement on the conductor that has a slope. When the robot comes up form the conductor and reach the other strain insulator, the arm and gripper can temporarily support the robot while the wheels are transferring to the plane vertical to the conductor (Fig.6).

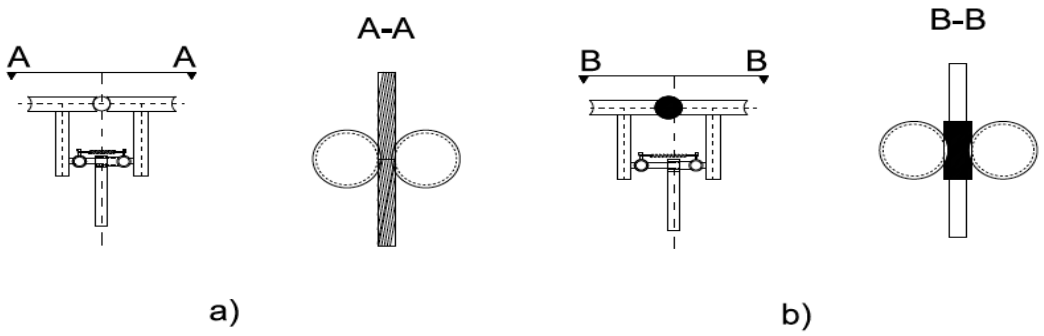


Fig. 5. Passing over clamps and dampers

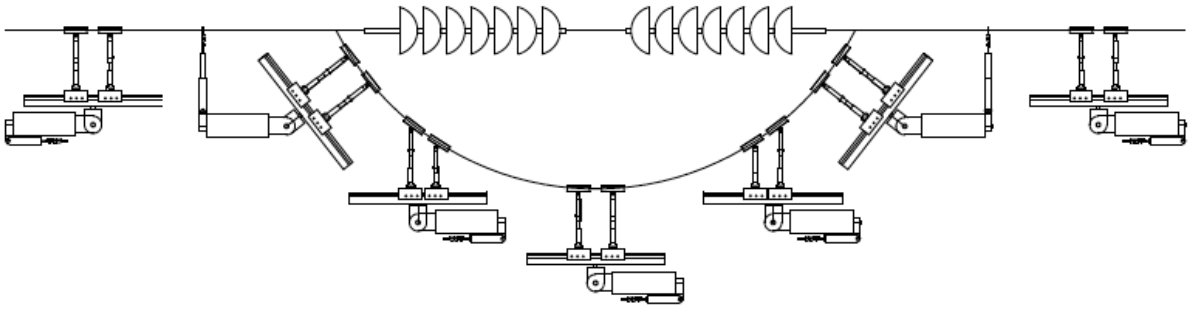


Fig. 6. Passing from the strain insulators twist in the horizon plane

Conclusion

New model of transmission line inspection robot is proposed for improving the mechanical mechanism and achieving dynamical stability to navigate through overhead electrical transmission lines while passing obstacles. A new mechanical mechanism design is developed that allows robot navigate more stable than current commercial inspection systems. In the proposed robot active and passive mechanisms enable it to move over various obstacles on wires, such as dampers, clamps, warning balls e.t. The behavior of investigation machine while passing obstacle for four critical modes as follows has been studied: 1) Moving on a cable with maximum slope of 30-degrees 2) Passing over aircraft warning lights 3) Passing over aircraft clamps and dampers 4) Passing from strain insulators with/without twist in the horizon plane.

Acknowledgment

The author would like to sincerely thank professor V.V.Elisiev who has supported this research.

REFERENCES

[1] Aoshima S. Tsujimura T. and Yabuta T. A Wire Mobile Robot with Multi-unit Structure, Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 414–421, Sep 1989.

[2] Sawada J. Kusumoto K. Munakata T. Maikawa Y. and Ishikawa Y. A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, 6(1), pp. 309–315, May 1991.

[3] Higuchi M. Maeda Y. Tsutani S. and Hagihara S. Development of a Mobile Inspection Robot for Power Transmission Lines, Journal of Robotic Society of Japan, 9(4), pp. 57–63, 1991.

[4] Tsujimura T. and Morimitsu T. Dynamics of Mobile Legs Suspended From Wire, Robotics and Autonomous Systems, 20(1), Apr., pp. 85–98, 1997.

[5] Montambault S. and Pouliot N. Design and Validation of a Mobile Robot for Power Line Inspection and Maintenance, Proceedings of the 6th International Conference on Field and Service Robotics (FSR), Jul, pp. 1–10, July 2007.

[6] Toussaint K. Pouliot N. and Montambault S. Transmission Line Maintenance Robots Capable of Crossing Obstacles: State-of-the-art Review and Challenges Ahead, Journal of Field Robotics, 26(5), pp. 477–499, May 2009.

[7] Pouliot N. and Montambault S. LineScout Technology: Development of an Inspection Robot Capable Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE^{11th} International Conference.

[8] Zhou, Fengyu, Xiao, Hairong and Wu, Aiguo, Control Strategy and Implementation of an Inspection Robot for 110kV Power Transmission Lines. Dalian, China, 2006. 6th World Congress on Intelligent Control.

[9] Debenest P. Guarnieri M. Takita K. Fukushima E. F. Shigeo H. Tamura K. Kimura A. Kubokawa H. Iwama N. Robot for Inspection of Transmission Lines 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena.

[10] Mostashfi A. Fakhari A. and Badri M. A. A Novel Design of Inspection Robot for High- Voltage Power Lines, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol: 76, 2013

УДК 532.783 : 621. 9. 079

Е.В. Березина[1], В.А. Годлевский[2],
А.Г. Железнов[3], Д.С. Фомичев[4]

О РАЗЛИЧИИ МЕХАНИЗМОВ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ТРИБОАКТИЧНЫХ ПРИСАДОК

[1]Елена Владимировна Берёзина, д.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО Ивановский государственный университет
Россия, г. Иваново
E-mail: elena_berezina@mail.ru

[2]Владимир Александрович Годлевский, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России
Россия, г. Иваново
E-mail: godl@yandex.ru

[3]Антон Геннадьевич Железнов,
ФГБОУ ВПО Ивановский государственный университет
Россия, г. Иваново
E-mail: antoniron@smtp.ru

[4]Дмитрий Сергеевич Фомичев, к.т.н.
ФГБОУ ВПО Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России
Россия, г. Иваново
E-mail: dsf81@mail.ru

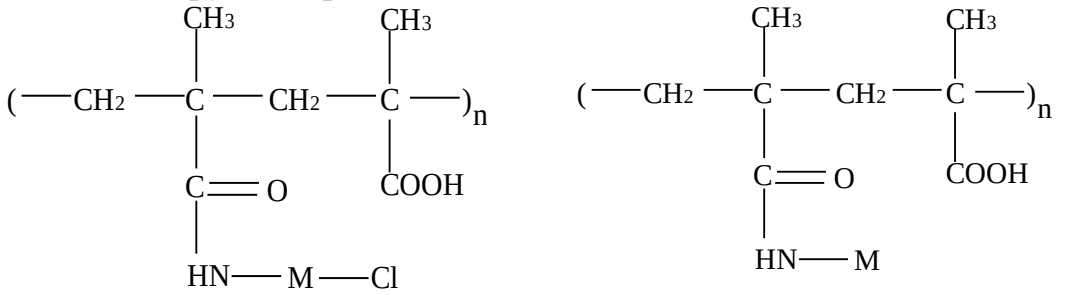
Аннотация

Выполнены трибологические испытания смазочных составов, содержащих присадки производных фталоцианина и металлсодержащих полимеров. Сформулирована гипотеза о принципиальных различиях в механизмах смазочного действия этих двух типов соединений, нашедшая экспериментальное подтверждение.

Ключевые слова: гетероциклические соединения, фталоцианины, металлсодержащие полимеры, смазочное действие.

Одним из основных направлений использования органических амфифильных веществ является применение их свойства влиять на поверхностную активность растворителя. Это свойство широко используется при создании детергентов, смазочно-охлаждающих жидкостей и других технологических средств. Целью данной работы являлось исследование физических и физико-химических свойств систем водорастворимых производных медного комплекса фталоцианина (Фц), трибологические характеристики данных соединений и попытка сравнения их с металлополимерными комплексами. Оба эти типа соединений, будучи органическими веществами, существенно различаются по строению молекулярного каркаса. В силу этого можно предположить у этих веществ разный физико-химический механизм смазочного действия и, следовательно, различные результаты трибологических испытаний.

Гетероциклические соединения характеризуются большой тепловой и химической стойкостью и способностью к образованию пространственного "скелета" в смазочных жидкостях. Нашими исследованиями [1,7] подтверждено, что они способны образовывать на поверхности (а при больших концентрациях — и в объеме) структуры, подобные жидким кристаллам дискотического типа. Эти вещества также содержат ряд типичных функциональных групп, определяющих химическую активность вещества как компонента смазки. Различия в физико-химических и функциональных свойствах гетероциклических соединений обусловлены также количеством и качеством боковых ответвлений у центральной комплексной группы. Образование лиотропных мезофаз также зависит от числа и вида боковых заместителей, от склонности центрального атома к экстракоординации. Анизотропная форма молекулы способствует ее адсорбции, наличие трибоактивных групп — реализации механизма химической смазки [9,10].



а. б.

Рис. 1. Строение металлполимерных цепей метакриламида, где М — Cu, Co, Ni, Fe;
а — сополимер метакриламида-хлор-М ; *б* — полимер метакриламида-М

Металлсодержащие полимеры характерны своеобразной структурой молекулярных цепей и их расположением относительно поверхности

(рис. 1). В частности, наличие ненасыщенных атомных связей, выполняющих роль адсорбционных центров, облегчает образование на поверхности граничных слоев полярных соединений. Атомы металлов, включенные в полярную цепь, способны взаимодействовать с активированной металлической поверхностью при трении и будут адсорбироваться на поверхности металла, подвергаемого обработке, удерживая всю полярную цепочку. (В нашем случае медь, входящая в состав полимерного комплекса, известна своей трибологической активностью как элемент, экранирующий адгезию металлических поверхностей). Физико-химический принцип механизма действия полимерных соединений в качестве присадок заключен, видимо, в ориентации на поверхности металла молекул присадки с высокой адсорбционной активностью и образовании многочисленных адсорбционных связей трибополимеризованных молекул с металлом поверхности трения.. В формировании такого слоя участвуют также ориентированные молекулы базового масла, причем их ориентация в зоне контактного взаимодействия достигается только при ориентации молекул присадки. Информация об использованных в настоящей работе присадках двух типов приведена в таблице.

Таблица

Исследованные вещества

N п/п	Химическая формула	Условное обозначение
1	$(C_{32}H_{16-(m+n)}N_8Cu)(C_8H_9NO_8S_3Na)_m(SO_3Na)_n$	ФЦ1
2	$(C_{32}H_{16-(m+n)}N_8Cu)(C_6H_4N_2O_{10}S_3)_m(SO_3)_n$	ФЦ2
3	$(C_{32}H_{14}N_8Cu)(SO_3Na)_2$	ФЦ3
4	$(C_{32}H_{14}N_8Cu)(SO_3Na)_4$	ФЦ4
5	$(C_8H_{12}Cu)_n$	МАМ(Cu)
6	$(H_2MoO_4)_n$	МАМ (Mo II)
7	$(NH_4MoO_4)_n$	МАМ (Mo I)

В общем случае для данных двух типов присадок можно предположить следующие различия механизма смазочного действия. У гетероциклических присадок определяющим фактором в образовании смазочного слоя должно являться поверхностное структурирование, а у полимеров бо-

лее вероятен смазочный эффект химической природы, связанный с термическим распадом молекулярной цепи на активные фрагменты и образование адсорбционных связей полимеризованных молекул с металлом на поверхности трения [6].

Перед трибологическими испытаниями был проведен цикл экспериментов по исследованию поверхностного натяжения и вязкости для гетероциклических соединений типа фталоцианинов. Представленные вещества полностью совпадают по строению макроцикла и различаются лишь протяженностью и числом боковых заместителей. По данным литературы известно, что дискотические молекулы амфифильной природы могут формировать жидкокристаллические фазы [8]. При этом потенциальной мезогенностью могут обладать как дискогены с протяженными заместителями, так и не обладающие боковыми заместителями. В нашем случае гидрофобным фрагментом является плоская структура макроцикла. Гидрофильная группа представлена латеральным заместителем.

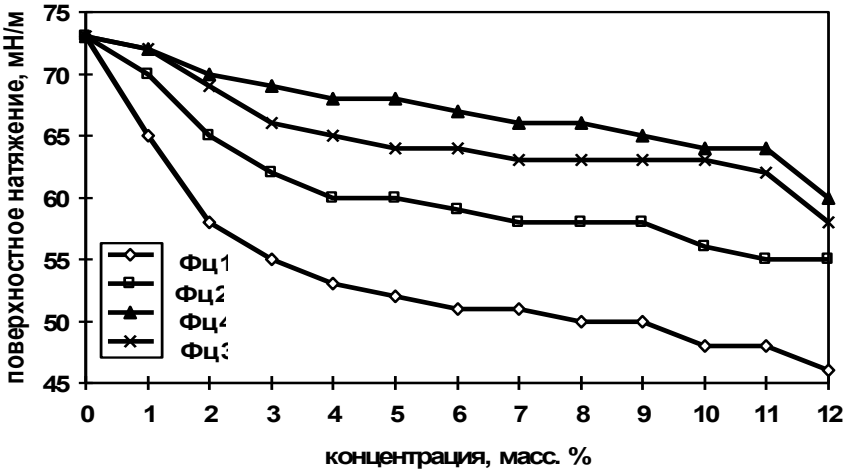


Рис. 2. Концентрационные зависимости поверхностного натяжения гетероциклических соединений

Концентрационные зависимости поверхностного натяжения производных фталоцианина исследовались при постоянной температуре 296 К. Характер бокового заместителя оказывает решающее влияние на поверхностное натяжение во всем диапазоне концентраций. Анализ концентрационных зависимостей поверхностного натяжения в системах водорастворимых производных медного комплекса фталоцианина должен был дать ответ на вопрос о влиянии различных боковых заместителей производных фталоцианина на поверхностное натяжение и влияние температуры на концентрационную зависимость поверхностного натяжения изучаемых веществ. Концентрационные зависимости представлены на рис. 2.

Практически не обладают поверхностной активностью соединения Фц3 и Фц4, имеющие в качестве боковых заместителей только сульфогруппу. Соединения Фц1 и Фц2 оказывают существенное влияние на поверхностное натяжение водной системы. При этом величина эффекта коррелирует с протяженностью боковых заместителей; чем протяженнее боковой заместитель, содержащий сульфогруппу, тем значительнее снижается поверхностное натяжение. С увеличением длины углеводородной цепи увеличивается стремление молекул перейти из объема в поверхностный слой. С повышением температуры поверхностная активность снижается в результате десорбции молекул.

Процесс трения внутри граничного смазочного слоя в значительной мере определяется вязкостью. Течение мезофазы отличается от течения изотропной жидкости вследствие возникновения определенной пространственной ориентации молекул, зависящей от их геометрии, скорости течения, а также от коэффициентов вязкости [3]. Поэтому необходимы были исследования реологических свойств растворов Фц. Из литературы известно, что жидкокристаллические вещества не подчиняются закону Ньютона, так как их коэффициент вязкости зависит от скорости сдвига. В наших экспериментах проверяли, подчиняются ли наши жидкости подобной закономерности. Результаты измерений представлены на рис. 3.

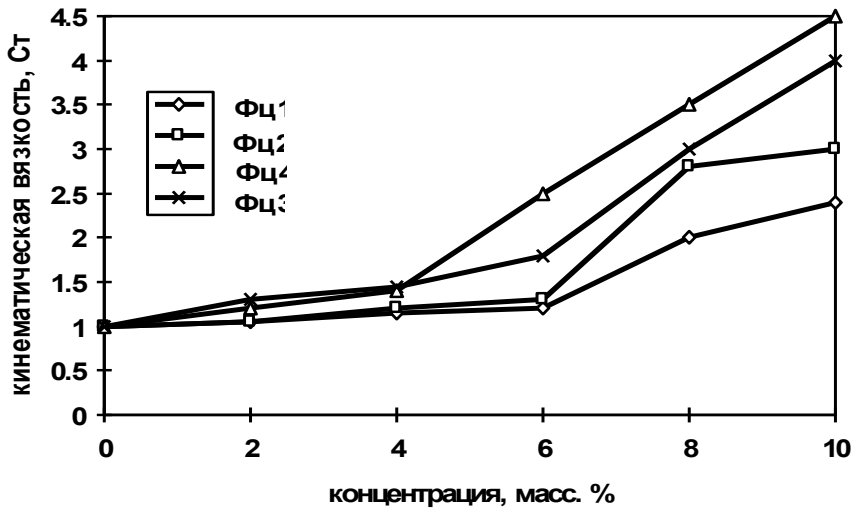


Рис. 3. Зависимость кинематической вязкости раствора от концентрации присадки

Анализируя полученные зависимости, отметим, что все четыре кривые подчиняются следующим закономерностям. Первый (пологий) участок кривой соответствует низким скоростям сдвига, когда разрушенные связи успевают полностью восстановиться. Второй, диапазон, начинающийся с некоторой "критической" концентрации, соответствует пределу сдвиговой

прочности структуры. В этом диапазоне слой, по-видимому, приобретает свойства неньютоновской вязкости, которая определяет соотношение степени разрушения и восстановления структуры. В третьем диапазоне, где вновь отмечается линейное соотношение между вязкостью и концентрацией, фиксируется вязкость полностью разрушенной структуры.

Испытанию на трение подвергались присадки, введенные в состав минерального масла И-40А. Использовалась пара трения “сталь 45 — сталь ШХ15” при контактной схеме “палец — диск” и возвратно-поступательной схемой трения. Материалы пары были закалены, чтобы исключить влияние “пропахивания” дорожки трения в широком диапазоне давлений. При неизменяемой скорости скольжения варьировали нагрузку в контакте, оценивая коэффициент трения. На рис. 4 представлены результаты трибологических испытаний гетероциклических соединений. Меньший коэффициент трения дает вещество с большим числом боковых заместителей [5].

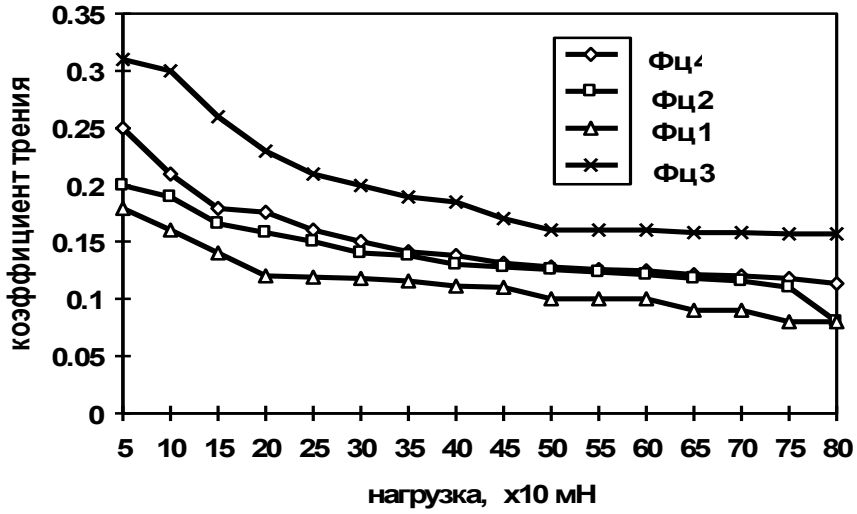


Рис. 4. Изменение коэффициента трения от нагрузки для гетероциклических соединений

При анализе полученных экспериментальных зависимостей были прослежены закономерности, характерные для каждого из типов применяемых присадок. При небольших нагрузках уменьшение коэффициента трения (по сравнению с базовым маслом) демонстрируют гетероциклические соединения (производные фталоцианина) [2,4]. Снижение коэффициента трения объясняется структурообразующей способностью данных органических веществ. Надмолекулярные агрегаты — структурные единицы лиомезофаз — образуются за счет формирования новых водородных связей и взаимодействия электронных облаков π-сопряженных систем. Структурирование проявляется в тех случаях, когда раствор фталоцианина обладает достаточной насыщенностью. С ростом нагрузки смазочная эффективность

этих присадок снижается (механизм трения будет иной природы: он обусловлен объёмными свойствами смазки) [11]. В противоположность этому, присадки-металлополимеры монотонно снижают коэффициент трения при увеличении нагрузки. При этом отмечено влияние на смазочные свойства природы “привитого” на полимер металла. Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

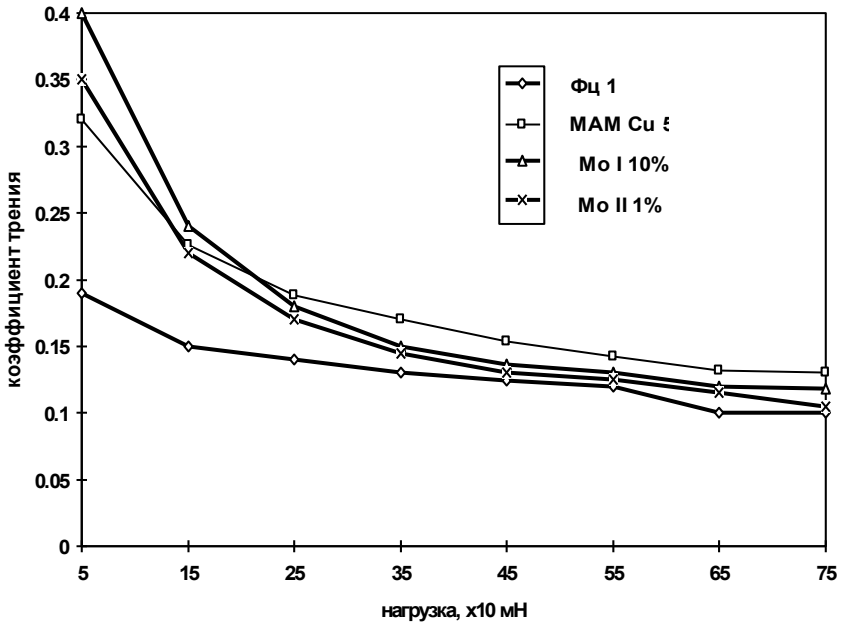


Рис. 5. Изменение коэффициента трения от нагрузки для присадок металлополимеров и гетероциклических соединений

Анализируя полученные закономерности, можно сделать ряд предварительных выводов. Все гетероциклические соединения, представленные в исследовании, снижают поверхностное натяжение во всем диапазоне концентраций, причем характер бокового заместителя оказывает решающее влияние. Практическая значимость данного этапа исследований определяется широким применением ПАВ различной природы в народном хозяйстве как добавки в жидкость, эффективно снижающие ее гидродинамическое сопротивление в качестве, например, смазочно-охлаждающих жидкостей. Трибологические испытания, проведенные в данном цикле исследований, подтвердили тот факт, что системы водорастворимых производных медного комплекса фталоцианина в качестве присадок к традиционным смазочным жидкостям являются эффективными и позволяют в будущем расширить ассортимент композиций, применяемых в традиционных направлениях и создает предпосылки к поиску новых областей практического применения поверхностно-активных веществ.

Характер трибологического "поведения" металлполимерных присадок отличен от такового у гетероциклических соединений, что выражается в

том, что их антифрикционная эффективность проявляется в зоне более интенсивных режимов трения, чем у присадок дискотического типа. Вероятна высокая противоизносная эффективность, связанная с плотностью упаковки этих соединений на трущихся поверхностях. В трибополимерных молекулах образуются адсорбционно-способные сложноэфирные группы. Это обеспечивает лучшую сохраняемость молекул трибополимеров на поверхности с увеличением нагрузки и температуры. В этой связи представляется перспективной идея о совместном использовании двух исследованных нами типов трибоактивных компонентов в единой смазочной композиции, в том случае если будет обнаружен эффект суперпозиции эффектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берёзина Е.В., Годлевский В.А. // Известия АН СССР, серия физическая, 1991. Т. 55. № 9. С. 1757–1759.
2. Берёзина Е. В., Быкова В. В., Жарникова Н. В., Усольцева Н. В., Шигорин С.А. Исследование физико-химических и трибологических особенностей присадок гетероциклических соединений. // Физика химия и механика трибосистем . Межвузовский сборник научных трудов. Иваново, ИвГУ 2002.
3. Березина Е.В., Волков А.В., Годлевский В.А., Фомичев Д.С. К методике исследования оптических свойств мезогенного смазочного слоя // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013.№ 3. С. 273-278.
4. Берёзина Е. В., Годлевский В. А., Усольцева Н. В. О возможности применения в качестве трибоактивных присадок внутрикомплексных дискотических мезогенов. // СОТС при механической обработке заготовок из различных материалов: Тез. докл. междунаучных технических конференций. Ульяновск 1993. С. 25-26.
5. Березина Е.В., Годлевский В.А., Райкова Н.В. Испытание мезогенных присадок на мини-трибометре ТАУ-1 // IV Международная конференция по лиотропным жидким кристаллам. Тезисы докладов. Иван. Гос. Ун-т. Иваново, 2000.
6. Astakhov V.P., Godlevskiy V.A. ,Joksch S., Rave A., Evans R. Metal working fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. pp. 1–75.
7. Godlevski V.A., Latyshev V.N., Usoltseva N.V., Berjozina E.V., Bykova V.V. // Proc. I-st. Balkan Conf. on Tribology BALKANTRIB-93, 1–3 October 1993, Sofia, Bulgaria. V. 1. P. 457–464.
8. Усольцева Н.В., Быкова В.В., Ананьева Г.А. // Республ. конф. по жидким кристаллам и их применению:Тез. докл. Баку, 1988. С. 30.

9. Усольцева Н. В. Лиотропные жидкие кристаллы: химическая и надмолекулярная структура. Иваново: изд. Гос. Ун-т 1994. 220с.
10. Усольцева Н. В., Быкова В. В., Жукова Л. Н., Хомутова Е. В., Берёзина Е. В. Поверхностное натяжение и межмолекулярное взаимодействие в водных системах красителей–производных медного комплекса фталоцианина. 1991. Работа дипонирована в ВИНИТИ.
11. Фройштетер Г. Б., Трилиский К. К., Ищук Ю. Л., Ступак П. Н. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок / под ред. Г. В. Виноградова, М., Издательство «Химия», 1980, 175 с.

E.V. Berezina[1], V.A. Godlevskiy[2],
A.G. Zheleznov[1], D.S. Fomichev[2]

ABOUT DIFFERENCES OF LUBRICATING ACTION MECHANISMS OF METAL-POLYMER COMPLEXES AND HETEROCYCLIC COMPOUNDS USED AS TRIBO-ACTIVE ADDITIVES

[1]Ivanovo State University, Russia
[2]Ivanovo Institute of State Firefighting Service, Russia,

Abstract

The tribological testing of lubricating compounds containing additives of phthalocyanine derivatives and metal-containing polymers was made. The hypothesis of fundamental difference between the mechanisms of lubricating action of these two types of additives, which found the experimental confirmation, was formulated.

Key words: heterocyclic additives, phthalocyanines, metal-containing polymers, lubricating action.

REFERENCES

[1] Berezina E.V., Godlevsky V.A. // Proceedings of the USSR Academy of Sciences, series of physical, 1991. V. 55. № 9. p. 1757-1759. (rus.)
[2] Berezina E.V., Bykova V.V., Zharnikova N.V., Usoltseva N.V., Shigorin S.A. Study of physical-chemical and tribological characteristics of additives of heterocyclic compounds. // Physics, chemistry and mechanics of tribosystems . Interuniversity collection of scientific works. Ivanovo, Ivanovo state University, 2002. (rus.)
[3] Berezina E.V., Volkov A.V., Godlevsky V., Fomichev D.S. To the technique of mesogene lubrication layer's optical properties research

// Modern engineering. Science and education. 2013 No. 3. C. 273-278.
[4] Berezina E.V., Godlevsky V.A., Usoltseva N.V. Potential use as triboactive additives chelate discotic mesogens. // Is studied in the machining of workpieces made of various materials: abstracts. Dokl. Interscience technical conferences. Ulyanovsk 1993. p. 25-26. (rus.)
[5] Berezina E.V., Godlevsky V.A., Raikova N.V. Test mesogenic additives on the mini-tribometer TAU-1 // IV international conference on lyotropic liquid crystals. Theses of the reports. Iv. State University, Ivanovo, 2000. (rus.)
[6] Astakhov V.P., Godlevsky V.A. ,Joksch S., Rave A., Evans R. Metal working fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. pp. 1–75.
[7] Godlevsky V.A., Latyshev V.N., Usoltseva N.V., Berjozina E.V., Bykova V.V. // Proc. I-st. Balkan Conf. on Tribology BALKANTRIB-93, 1–3 October 1993, Sofia, Bulgaria. V. 1. P. 457–464.
[8] Usoltseva N.V., Bykova V.V., Ananjeva G. A. // Republ. Conf. on liquid crystals and their applications. Abstracts. Baku, 1988. p. 30. (rus.)
[9] Usoltseva N.V. Lyotropic liquid crystals: chemical and supramolecular structure. Ivanovo: Ivanovo state University, 1994. 220 p. (rus.)
[10] Usoltseva N.V., Bykova V.V., Zhukova L.N., Khomutova E.V., Berezina E.V. Surface tension and intermolecular interactions in aqueous systems dyes derived copper complex phthalocyanine. 1991. (rus.)
[11] Freisteter G.B., Trilisky K.K., Ischuk U.L., Stupak P.N. Rheological and thermal properties of greases / Under edition of G.V. Vinogradov, M., "Chemistry" Publishing house, 1980, 175 p. (rus.)

УДК 621.891

А. Д. Бреки

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБОБЩЁННОГО ТРЕУГОЛЬНИКА ПАСКАЛЯ, СВЯЗАННЫЕ С ФРИКЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ МАТЕРИАЛОВ

Александр Джалюльевич Бреки, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией по основам трения и смазки кафедры МиОК СПбГПУ, с.н.с. лаборатории «Механика управляемых систем» ИПМаш РАН.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены закономерности обобщённого треугольника Паскаля, связанные с фрикционным взаимодействием материалов. Приведены сведения об обобщённом треугольнике Блеза Паскаля с произвольным числом $V(0,0)=V_0$ и единичными весовыми коэффициентами. Рассмотрены закономерности $n-$строки $V-$треугольника при значении $n=-1$, представлены математические модели трения с учётом данных закономерностей. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие разработанные модели.

Ключевые слова: обобщённый треугольник Паскаля, износ, фрикционное взаимодействие материалов, моделирование процесса трения.

Известно, что обобщённым треугольником Паскаля (V – треугольником) называется треугольная таблица (упорядоченное множество) элементы которой удовлетворяют следующим рекуррентным соотношениям[1, 2]:

$$V(n,k)=\alpha_{n,k-1}\cdot V(n-1,k-1)+\beta_{n,k}\cdot V(n-1,k), \qquad (1)$$

с граничными условиями $V(0,0)=V_0$, $V(n,k)=0$, если $\min(n,k,n-k)<0$.

Все элементы с фиксированным (равным n) первым индексом составляют $n-$строку $V-$треугольника. Число $V(0,0)=V_0$, стоящее в вершине (нулевой строке) обобщённого треугольника Паскаля оговаривается особо; во многих случаях принимают $V(0,0)=V_0=1$. Величины, $\alpha_{n,k}$ и $\beta_{n,k}$, фигурирующие в соотношении (1) называют весовыми коэффициентами.

Все элементы, с фиксированным (равным k) вторым индексом составляют $k-$столбец $V-$треугольника. Многие известные комбинаторные

числа являются частными случаями элементов обобщённого треугольника Паскаля.

Если в соотношении (1) при значении $V(0,0) = V_0 = 1$ положить:

$$\alpha_{n,k} = \beta_{n,k} = 1, n \geq 1, \quad 0 \leq k \leq n,$$

тогда имеем обычный треугольник Паскаля:

$$V(n,k) = \binom{n}{k} = |C(n,k)| = \frac{n!}{k!(n-k)!} = C_n^k . \qquad (2)$$

Поскольку комбинации из n элементов по k элементов отличаются только своим составом, то их называют сочетаниями из n элементов по k элементов [3,4,5].

Если в соотношении (1)

$$\alpha_{n,k} = \beta_{n,k} = 1, n \geq 1, \quad 0 \leq k \leq n,$$

тогда при равенстве $V_0 = G, \quad G \in R,$ имеем треугольник с соотношением:

$$V(n,k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot G = C_n^k \cdot G . \qquad (3)$$

В этом случае имеем треугольник с порождающим элементом G. В случае если все элементы треугольника Паскаля, для которого характерно: $V(0,0) = 1$, $C_n^k = 0,$ если $\min(n,k,n-k) < 0$ просто умножаются на вещественное число G, то мы получаем также треугольник Паскаля, только с дополнительным множителем. Небольшой фрагмент (подмножество) такого упорядоченного множества показан на рисунке 1.

0		0		G		0		0
	0		G		G		0	
		G		$2G$		G		
			$3G$		$3G$			
				$6G$				

Рис. 1. Подмножество обобщённого треугольника Паскаля с порождающим элементом G и единичными весовыми коэффициентами

Если в соотношении (1) положить, что

$$\alpha_{n,k} = \beta_{n,k} = 1, n \geq -1, \quad k \in Z, \quad V_0 = G,$$

то мы получаем (-1) – строку V – треугольника, отличающуюся свойством чередования знаков. Подмножество (фрагмент) такого V – треугольника, записанное с использованием символов, приведено на рисунке 2.

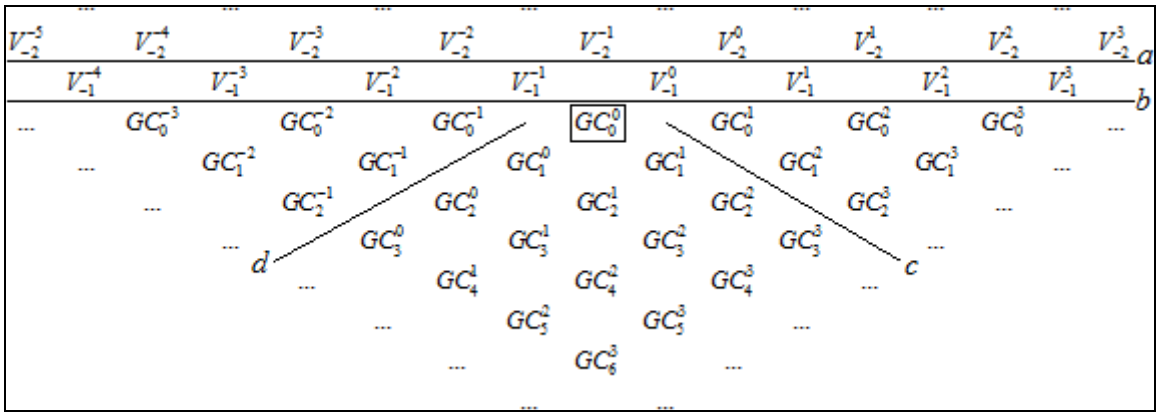


Рис. 2. V – треугольник с порождающим элементом G и (-1) – строкой, записанный в общем виде

Поскольку по определению номер отрицательным быть не может, то (-1) – строка есть не что иное, как строка №1, отсчитываемая вверх от порождающего элемента, а (1) – строка – это строка №1, отсчитываемая вниз от порождающего элемента.

На рисунке 2:

- область между прямыми линиями c и d это обычный треугольник Паскаля, элементы которого умножены на вещественное число G;

- область между прямыми линиями b и d, а также между прямыми b и c содержит элементы, равные нулю;

- между прямыми линиями a и b находится строка №1, отсчитываемая вверх от порождающего элемента G;

- над прямой линией a находятся остальные строки, отсчитываемые вверх от порождающего элемента.

В границах данного изложения рассматривается только строка №1, отсчитываемая вверх от порождающего элемента.

Рассмотрим свойства данной строки:

1) элемент $V_{-1}^{k} = f(x_1, x_2, ...x_n), k \in Z,$ может быть равен любой функции от n – переменных, в частности он может быть равен любому вещественному числу $V_{-1}^{k} = x, \;\; k \in Z, x \in R$;

2) $G \cdot C_0^0 = G$ – порождающий элемент, с которым неразрывно связаны свойства строки;

3) все элементы множества $M = \left\{ V_{-1}^{k} \mid k \in Z \right\}$ изначально неизвестны;

4) если какому-либо фиксированному элементу множества $V_{-1}^{\alpha} \in \left\{ V_{-1}^{k} \mid k \in Z \right\}$, придать некоторое произвольное значение, то все остальные элементы с $k \neq \alpha$ автоматически определятся;

5) все соседние элементы подмножества $\left\{ V_{-1}^{k} \mid -\infty < k \leq -1 \right\} \subset M$ после определения отличаются только своими знаками, но равны по модулю;

6) также все соседние элементы подмножества $\left\{V_{-1}^{k} \mid 0 \le k \le +\infty\right\} \subset M$ после определения отличаются своими знаками, но равны по модулю;

7) для любой пары элементов $\left\{V_{-1}^{-\alpha}; V_{-1}^{\alpha} \mid \alpha > 0\right\}$ множества $\left\{V_{-1}^{k} \mid k \in Z\right\}$ равноотстоящих от элемента V_{-1}^{0} справедливо равенство:

$$\max\left\{V_{-1}^{-\alpha}; V_{-1}^{\alpha} \mid \alpha > 0\right\} - \min\left\{V_{-1}^{-\alpha}; V_{-1}^{\alpha} \mid \alpha > 0\right\} = G.$$

В качестве примера рассмотрим фрагмент треугольника при следующих принятых допущениях:

$$-3 \le k \le 2, \quad n \ge -1, \quad G = g > 0, \quad V_{-1}^{-1} = x = const.$$

В результате таких допущений получаем треугольник на рисунке 3.

$-x$	x	$-x$	$x+g$	$-(x+g)$	$x+g$
	0	0	g	0	0
		0	g	g	0
			g	$2g$	g
				$3g$	$3g$
					$6g$

Рис. 3. Подмножество обобщённого треугольника Паскаля с заданными в общем виде значениями порождающего элемента и элемента первой строки сверху

Если не ограничивать значения k, то общий член рассматриваемой строки может быть записан в следующем виде:

$$V_{-1}^{k} = \begin{cases} (-1)^{|k|} \cdot x, если \quad k < 0, \\ (-1)^{k} \cdot (x+g), если \quad k \ge 0. \end{cases} \qquad (4)$$

Рассматривая рис.3 мы видим чередование знаков элементов как слева, так и справа от порождающего элемента, что можно рассматривать как колебание значений некоторой физической величины в определённых фиксированных границах. Так, можно положить, что имеется функция, зависящая от времени, следующего вида:

$$V(t) = x \cdot \cos(p \cdot t), \qquad (5)$$

принимающая значения из множества $\left\{(-1)^{|k|} \cdot x \mid k < 0\right\}$ в определённые моменты времени. Пара прямых линий $V(t) = x, \; V(t) = -x$ ограничивает область её значений (рис.4).

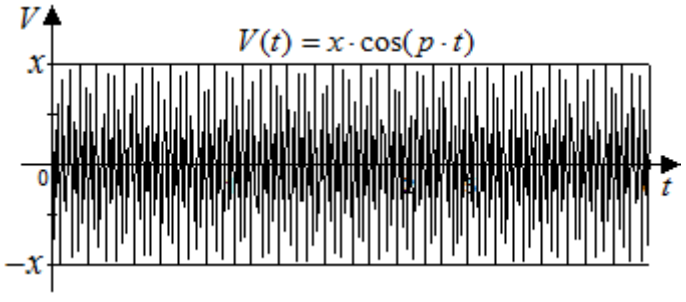


Рис. 4. График функции с областью значений $[-x; \; x]$, которая поочерёдно принимает крайние значения сегмента

Если рассматривать элементы строки как слева, так и справа от порождающего элемента, то можно использовать функцию, зависящую от времени, следующего вида:

$$V(t) = \begin{cases} x \cdot \cos(p \cdot t), \textit{если} \quad t \in [0; t_{пер}], \\ (x+g) \cdot \cos(p \cdot t), \textit{если } t \in (t_{пер}; t_к], \end{cases} \tag{6}$$

где $t_{пер}$ – момент времени, с которого колебания увеличиваются, $t_к$ – момент завершения наблюдения за физической величиной в новом установившемся режиме (рис.5).

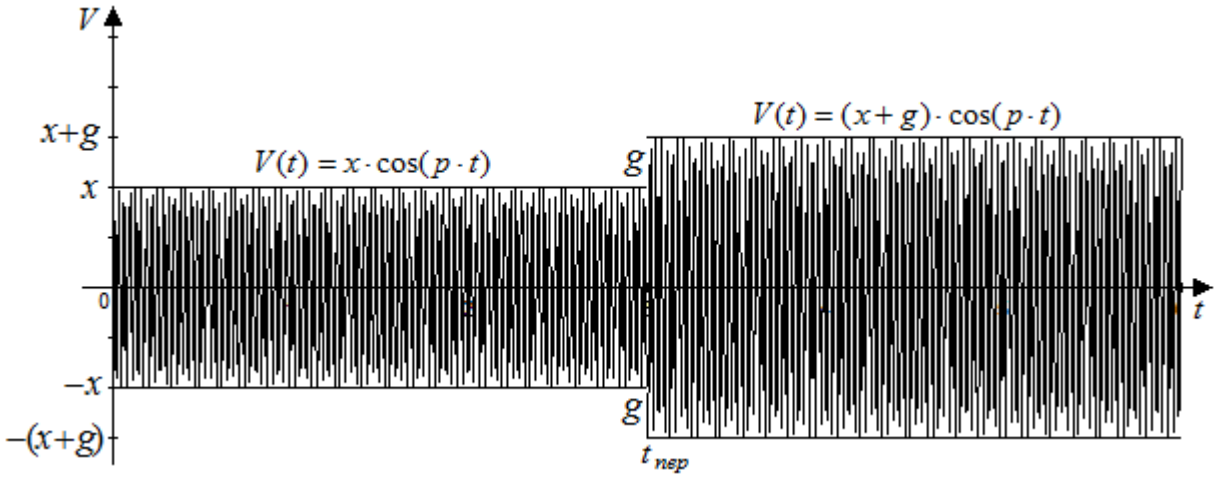


Рис. 5. Графическое изображение функции (6)

Приведённые рассуждения показывают, что обобщённый треугольник Паскаля, включающий очень большое количество закономерностей и связывающий воедино различные разделы математики, при определённых дополнениях описывает также процессы колебаний и явления перехода от одних амплитуд к другим. Такие процессы активно рассматриваются в трибологии.

Известно, что в соответствии с молекулярно-механической теорией в процессе трения реализуется молекулярное и механическое (деформационное) взаимодействие поверхностей трения. В связи с этим, суммарная величина силы трения определяется из соотношения[6]:

$$F_{тр} = F_{мол} + F_{деф}, \tag{7}$$

где $F_{мол}$ – молекулярная (адгезионная) составляющая силы трения, $F_{деф}$ – механическая (деформационная) составляющая силы трения. Из экспериментальных исследований различной направленности известно[9,10,11], что сила трения в установившемся режиме постоянно совершает колебания около некоторого среднего значения. Колебания связаны с большим множеством факторов, которые широко обсуждаются в литературе то трибологии.

Соответственно колебания во времени могут совершать как молекулярная, так и деформационная составляющая силы трения. С учётом сказанного и приведённых выше рассуждений можно записать зависимость силы трения от времени в следующем виде:

$$F_{тр}(t) = \langle F_{тр} \rangle + V(t) = \langle F_{мол} \rangle + \langle F_{деф} \rangle + V(t), \qquad (8)$$

где $\langle F_{тр} \rangle$ – среднее значение силы трения, $\langle F_{мол} \rangle, \langle F_{деф} \rangle$ – средние значения молекулярной и деформационной составляющих, $V(t)$ – функция, воспроизводящая колебания силы трения во времени.

Для установившегося режима (рис.4) с учётом (5) можно записать:

$$F_{тр}(t) = \langle F_{мол} \rangle + \langle F_{деф} \rangle + \Delta F_{тр} \cdot \cos(p(t) \cdot t), \qquad (9)$$

где $\Delta F_{тр}$ – максимальное по модулю отклонение от среднего значения силы трения в установившемся режиме на протяжении рассмотрения фрикционного взаимодействия. В соотношении (9) в отличие от (5) параметр p является функцией времени, поскольку сам может колебаться, порою незначительно под действием ряда факторов. Вообще говоря, $\Delta F_{тр}$ также может изменяться во времени, но в границах данного изложения с учётом проведения параллелей с треугольником Паскаля мы принимаем её постоянной на определённых интервалах.

Соотношение (9) хорошо иллюстрирует рисунок 6.

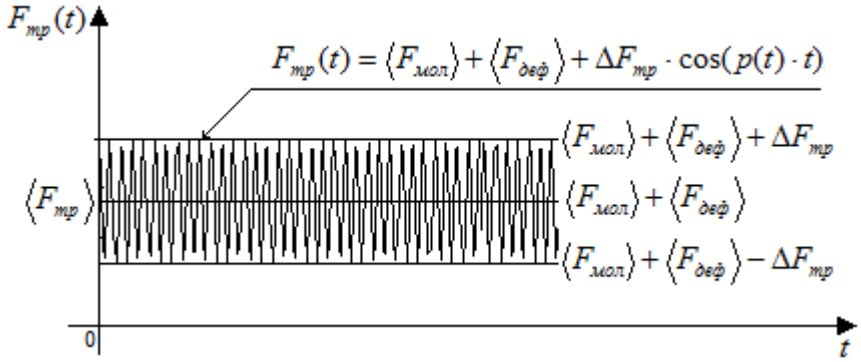


Рис. 6. Изменение силы трения во времени при установившемся режиме

В качестве примера приведём фрагмент осциллограммы потенциалов при сухом трении чугуна по стали, при фиксированной скорости и удельном давлении, полученной А.Д. Дубининым (рис.7)[7].

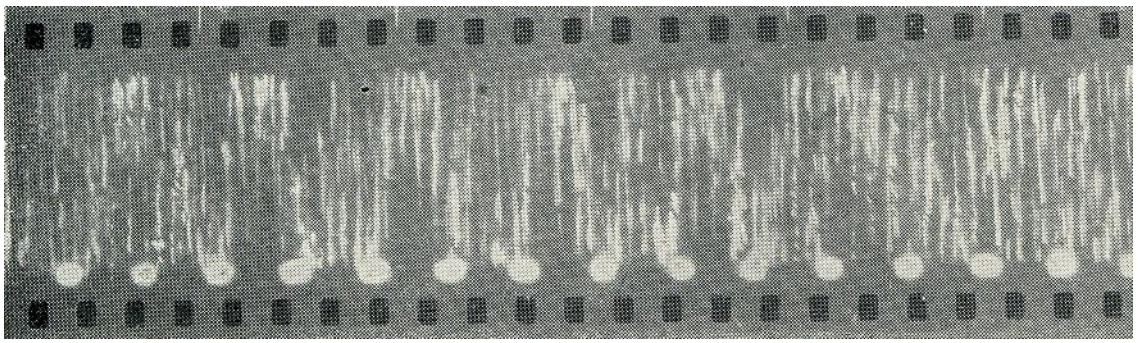


Рис. 7.Осциллограмма потенциалов при сухом трении (чугун по стали) при $v = 3{,}15 м/с$ и $p = 1{,}5 кг/см^2$ [7]

Для процесса, в ходе которого скачкообразно происходит переход от одной амплитуды колебаний к другой (рис.5) с учётом (6) можно записать:

$$F_{тр}(t) = \langle F_{мол} \rangle + \langle F_{деф} \rangle + \begin{cases} \Delta F_{тр} \cdot \cos(p(t) \cdot t), если \quad t \in [0; t_{пер}], \\ (\Delta F_{тр} + \Delta F'_{тр}) \cdot \cos(p(t) \cdot t), если\, t \in (t_{пер}; t_{к}], \end{cases} \qquad (10)$$

где $\Delta F'_{тр}$ – приращение отклонения от среднего значения силы трения в установившемся режиме (порождающий элемент в обобщённом треугольнике Паскаля).

Соотношение (10) хорошо иллюстрирует рисунок 8.

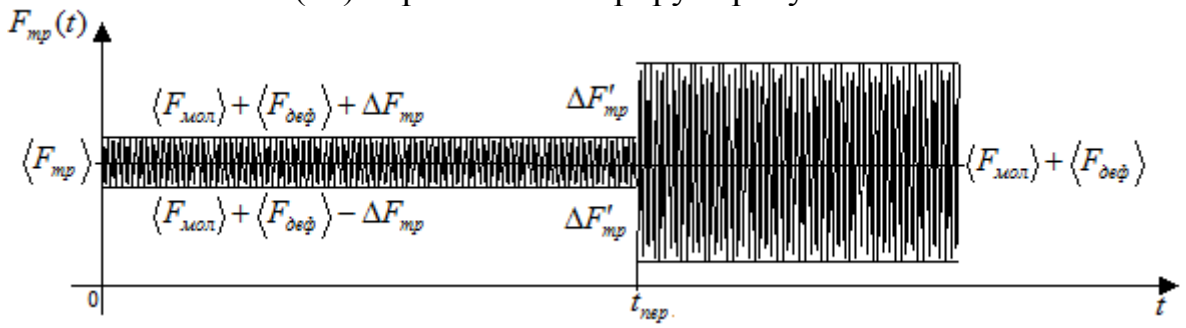


Рис. 8. Изменение силы трения во времени при установившихся режимах с различными флуктуациями при скачкообразном переходе

В качестве примера приведём осциллограмму коэффициента трения для стали-45 и чугуна Сч18-36, записанную на четырёхроликовой машине трения Ю.М. Виноградовым (рис.9)[8].

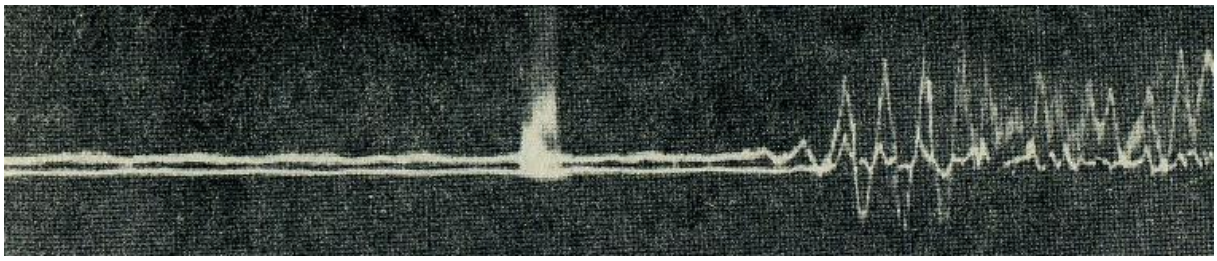


Рис. 9. Осциллограмма коэффициента трения[8]

Для необработанной стали-45 при трении всухую и нагрузке 25кГ (близкой к нагрузке заедания) момент трения сохраняется почти постоянным, коэффициент трения равен 0,23, но при нагрузке 30 кГ, когда появляется задир, на осциллограмме появляются характерные скачки. Соответствующий коэффициент трения доходит до 0,58[8].

Из проведённых теоретических и обзорных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В обобщённом треугольнике Блеза Паскаля, при определённых допущениях, содержатся закономерности, связанные с процессами колебаний и мгновенных переходов при фрикционном взаимодействии.

2. В обобщённом треугольнике Паскаля рассмотрены различные области, в том числе область, состоящая из строк, отсчитываемых вверх от

порождающего элемента и представляющих интерес с точки зрения теории трения и изнашивания материалов.

3. Рассмотрены основные свойства первой строки, отсчитываемой вверх от порождающего элемента.

4. Двучленный закон из молекулярно-механической теории трения записан с учётом флуктуаций, а также скачкообразного изменения силы трения.

5. Если не ограничивать значения k, то, например, общий член рассматриваемой строки может быть записан в следующем виде:

$$V_{-1}^{k} = \begin{cases} (-1)^{|k|} \cdot \Delta F_{mp}, если \quad k < 0, \\ (-1)^{k} \cdot (\Delta F_{mp} + \Delta F'_{mp}), если \quad k \geq 0, \end{cases}$$

в этом случае порождающим элементом будет $\Delta F'_{mp}$.

6. Приведены экспериментальные данные: осциллограмма потенциалов при сухом трении и осциллограмма коэффициента трения, которые могут быть описаны с использованием разработанных моделей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00553.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин О.В. Треугольник и пирамида Паскаля: свойства и обобщения // Соросовский образовательный журнал, том 6, №5. Иркутский государственный университет. 2000. – С.101 – 109.
2. Кузьмин О.В. Обобщённые пирамиды Паскаля и их приложения. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 294с.
3. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 551с.
4. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискретная математика: учебник для студентов втузов. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 447с.
5. Успенский В.А. Треугольник Паскаля. – М.: Наука, 1979. – 48с.
6. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2008. – 206с.
7. Дубинин А.Д. Трение и износ в деталях машин. – М.: МАШГИЗ, 1952. – 136с.
8. Виноградов Ю.М. Трение и износ модифицированных металлов. – М.: Наука, 1972. – 151с.

9. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: диссертация кандидата технических наук 05.02.04. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург. 2011. – 161с.
10. Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS_2 и WSe_2 для железнодорожных втулок / Бреки А.Д. [и др.] // Вопросы материаловедения. СПб. – 2012. – №2(70). – С.109 – 149.
11. Бреки А.Д. Принципы выбора эффективных смазочных масел с дисперсными добавками для подшипниковых узлов управляемых систем // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2013. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 284 – 290.

A.D. Breki

REGULARITIES OF THE GENERALIZED TRIANGLE OF THE PASCAL, CONNECTED WITH FRICTIONAL INTERACTION OF MATERIALS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Abstract

The paper discusses the patterns of generalized Pascal triangle associated with the interaction of friction materials. Provides information about the generalized triangle Blaise Pascal random generating element and unit weights. The characteristics of the particular line of the triangle, the mathematical model of friction based on the data patterns. The experimental evidence developed models.

Key words: generalized Pascal's triangle, wear, frictional interaction of materials, modeling of friction.

REFERENCES

[1] Kuzmin O.V. Pascal triangles and pyramids: the properties and synthesis / / Soros Educational Journal, Volume 6, № 5. Irkutsk State University. 2000. - P.101 - 109.
[2] Kuzmin O.V. Generalized Pascal pyramids and their applications. - Novosibirsk: Nauka. Siberian Academy of Sciences Publishing Company, 2000. – 294p.

[3] Kremer N.S. Probability theory and mathematical statistics: a textbook for students enrolled on economic specialties. - 3rd edition, revised and enlarged. - Moscow: UNITY-DANA, 2007. – 551p.
[4] Gorbatov V.A., Gorbatov A.V., Gorbatova M.V. Discrete mathematics: a textbook for students of technical colleges. - Moscow: AST: Astrel 2006. – 447p.
[5] Uspensky V.A. Pascal's triangle. - Moscow: Nauka, 1979. – 48p.
[6] Penquin N.S., Penquin A.N., Serbin V.M. Fundamentals of tribology and Tribotekhnika: Tutorial. - M.: Mechanical Engineering, 2008. – 206p.
[7] Dubinin A.D. Friction and wear in machine parts. - M.: Mashgiz, 1952. – 136p.
[8] Vinogradov Y.M. Friction and wear of metals modified. - Moscow: Nauka, 1972. – 151p.
[9] Breki A.D. Tribological properties of the modified lubricants: the dissertation of the candidate of technical sciences 05.02.04. St. Petersburg State Polytechnic University. St. Petersburg. 2011. – 161p.
[10] Investigation of the load capacity of lubricant compositions and WS2 nanoparticles WSe2 for rail bushings / Breck AD [etc.] / / Problems of Materials. St. Petersburg. - 2012. - № 2 (70). - P.109 - 149.
[11] Breck A.D. Principles for the selection of effective lubricants dispersed additives for bearing assemblies control systems // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference "Modern engineering. Science and education. "-June 14-15, 2013. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2013.- P. 284 - 290.

This work was supported by RFFI grant № 13-08-00553.

УДК 621.891

А. Д. Breки[1], О.В.Толочко[2], А.Е. Гвоздев[3], Н.Е. Стариков[4]

ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

[1]Александр Джалюльевич Breки, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией по основам трения и смазки кафедры МиОК СПбГПУ, с.н.с. лаборатории «Механика управляемых систем» ИПМаш РАН.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru

[2]Олег Викторович Толочко, д.т.н., профессор, директор научно-технологического комплекса «Материалы и технологии» ОНТИ СПбГПУ.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-89-52, E-mail: plast-ftim@mail.ru

[3]Александр Евгеньевич Гвоздев, д.т.н., профессор кафедры технологии и сервиса Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого.
Россия, Тула, пр. Ленина, 125, 300026.
Тел.: 35-17-22, E-mail: technology@tspu.tula.ru

[4]Николай Евгеньевич Стариков, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой стрелково-пушечного вооружения Тульского государственного университета.
Россия, Тула, пр. Ленина, 95, 300012.
Тел.: 35-54-28, E-mail: starikov_taii@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены общие свойства и особенности взаимодействия различных дисперсных компонентов содержащихся в нефтяных смазочных маслах. Представлена классификация дисперсных компонентов смазочного слоя. Разработана модель взаимодействия дисперсных компонентов смазочного слоя.

Ключевые слова: дисперсный компонент, смазочный слой, нефтяное смазочное масло, трение, износ, смазка.

Дисперсные компоненты в нефтяных смазочных маслах по форме возникновения можно разделить на три основных вида[1, 2]:

1) дисперсные компоненты, генерируемые в процессе трения и окисления масел (частицы износа: металла, окислов; выкристаллизованные при понижении температуры парафины и церезины; частицы нагара, золы, лаков; пузырьки газов, образовавшихся в узле и из компонентов узла (особенно при срабатывании противопенных присадок) и т.д.);

2) дисперсные компоненты, попадающие в узел трения извне естественным образом при обмене веществом и энергией с внешней средой (частицы пыли, песка, резины (при износе уплотнений); частицы воды или другой жидкости, случайно попавшей в систему; пузырьки газов; микроорганизмы);

3) дисперсные компоненты, целенаправленно добавляемые в узел трения, для улучшения триботехнических свойств смазочных материалов (частицы твёрдых смазочных материалов, металлов, сплавов и т.д.).

Схема классификации дисперсных компонентов приведена на рис. 1.

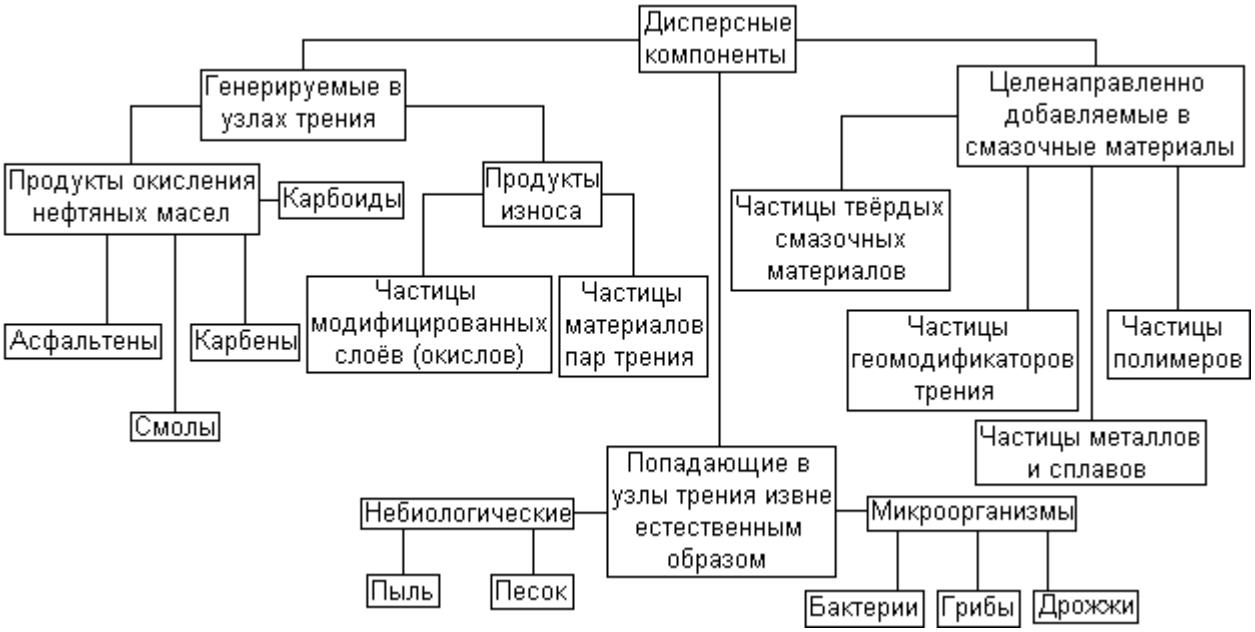


Рис. 1. Классификация дисперсных компонентов в нефтяных маслах

Все представленные в классификации дисперсные компоненты отличаются по химическому составу, структуре, плотности, окислительной стабильности, механическим, триботехническим, биологическим и другим свойствам.

Наряду с отличиями можно выделить целый ряд общих свойств, присущих различным дисперсным компонентам:

1. Все данные компоненты обладают раздробленностью. При этом раздробленность определяется размером тела a по той оси, уменьшением которого она достигнута. Раздробленность часто характеризуют величиной, обратной размеру a, называемой дисперсностью [3]:

$$D = 1/a. \qquad (1)$$

Широко применяется и третья характеристики раздробленности –

удельная поверхность, определяемая отношением площади межфазной поверхности к объёму дисперсной фазы (дисперсного компонента):

$$S_{уд} = \frac{S_{1,2}}{V_{оф}}. \quad (2)$$

В общем случае для систем, содержащих одинаковые частицы произвольной формы [4]:

$$S_{уд} = k_f \cdot a^{-1}, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент, зависящий от формы частиц; a – выбранный линейный размер частиц.

2. Различные дисперсные компоненты в ряде случаев способны адсорбировать поверхностно активные вещества, содержащиеся в маслах. В результате данного процесса часть поверхностно активных компонентов, содержание которых оптимизировано, не идёт на образование полимолекулярных граничных слоёв на поверхностях трения деталей.

3. Крупные частицы дисперсных компонентов, содержащиеся в маслах, при сдавливании дробятся, изменяют свою форму или абразивно воздействуют на поверхности трения.

4. Высокодисперсные компоненты различной природы и формы обладают способностью к шаржированию, заполнению микронеровностей поверхностей трения.

5. Дисперсные компоненты различной дисперсности способны к дискретному экранированию поверхностей трения.

6. Дисперсные компоненты в зависимости от своей природы и условий внешней среды способны коагулировать или флоккулировать с поверхностями трения деталей машин.

7. Дисперсные компоненты, не зависимо от их природы, способны свободно перемещаться в смазочных маслах. Высокодисперсные компоненты совершают броуновское движение, грубодисперсные – процесс седиментации.

8. Способность при определённых условиях внешней среды под действием ряда факторов создавать слои на поверхностях трения:

- слой флоккулировавших между собою и с поверхностью трения абразивных частиц – абразивные дисперсные компоненты;
- слой – лак, нагар на поверхности трения деталей – смолы и асфальтены, карбены и карбоиды[8];
- слой – металлическая композиционная плёнка – реметаллизанты;
- слой с анизотропной слоистой структурой – дисперсные твёрдые смазочные материалы[9];
- слой полимерный – полимеры;
- слой керамический (металлокерамический) – геомодификаторы [10];
- слой слизи из микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности –

бактерии, грибы, дрожжи.

9. Способность дисперсных компонентов любой природы к изменению вязкости смазочного масла.

Все перечисленные общие свойства связаны с взаимодействием частиц со смазочными материалами и с поверхностями трения. Вместе с тем, реализуется взаимодействие дисперсных компонентов между собою. При этом возможно взаимодействие частиц одного дисперсного компонента между собою и взаимодействие между различными дисперсными компонентами.

При взаимодействии дисперсных компонентов возможны следующие варианты относительно роста количества частиц одного из них: подавление; нейтралитет; стимуляция (рис. 2).несколько возможных вариантов взаимодействия двух различных дисперсных компонентов (рис. 3).

Рис. 2. Варианты влияния одного дисперсного компонента на другой

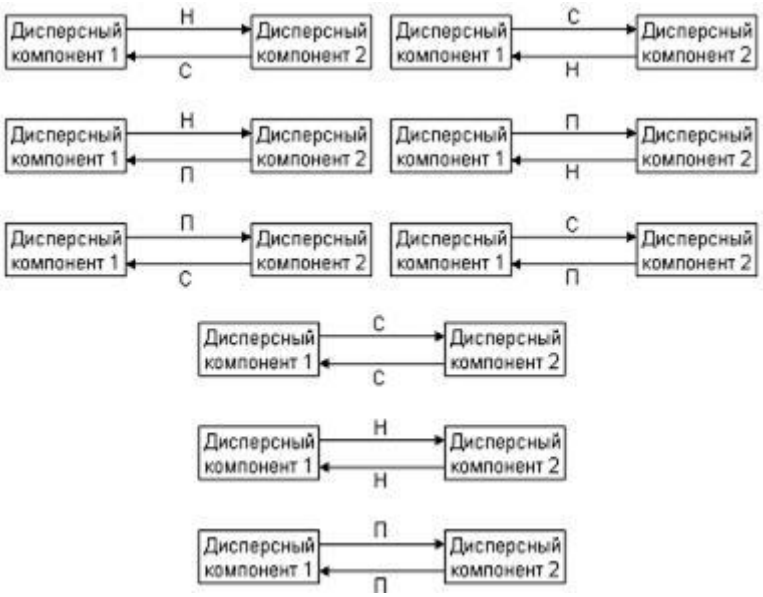


Рис. 3. Варианты взаимодействия двух дисперсных компонентов

Такие взаимодействия возможны и для частиц разных размеров у одного и того же дисперсного компонента.

В случае дисперсного компонента из частиц износа: частицы с размерами до 5мкм [5, 6, 7] подавляют рост числа частиц износа (численности) или находятся в нейтралитете, а частицы с размерами более 5мкм

стимулируют рост численности дисперсного компонента. Аналогичное «внутривидовое противостояние» наблюдается и у пыли относительно роста количества частиц износа.

С увеличением количества дисперсных компонентов в масле число парных взаимодействий и вариантов взаимодействия начинает возрастать. Число парных взаимодействий определяется по формуле:

$$N_{пв}(n) = C_n^2 = \frac{n!}{2!\cdot(n-2)!}. \qquad (4)$$

Число вариантов взаимодействия (рис.3) для нескольких дисперсных компонентов можно определить из соотношения:

$$N_{вв}(n) = C_n^2 \cdot (A_3^2 + 3), \qquad (5)$$

где n – количество дисперсных компонентов в масле, C_n^2 – число сочетаний из n элементов по 2, A_3^2 – число размещений из 3-х элементов по 2. Но $C_n^2 = \frac{n!}{2!\cdot(n-2!)}$ и $A_3^2 = 3\cdot 2 = 6$, таким образом:

$$N_{вв}(n) = \frac{9}{2}\cdot\frac{n!}{(n-2)!}. \qquad (6)$$

При этом можно предположить, что парные взаимодействия могут отличаться при наличии вначале двух, а затем трёх или более дисперсных компонентов в смазочном масле. Из аналитического обзора работы [1] видно, что в маслах может содержаться большое количество различных дисперсных компонентов одновременно. В этом случае имеет место значительное число парных взаимодействий и вариантов взаимодействия. Например, при наличии в масле 20 дисперсных компонентов (что вполне возможно) число парных взаимодействий равно 190, а число вариантов взаимодействия 1710.

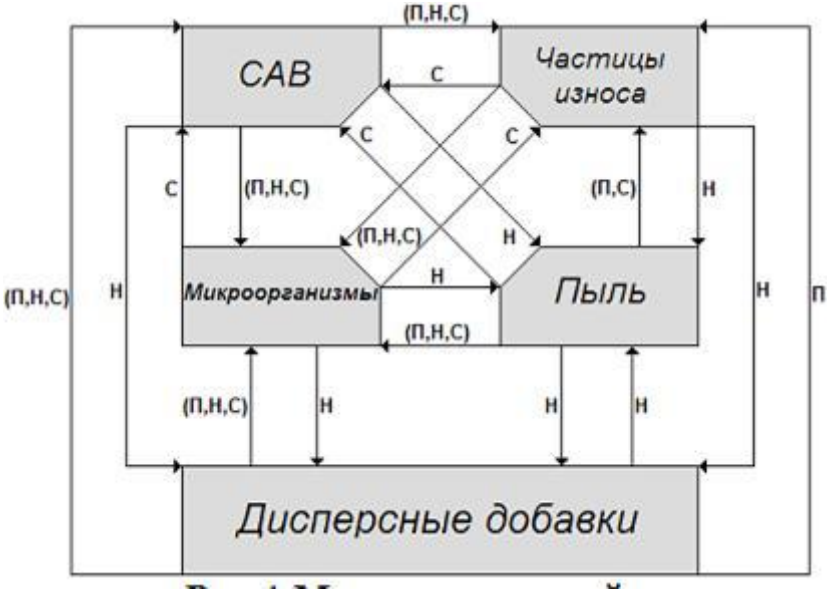


Рис. 4. Модель взаимодействия

Основываясь на приведённой классификации, представленных рассуждениях и выводах, сделанных в разделах работы [1] можно представить модель взаимодействия дисперсных компонентов (рис. 4).

Обозначения на приведённой выше модели: ***САВ*** – смолисто-асфальтеновые вещества; стрелки указывают направленность воздействия; ***П.*** – подавление роста числа частиц одного дисперсного компонента другим дисперсным компонентом; ***Н.*** – нейтральность во взаимодействии дисперсных компонентов; ***С.*** – стимуляция роста числа частиц одного дисперсного компонента другим дисперсным компонентом; ***(П, Н, С)*** – подавление или нейтралитет или стимуляция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: диссертация кандидата технических наук 05.02.04. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург. 2011. – 161с.
2. Бреки А.Д. О процессах образования и взаимодействия дисперсных компонентов смазочного слоя в узлах трения управляемых систем // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2013. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 279 – 283.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
4. Захарченко В.Н. Коллоидная химия: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1989. – 238 с.
5. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей машин – Киев: Машгиз, 1960. – 164 с.
6. Гаркунов Д.Н. Триботехника – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
7. Гаркунов Д.Н. Триботехника – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
8. Бреки А.Д. Оценка состояния нефтяного смазочного масла в подшипниковых узлах по тепловыделению // Материалы международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2011. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 163 – 166.
9. Бреки А.Д. Выбор дисперсности твёрдого наполнителя для жидкого смазочного материала // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2012. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 207 – 211.

10. Бреки А.Д. Принципы выбора эффективных смазочных масел с дисперсными добавками для подшипниковых узлов управляемых систем // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2013. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 284 – 290.

A.D. Breki[1], O.V.Tolochko[1], A.E. Gvozdev[2], N.E. Starikov[3]

GENERAL PROPERTIES AND FEATURES OF INTERACTION DISPERSIVE LUBRICANT COMPONENTS

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Tula State Pedagogical University LN Tolstoy, Russia;
[3]Tula State University, Russia

Abstract

The paper discusses the general properties and interaction between the various components contained in the dispersed oil lubricating oils. The classification of dispersed components of the lubricating layer. A model of the interaction of dispersed components of the lubricating layer.

Key words: particulate component, lubricating layer, oil lubricating oil, friction, wear and lubrication.

REFERENCES

[1] Breki A.D. Tribological properties of the modified lubricating oils: the dissertation of the candidate of technical sciences 05.02.04. St. Petersburg State Polytechnic University. St. Petersburg. 2011. - 161p.
[2] Breki A.D. On the formation and interaction of dispersed components of the lubricating layer in friction control systems // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference "Modern engineering. Science and education. "- June 14 - 15, 2013. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2013. - P. 279 - 283.
[3] Frolov Yu.G. Rates of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems. Textbook for high schools. - 2nd ed., Rev. and add. - Moscow: Khimiya, 1988. – 464p.
[4] Zaharchenko V.N. Colloid chemistry: 2nd ed., Rev. and add. - M.: Higher School, 1989. – 238p.
[5] Garkunov D.N. Increasing wear resistance of machine parts - Kiev: Mashgiz, 1960. – 164p.

[6] Garkunov D.N. Tribotekhnika - M.: Engineering, 1985. – 424p.
[7] Garkunov D.N. Tribotekhnika - Moscow: Publishing House of the ICCA, 2001. – 616p.
[8] Breki A.D. Assessment of petroleum lubricating oil in terms of heat bearing nodes // Materials of the international scientific-practical conference "Modern engineering. Science and education. "- 14 - 15 June 2011. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2011. - P. 163 - 166.
[9] Breki A.D. Selecting solid filler dispersion liquid lubricant // Proceedings of the 2nd International scientific-practical conference "Modern engineering. Science and education. "- 14 - June 15, St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2012. - P. 207 - 211.
[10] Breki A.D. Principles for the selection of effective lubricants dispersed additives for bearing assemblies control systems // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference "Modern engineering. Science and education. "- June 14 - 15, 2013. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2013. - P. 284 - 290.

УДК 621.891

А. Д. Breки[1], О.В.Толочко[2], А.Е. Гвоздев[3], Н.Е. Стариков[4]

ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ОПОРНУЮ ДЛИНУ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

[1]Александр Джалюльевич Breки, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией по основам трения и смазки кафедры МиОК СПбГПУ, с.н.с. лаборатории «Механика управляемых систем» ИПМаш РАН.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-64-29, e-mail: albreki@yandex.ru

[2]Олег Викторович Толочко, д.т.н., профессор, директор научно-технологического комплекса «Материалы и технологии» ОНТИ СПбГПУ.
Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251.
Тел.: 8(812) 552-89-52, E-mail: plast-ftim@mail.ru

[3]Александр Евгеньевич Гвоздев, д.т.н., профессор кафедры технологии и сервиса Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого.
Россия, Тула, пр. Ленина, 125, 300026.
Тел.: 35-17-22, E-mail: technology@tspu.tula.ru

[4]Николай Евгеньевич Стариков, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой стрелково-пушечного вооружения Тульского государственного университета.
Россия, Тула, пр. Ленина, 95, 300012.
Тел.: 35-54-28, E-mail: starikov_taii@mail.ru

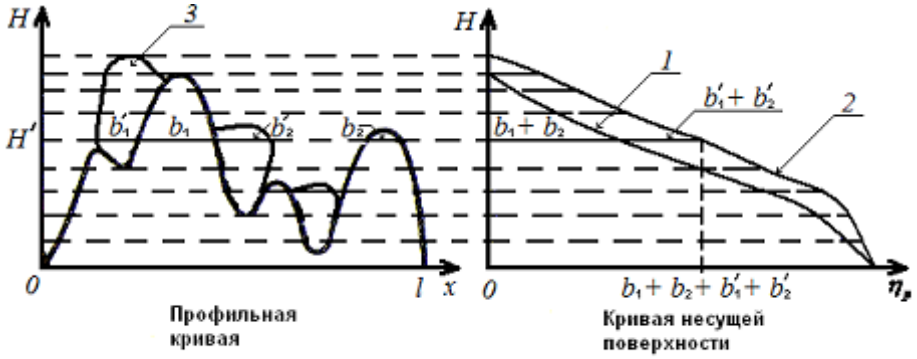
Аннотация

В работе рассмотрено влияние антифрикционных дисперсных материалов на относительную опорную длину поверхностей трения. Представлен графический материал и соотношения, выражающие влияние дисперсной фазы на микрогеометрию. Представлены результаты экспериментального исследования влияния известных антифрикционных дисперсных материалов на микрогеометрию потенциальной поверхности трения.

Ключевые слова: антифрикционный дисперсный материал, поверхность трения, относительная опорная длина, микрогеометрия.

При взаимодействии антифрикционных дисперсных компонентов смазочного слоя с поверхностью трения происходит изменение кривой не-

сущей поверхности и относительной опорной длины профиля. Для характеристики профильной кривой в целом служит кривая несущей поверхности (рис.1). Кривая несущей поверхности отображает в определённой степени увеличение несущей площади детали по мере срабатывания её наружных (внешних) слоёв. В качестве характеристики формы неровностей профиля, дающей представление о распределении высот неровностей по уровням сечения профиля, используют параметр t_p [1,2,3,4,5,6]:



1 – кривая несущей поверхности при отсутствии частиц дисперсной фазы; 2 – при наличии; 3 – частица дисперсной фазы

Рис. 1. Кривые: Профильная и несущей поверхности

$$t_p = \frac{\eta_p}{l} = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{l}, \qquad (1)$$

где t_p – относительная опорная длина профиля; η_p – опорная длина профиля; $\sum_{i=1}^{n} b_i$ – сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины; l – базовая длина.

В случае коагуляции частиц с поверхностью, их прочного внедрения в поверхность или их крепкого заклинивания между микронеровностями происходит генезис нового неустойчивого рельефа. Опорная длина профиля при шаржировании поверхности дисперсными компонентами получит приращение:

$$\eta_{pш} = \eta_p + \Delta\eta_p = \eta_p + \eta'_p = \sum_{i=1}^{n} b_i + \sum_{i=1}^{m} b'_i, \qquad (2)$$

где $\eta_{pш}$ – приращённая опорная длина профиля; $\Delta\eta_p, \eta'_p$ – приращение опорной длины профиля после шаржирования; $\sum_{i=1}^{m} b'_i$ – сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале частиц дисперсной фазы линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины (рис.1).

Относительная опорная длина профиля также получит приращение:

$$t_{рш} = \frac{\eta_{рш}}{l} = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i + \sum_{i=1}^{m} b_i'}{l}, \qquad (3)$$

где $t_{рш}$ – приращённая относительная опорная длина профиля.

Разделив (3) на (1) получим коэффициент, показывающий, во сколько раз увеличилась относительная опорная длина профиля на заданном уровне после процесса заполнения микронеровностей:

$$k_ш = \frac{t_{рш}}{t_p} = \frac{\eta_{рш}}{\eta_p} = 1 + \sum_{i=1}^{m} b_i' / \left(\sum_{i=1}^{n} b_i \right). \qquad (4)$$

При этом для функций $\eta_{рш} = \eta_{рш}(H)$ и $\eta_p = \eta_p(H)$ на отрезке $H \in [0; H_p]$ (H_p – верхняя граница области определения второй функции) выполняется следующее неравенство (рис.1):

$$\eta_p(H) \le \eta_{рш}(H). \qquad (5)$$

Заполнение приводит к увеличению площади фактического контакта поверхностей трения. При сближении шероховатых поверхностей в случае наличия частиц дисперсной фазы в контакт могут входить всё более малые частицы, давая дополнительное приращение фактической площади контакта. В связи с этим происходит уменьшение фактического давления при взаимодействии поверхностей и, при определённых условиях (особенно речь идёт именно об антифрикционных дисперсных материалах), реализуется уменьшение износа.

С другой стороны при нанесении антифрикционного дисперсного материала на поверхность трения не исключается вариант копирования профиля данной поверхности, когда частиц много и они взаимодействуют между собой. В связи с этим было произведено исследование влияния некоторых известных антифрикционных дисперсных добавок на относительную опорную длину профиля t_p поверхностей трения. Для исследования использовали профилометр TR200 фирмы TIME GROUP (рис. 2) [7].

Рис. 2. Схема прибора TR200

Портативный измеритель TR200 позволяет определить шесть основных параметров, характеризующих шероховатость поверхности, предусмотренных ГОСТ 2789 – 73[5]: R_a, R_z, $R_{\max}$, S, S_m, t_p.

Для определения указанных параметров, на поверхности детали (образца) располагается датчик, который приводится в движение с постоянной скоростью $v_д = const$. Датчик воспринимает неровности поверхности острым пером. Неровности поверхности вызывают смещение в датчике, в

результате чего изменяется индуктивность катушки, которая генерирует аналоговый сигнал, пропорциональный размерам неровностей. Сигнал поступает на выпрямитель. После усиления и преобразования уровня этот сигнал поступает в систему сбора данных. Собранные данные подвергаются цифровой фильтрации, и микросхема цифровой обработки сигналов производит расчёт параметров. Результаты произведённых измерений выводятся на жидкокристаллический дисплей TR200.

Для исследования использовали плоский образец из материала сталь 45. На данном образце с помощью резца обозначили точки начала и конца перемещения пера датчика, очертили контур области, на которую наносили антифрикционные дисперсные компоненты. В качестве дисперсных компонентов использовали высокодисперсные порошки, целенаправленно вводимые в смазочные материалы, графита 100-200нм, серпентинита 100-200нм[8,9,10], дисульфида вольфрама 40нм и диселенида вольфрама 60х5нм. Поверхность образца предварительно обезжиривалась с помощью бензина, после чего на ограниченную область поверхности помещался высокодисперсный компонент и основательно втирался в неё.

Базовую длину в настройках профилометра выбрали $l = 0{,}8мм$, стандарт – ISO, фильтр RC. Далее располагали датчик прибора TR200 на поверхности образца таким образом, чтобы его «проекция» проходила через точки начала и конца перемещения пера, обозначенные резцом. После этого датчик приводился в движение. Полученные после измерения результаты систематизировались и обрабатывались на персональном компьютере.

Вначале произвели определение параметров шероховатости у чистого образца без дисперсного компонента на поверхности (рис. 3).

Опорная кривая строилась в относительных величинах: по оси абсцисс откладывалась относительная опорная длина профиля $t_p(\%)$, а по оси ординат откладывалось относительное сближение:

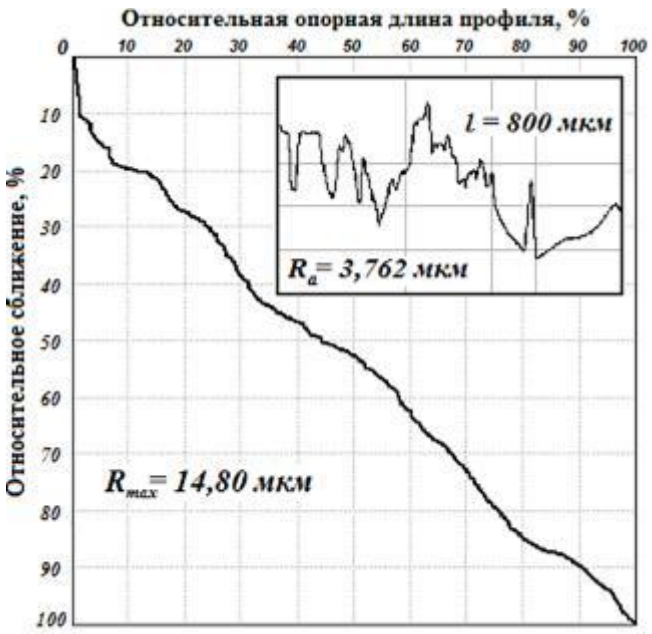


Рис. 3. Параметры шероховатости поверхности образца

$$\varepsilon = \frac{a}{R_{\max}} \cdot 100\%, \qquad (6)$$

где a – сближение; $R_{\max}$ – наибольшая высота неровностей профиля, то есть расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Далее определили опорную кривую и параметры шероховатости участка поверхности образца, при коагуляции с данной поверхностью высокодисперсных частиц графита (рис. 4, *а*). При коагуляции частиц графита с поверхностью образца произошло уменьшение наибольшей высоты неровностей профиля на величину $\Delta R_{\max гр} = \left|R_{\max} - R_{\max гр}\right| = 10{,}121 мкм$, а среднего арифметического отклонения профиля на величину $\Delta R_{а.гр} = \left|R_а - R_{а.гр}\right| = 2{,}976 мкм$.

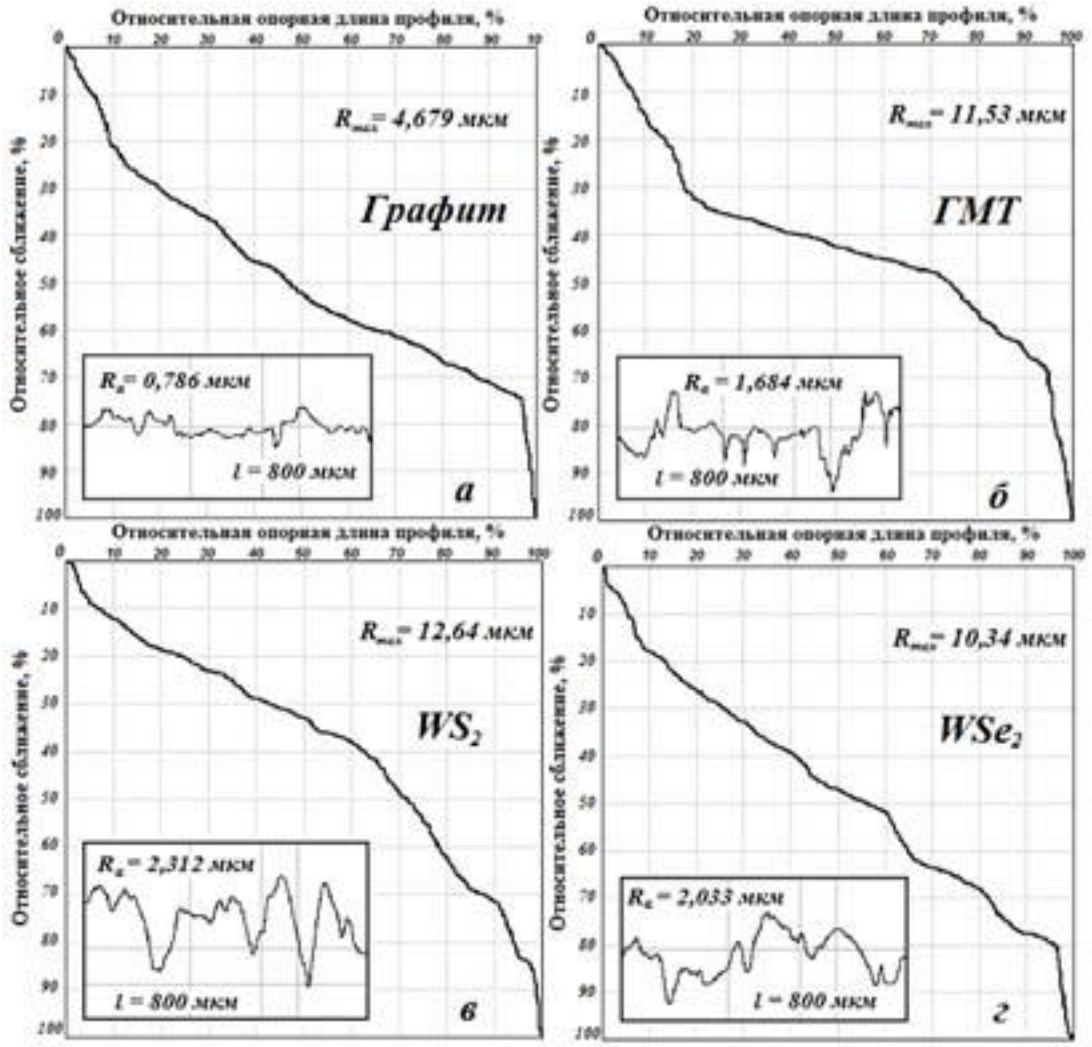


Рис. 4. Параметры шероховатости образца с покрытием

В связи с увеличением t_p на разных уровнях опорная кривая сместилась вправо, что наблюдалось и при использовании дисперсного серпентинита, дисульфида и диселенида вольфрама (рис. 4, *б*, *в*, *г*).

В случае с ГМТ произошло уменьшение параметров шероховатости на следующие величины $\Delta R_{\max c} = 3{,}27 мкм$, $\Delta R_{a.c} = 2{,}078 мкм$. При использовании дисульфида вольфрама WS_2 параметры шероховатости уменьшились на величины $\Delta R_{\max WS_2} = 2{,}16 мкм$, $\Delta R_{a.WS_2} = 1{,}45 мкм$. При закреплении частиц диселенида вольфрама WSe_2 между микронеровностями поверхности образца параметры шероховатости уменьшились на величины $\Delta R_{\max WSe_2} = 4{,}46 мкм$, $\Delta R_{a.WSe_2} = 1{,}729 мкм$.

Перед проведением каждого испытания ограниченный исследуемый участок поверхности образца тщательно очищался с помощью мягкой ткани и лабораторного (светлого) бензина. При очистке исследуемой области поверхности было установлено:

- дисперсный графит хорошо коагулирует с поверхностью и легко удаляется с неё с помощью бензина;
- дисперсный серпентинит коагулирует с поверхностью хуже, чем графит, и ещё легче удаляется с неё;
- дисперсный диселенид вольфрама слабо коагулирует с поверхностью (хуже, чем серпентинит) и легко удаляется с поверхности;
- дисперсный дисульфид вольфрама прочно коагулирует с поверхностью и очень тяжело удаляется с неё.

На основании результатов проведённого исследования можно сделать следующие основные выводы:

- при коагуляции частиц различных дисперсных компонентов с шероховатой поверхностью происходит увеличение относительной опорной длины профиля на разных уровнях. В связи с увеличением параметра t_p происходит увеличение площади фактического контакта A_r ($A_r \sim t_p$), способствующее уменьшению давления при фрикционном взаимодействии. Таким образом, полученные результаты подтверждают теоретические выводы, сделанные в выше данной работе;
- при коагуляции частиц дисперсных компонентов различных видов с поверхностями, параметры $R_{\max}$ и R_a получают отрицательные приращения. При этом совокупное изменение параметров $R_{\max}$, R_a и t_p взаимосвязано;
- дисперсные компоненты в зависимости от своей природы, размера частиц и их морфологии по-разному влияют на выравнивание поверхностей;
- стабильность параметра t_p зависит от особенностей коагуляции дисперсного компонента с поверхностью трения, обусловленных природой, размерами и морфологией частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00553.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей машин. – Киев: Машгиз, 1960. – 164 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
4. ГОСТ 2789-59. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1959. – 6 с.
5. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 6 с.
6. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
7. Бреки А.Д. Триботехнические свойства модифицированных смазочных масел: диссертация кандидата технических наук 05.02.04. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург. 2011. – 161с.
8. Бреки А.Д. Выбор дисперсности твёрдого наполнителя для жидкого смазочного материала // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2012. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 207 – 211.
9. Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS_2 и WSe_2 для железнодорожных втулок / Бреки А.Д. [и др.] // Вопросы материаловедения. СПб. – 2012. – №2(70). – С.109 – 149.
10. Бреки А.Д. Принципы выбора эффективных смазочных масел с дисперсными добавками для подшипниковых узлов управляемых систем // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – 14 – 15 июня 2013. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 284 – 290.

A.D. Breki[1], O.V.Tolochko[1], A.E. Gvozdev[2], N.E. Starikov[3]

INFLUENCE OF ANTIFRICTIONAL DISPERSE MATERIALS ON THE RELATIVE BASIC LENGTH OF THE PROFILE OF SURFACES OF FRICTION OF DETAILS

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Tula State Pedagogical University L.N. Tolstoy, Russia;
[3]Tula State University, Russia.

Abstract

In this paper we consider the influence of dispersed materials antifriction bearing on the relative length of the friction surfaces. Graphic material presented

and the ratio expressing the influence of the dispersed phase on the microgeometry. An experimental study of the influence of the famous anti-friction materials dispersed microgeometry potential surface friction.

Key words: antifriction particulate material, the surface friction, the relative bearing length, microgeometry.

REFERENCES

[1] Garkunov D.N. Increasing wear resistance of machine parts. - Kiev: Mashgiz, 1960. – 164p.
[2] Garkunov D.N. Tribotekhnika. - M.: Mechanical Engineering, 1985. – 424p.
[3] Garkunov D.N. Tribotekhnika. - Moscow: Publishing House of the ICCA, 2001. – 616p.
[4] GOST 2789-59. The surface roughness. Parameters, characteristics and designations. - M.: Standards Press, 1959. – 6p.
[5] GOST 2789-73. The surface roughness. Parameters, characteristics and designations. - M.: Standards Press, 1973. – 6p.
[6] KOMBALOV V.S. The effect of roughness of solids on friction and wear of. - Moscow: Nauka, 1974. – 112p.
[7] Breki A.D. Tribological properties of the modified lubricants: the dissertation of the candidate of technical sciences 05.02.04. St. Petersburg State Polytechnic University ¬ sky. St. Petersburg. 2011. – 161p.
[8] Breki A.D. Selecting solid filler dispersion liquid lubricant // Proceedings of the 2nd International scientific-practical conference "Modern engineering. Science and education. "- 14 - June 15, 2012. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2012. - P. 207 - 211.
[9] Study load capacity lubricant compositions and WS_2 nanoparticles WSe_2 for rail bushings / Breck AD [etc.] // Problems of Materials. St. Petersburg. - 2012. – vol. 2 (70). - P.109 – 149.
[10] Breki A.D. Principles for the selection of effective lubricants dispersed additives for bearing assemblies control systems // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference "Modern engineering. Science and education. "- June 14 - 15, - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2013. - P. 284 - 290.

This work was supported by RFFI grant № 13-08-00553.

УДК 539.3

В. В. Елисеев[1], А. И. Авксентьев[2]

МОДЕЛИ УПРУГИХ СТЕРЖНЕЙ В ДИНАМИКЕ ГИБКИХ РОТОРОВ

[1]Владимир Васильевич Елисеев, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812)650-9353, E-mail: yeliseyev@inbox.ru.

[2]Алексей Игоревич Авксентьев, ведущий расчетчик
ООО «НПО «ЛЭЗ»
Россия, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, ул. дорога на Металлострой 5, корпус 45, лит АО, 196641.
Тел.: (812)540-7458, E-mail: avksent@mail.ru

Аннотация

Рассматривается линейная динамика гибкого упругого ротора во вращающейся системе отсчета. Малость относительной толщины позволяет использовать одномерные стержневые модели. Силы инерции переносного движения и Кориолиса качественно меняют жесткость ротора. Появляются критические режимы, устранимые балансировкой. Разработана методика расчета критических скоростей и параметров балансировки с применением компьютерной математики.

Ключевые слова: линейная теория упругих стержней, вращающийся ротор, силы инерции, критические скорости, условия балансировки, методы компьютерной математики.

Проблема критических режимов и балансировки роторов имеет большое значение не только для инженерной практики. Она очень интересна и с теоретической стороны. Список литературы в этой области обширен; [1-4] – малая его часть. Но представлению ротора как упругой конструкции уделяется недостаточное внимание.

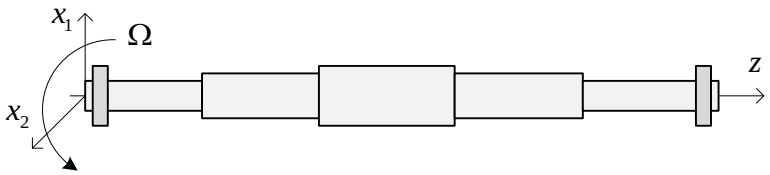


Рис. 1.

1. В данной работе рассматриваются тонкие длинные роторы (рис. 1), к которым можно применить хорошо разработанную современную теорию стержней [5-10]. Стержни представляются как линии Коссера, частицами которых являются элементарные твердые тела с векторами перемещения

$\underline{u}(z,t)$ и малого поворота $\underline{\theta}(z,t)$ (как функциями координаты и времени). Внутренние взаимодействия выражаются векторами силы $\underline{Q}(z,t)$ и момента $\underline{M}(z,t)$. Полная система уравнений линейной механики упругих стержней имеет вид:

$$\underline{Q}' + \underline{q} = \rho(\ddot{\underline{u}} + \ddot{\underline{\theta}} \times \underline{\varepsilon}),\ \underline{M}' + \underline{k} \times \underline{Q} + \underline{m} = \rho \underline{\varepsilon} \times \ddot{\underline{u}} + \underline{\underline{I}} \cdot \ddot{\underline{\theta}},$$
$$\underline{\theta}' = \underline{\underline{A}} \cdot \underline{M} + \underline{\underline{C}} \cdot \underline{Q},\ \underline{u}' = \underline{\theta} \times \underline{k} + \underline{\underline{B}} \cdot \underline{Q} + \underline{M} \cdot \underline{\underline{C}}. \qquad (1)$$

Два первых уравнения выражают законы баланса импульса и момента импульса. В них входят инерционные характеристики стержня: погонная масса ρ, вектор эксцентриситета $\underline{\varepsilon}$ и тензор инерции $\underline{\underline{I}}$. Третье и четвертое уравнения – это соотношения упругости, связывающие векторы деформации $\underline{\kappa} = \underline{\theta}'$ и $\underline{\gamma} = \underline{u}' - \underline{\theta} \times \underline{k}$ с силовыми факторами. Отметим, что вектор деформации $\underline{\kappa}$ определяет искривление и кручение стержня, а вектор $\underline{\gamma}$ – растяжение (сжатие) и поперечный сдвиг. В соотношения упругости входят три тензора податливости: $\underline{\underline{A}}$ – на изгиб и кручение, $\underline{\underline{B}}$ – на растяжение и сдвиг, $\underline{\underline{C}}$ – тензор перекрестных связей.

Нагрузками в (1) служат сила $\underline{q}$ и момент $\underline{m}$ на единицу длины. Они считаются малыми в рассматриваемой линейной теории – как и $\underline{u}, \underline{\theta}, \underline{Q}, \underline{M}$. Тогда $\underline{\varepsilon}, \underline{I}, \underline{\underline{A}}, \underline{\underline{B}}, \underline{\underline{C}}$ соответствуют начальному (недеформированному) состоянию и не зависят от времени.

Нагрузки и инерционные характеристики стержня вычисляются как интегралы по сечению, в котором вводится вектор $\underline{x} = x_\alpha \underline{i}_\alpha$ (с декартовыми координатами x_α и ортами $\underline{i}_\alpha$, суммируем по повторяющемуся индексу). Если $\underline{f}$ – сила на единицу массы, то

$$\underline{q} = \int \underline{f} dm,\ \underline{m} = \int \underline{x} \times \underline{f} dm;$$
$$\rho = \int dm,\ \underline{\varepsilon} = \rho^{-1} \int \underline{x} dm,\ \underline{\underline{I}} = J \underline{\underline{E}} - \underline{\underline{J}},\ \underline{\underline{J}} \equiv \int \underline{x}\,\underline{x} dm,\ J \equiv tr\,\underline{\underline{J}} \qquad (2)$$

(интегралы Стилтьеса).

Тензоры податливости $\underline{\underline{A}}, \underline{\underline{B}}, \underline{\underline{C}}$ находятся средствами теории упругости: из решения задачи Сен-Венана или же (что сложнее) – из асимптотического расщепления трехмерной задачи при малой толщине [6-9]. Их расчет – отдельная тема за рамками данной работы. Но для кругового сечения (свойственного роторам) податливости на изгиб, кручение и растяжение определяются известным элементарным образом, а податливость на сдвиг содержит близкий к единице известный коэффициент.

Из множества положений линейной теории стержней отметим одно – теорему взаимности работ:

$$\int_0^l (\underline{Q}_1 \cdot \underline{u}_2 + \underline{M}_1 \cdot \underline{\theta}_2) ds \equiv A_{12} = A_{21} \quad (z = 0, l: \ \underline{u} = 0, \underline{M} = 0) \tag{3}$$

В скобках – граничные условия с шарнирными опорами (рис. 1). Имеются в виду решения двух статических задач с разными нагрузками. При моделировании гибких роторов эта теорема очень полезна.

Модель с уравнениями (1) является весьма общей: в ней учитываются и податливость на сдвиг, и инерция вращения, и эксцентриситет, и перекрестные связи в соотношениях упругости (модель Коссера-Тимошенко). Без ущерба для корректности можно снизить общность. Например, рассмотреть вариант без сдвига, но с растяжением (модель Кирхгофа-Клебша). Наиболее проста следующая система (Кирхгофа):

$$\underline{Q}' + \underline{q} = \rho \ddot{\underline{u}}, \ \underline{M}' + \underline{k} \times \underline{Q} = 0, \ \underline{\theta}' = \underline{\underline{A}} \cdot \underline{M}, \ \underline{u}' = \underline{\theta} \times \underline{k}. \tag{4}$$

Такая модель хороша для криволинейных стержней (не всегда) и для прямых балок (при изгибе). Но растяжение-сжатие и кручение прямых стержней она не описывает.

В любом случае модель стержня должна иметь вариационную основу – принцип виртуальной работы.

Важно отметить, что линейная теория применима только при малых перемещениях и поворотах. Но повороты ротора неограниченно велики. Следовательно, для применимости линейной теории необходимо введение вращающейся системы отсчета. В таких случаях к действующим «физическим» силам следует добавить две системы сил инерции: переносного движения и Кориолиса.

2. Силы инерции на единицу массы таковы: $\underline{f}_e = -\underline{w}_e, \ \underline{f}_c = -\underline{w}_c$ – ускорения переносного движения и Кориолиса со знаком минус. Первое можно определить словами: это ускорение точки подвижной системы отсчета как твердого тела. А для второго лучше формула: $\underline{w}_c = 2\underline{\Omega} \times \underline{v}_r$, где $\underline{\Omega}$ – угловая скорость системы отсчета, а $\underline{v}_r$ – относительная скорость.

Радиус-вектор точки в объеме ротора равен (рис. 1) $\underline{R} = z\underline{k} + \underline{x} + \underline{u} + \underline{\theta} \times \underline{x}$. Тогда ускорения таковы:

$$\underline{w}_e = -\Omega^2 \underline{R}_\perp = -\Omega^2 (\underline{x} + \underline{u}_\perp + \theta_z \underline{k} \times \underline{x}), \ \underline{w}_c = 2\underline{\Omega} \times \underline{v}_r = 2\Omega (\underline{k} \times \dot{\underline{u}} - \dot{\theta}_z \underline{x}) \tag{5}$$

Значок перпендикуляра выделяет составляющие векторов (и тензоров) в плоскости сечения. Учтены равенства $\underline{\Omega} = \Omega \underline{k}, \ \underline{v}_r = \dot{\underline{u}} + \dot{\underline{\theta}} \times \underline{x}$.

По найденным силам инерции находим согласно (2) нагрузки на ротор как стержень:

$$\underline{q}_e = \Omega^2\rho(\underline{\varepsilon} + \underline{u}_\perp + \theta_z \underline{k}\times\underline{\varepsilon}),\ \underline{q}_c = -2\Omega\rho(\underline{k}\times\dot{\underline{u}} - \dot{\theta}_z\underline{\varepsilon}),$$
$$\underline{m}_e = \Omega^2(\rho\underline{\varepsilon}\times\underline{u}_\perp + J\theta_z\underline{k}),\ \underline{m}_c = -2\Omega\rho\underline{k}\underline{\varepsilon}\cdot\dot{\underline{u}}. \qquad (6)$$

Подставив эти выражения в уравнения баланса импульса и момента импульса (1), получим следующую полную систему:

$$\underline{Q}' + \underline{q} + \Omega^2\rho(\underline{\varepsilon} + \underline{u}_\perp + \theta_z\underline{k}\times\underline{\varepsilon}) - 2\Omega\rho(\underline{k}\times\dot{\underline{u}} - \dot{\theta}_z\underline{\varepsilon}) = \rho(\ddot{\underline{u}} + \ddot{\underline{\theta}}\times\underline{\varepsilon}),$$
$$\underline{M}' + \underline{k}\times\underline{Q} + \underline{m} + \Omega^2(\rho\underline{\varepsilon}\times\underline{u}_\perp + J\theta_z\underline{k}) - 2\Omega\rho\underline{k}\underline{\varepsilon}\cdot\dot{\underline{u}} = \rho\underline{\varepsilon}\times\ddot{\underline{u}} + \underline{\underline{I}}\cdot\ddot{\underline{\theta}},$$
$$\underline{\theta}' = \underline{\underline{A}}\cdot\underline{M} + \underline{\underline{C}}\cdot\underline{Q},\ \underline{u}' = \underline{\theta}\times\underline{k} + \underline{\underline{B}}\cdot\underline{Q} + \underline{M}\cdot\underline{\underline{C}}. \qquad (7)$$

Эту сложную систему можно упростить, отбросив некоторые слагаемые, связанные с эксцентриситетом $\underline{\varepsilon}$. Сначала $\underline{\varepsilon}$ не предполагался малым – как и другие инерционные характеристики. Однако для роторов дисбаланс является основным возмущающим фактором (видно из уравнения баланса импульса), а в линейной теории воздействия должны быть малы. Отбрасывая в (7) малые второго порядка, получим

$$\underline{Q}' + \underline{q} + \Omega^2\rho(\underline{\varepsilon} + \underline{u}_\perp) - 2\Omega\rho\underline{k}\times\dot{\underline{u}} = \rho\ddot{\underline{u}},$$
$$\underline{M}' + \underline{k}\times\underline{Q} + \underline{m} + \Omega^2 J\theta_z\underline{k} = \underline{\underline{I}}\cdot\ddot{\underline{\theta}},$$
$$\underline{\theta}' = \underline{\underline{A}}\cdot\underline{M} + \underline{\underline{C}}\cdot\underline{Q},\ \underline{u}' = \underline{\theta}\times\underline{k} + \underline{\underline{B}}\cdot\underline{Q} + \underline{M}\cdot\underline{\underline{C}}. \qquad (8)$$

Наконец, можно пренебречь перекрестными связями в соотношениях упругости и выделить составляющие в плоскости сечения:

$$\underline{Q}_\perp{}' + \underline{q}_\perp + \Omega^2\rho(\underline{\varepsilon} + \underline{u}_\perp) - 2\Omega\rho\underline{k}\times\dot{\underline{u}}_\perp = \rho\ddot{\underline{u}}_\perp,\ \underline{M}_\perp{}' + \underline{k}\times\underline{Q}_\perp + \underline{m}_\perp = \underline{\underline{I}}_\perp\cdot\ddot{\underline{\theta}}_\perp,$$
$$\underline{\theta}_\perp{}' = \underline{\underline{A}}_\perp\cdot\underline{M}_\perp,\ \underline{u}_\perp{}' = \underline{\theta}_\perp\times\underline{k} + \underline{\underline{B}}_\perp\cdot\underline{Q}_\perp. \qquad (9)$$

Здесь два отличия от модели Коссера-Тимошенко: «центробежные» силы $\Omega^2\rho\underline{u}_\perp$ и «гироскопические» $-2\Omega\rho\underline{k}\times\dot{\underline{u}}_\perp$. Первые выражают некую отрицательную жесткость и особенно важны в механике роторов.

3. Ротор должен держать нагрузку от дисбаланса уже в статическом режиме (иначе, при колебаниях, возможно усталостное разрушение). Это означает однозначную разрешимость задачи статики с нагрузкой $\Omega^2\rho\underline{\varepsilon}$. Но допустимо только тривиальное нулевое решение у следующей однородной задачи:

$$\underline{Q}' + \Omega^2\rho\underline{u} = 0,\ \underline{M}' + \underline{k}\times\underline{Q} = 0,\ \underline{\theta}' = \underline{\underline{A}}\cdot\underline{M},\ \underline{u}' = \underline{\theta}\times\underline{k} + \underline{\underline{B}}\cdot\underline{Q};$$
$$z = 0, l:\ \underline{u} = 0, \underline{M} = 0. \qquad (10)$$

(знаки перпендикуляра опущены). Собственные значения Ω_i этой задачи (при которых возникает нетривиальное решение) – это критические скорости. Собственные функции (перемещения и повороты – формы) обозначим $\underline{U}_i, \underline{\Theta}_i$.

Обратимся к неоднородной задаче статики на критической скорости. Она разрешима лишь при некоторой ортогональности нагрузки к собственным функциям. Используя теорему о взаимности работ (3), можно вывести следующее условие разрешимости:

$$\int_0^l [(\underline{q} + \Omega^2 \rho \underline{\varepsilon}) \cdot \underline{U}_i + \underline{m} \cdot \underline{\Theta}_i] ds = 0 \tag{11}$$

Пусть нагрузкой является лишь дисбаланс, причем дополнительно установлен балансировочный грузик массой m_0 в сечении с координатой z_0 и вектором $\underline{x} = \underline{\varepsilon}_0$. Тогда

из (11) получим

$$\int_0^l \rho \underline{\varepsilon} \cdot \underline{U}_i ds + m_0 \underline{\varepsilon}_0 \cdot \underline{U}_i(z_0) = 0 \tag{12}$$

Это условие балансировки позволяет подобрать массу грузика и место установки, если известен эксцентриситет и формы $\underline{U}_i$.

Отметим, что задача о критических режимах ротора (10) отличается от задачи о свободных изгибных колебаниях. Различие пропадает в классической модели без сдвига и инерции вращения. Но относительная толщина ротора не настолько мала, чтобы пренебрегать ими.

4. Расчет критических режимов реальных роторов возможен только численными методами. Но может быть достаточно средств компьютерной математики (Mathcad).

Рассмотрим ротор кругового сечения. Для него

$$\underline{\underline{A}}_\perp = A \underline{\underline{E}}_\perp,\ A = (E \frac{\pi R^4}{2})^{-1},\ \underline{\underline{B}}_\perp = B \underline{\underline{E}}_\perp,\ B = (k \mu \pi R^2)^{-1},$$

$$k = \frac{6(1+\nu)^2}{7 + 14\nu + 8\nu^2},\ \mu = \frac{E}{2(1+\nu)},\ \rho = \rho_3 \pi R^2,\ \underline{\underline{I}}_\perp = I \underline{\underline{E}}_\perp,\ I = \rho_3 \frac{\pi R^4}{4}. \tag{13}$$

Введены обозначения модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона и коэффициента сдвига (k). Для изгиба в любой плоскости, проходящей через ось вращения, получим

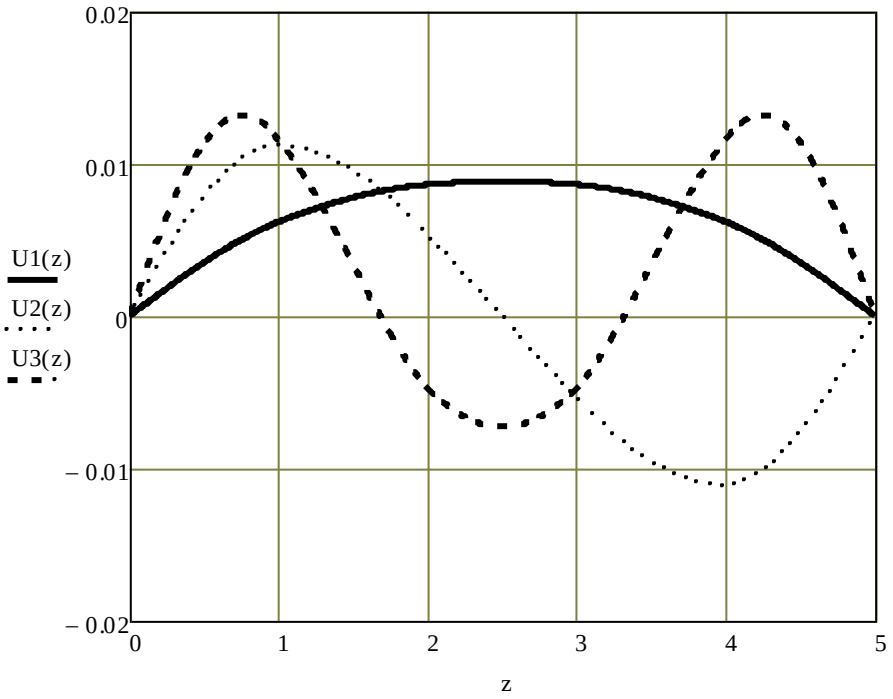
$$Q' + \Omega^2 \rho u = 0,\ M' + Q = 0,\ \theta' = AM,\ u' = \theta + BQ;$$
$$z = 0, l:\ u = 0, M = 0 \tag{14}$$

(индексы опущены).

При произвольных зависимостях параметров от длины задача легко решается методом стрельбы (в Mathcad это встроенные функции *sbval-Rkadapt*). Система ОДУ представляется в матричном виде:

$$Y=\begin{pmatrix} Q \\ M \\ \theta \\ u \\ \Omega^2 \end{pmatrix},\ Y'=D(z,Y)=\begin{pmatrix} -\rho(z)Y_4Y_3 \\ -Y_0 \\ A(z)Y_1 \\ Y_2+B(z)Y_0 \\ 0 \end{pmatrix},\ z=0,l:\ Y_1=0,\ Y_3=0. \tag{15}$$

В иллюстративном примере рассматривался стальной ротор длиной $l=5\,м$, с пятью участками равной длины $1м$ и радиусами $0.3, 0.4, 0.5\,м$. Результаты расчета трех первых критических режимов – на рис. 2.



$\underline{\Omega_1=364}\,(378),\ \underline{\Omega_2=1264}\,(1356),\ \underline{\Omega_3=2832}\,(3320)$

Рис. 2.

Здесь же представлены результаты без сдвига (в скобках). Учет сдвига изменил (уменьшил) расчетные критические скорости на 3.7, 6.8, и 14.7 % соответственно.

5. Задача о критических режимах может быть поставлена в иной форме – вариационной. Для кругового сечения в модели без сдвига равна нулю вариация функционала от прогиба:

$$\delta Э[u]=0,\ Э=\frac{1}{2}\int_0^l (a(z)u''^2-\Omega^2\rho(z)u^2)dz,\ u(0)=u(l)=0. \tag{16}$$

Условия на концах должны быть обеспечены, тогда как условия на момент будут следствиями вариационной постановки. Соответствующие (16) уравнения Эйлера рассмотрены выше.

Для (16) применяется Ритца с аппроксимацией перемещений

$$u(z)=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\varphi_i(z);\ \ \delta u=\sum_{i=1}^{n}\varphi_i\delta\alpha_i,\ \ \varphi_i(0)=\varphi_i(l)=0. \tag{17}$$

Задача сводится к решению линейной алгебраической системы для варьируемых параметров α_i:

$$(C-\Omega^2\mathrm{P})\alpha=0,\ C_{ij}=\int_0^l a\varphi_i''\varphi_j''dz,\ \mathrm{P}_{ij}=\int_0^l\rho\varphi_i\varphi_j dz \tag{18}$$

Здесь имеем обобщенную задачу на собственные значения (с матрицами C,P). Встроенные функции Mathcad *genvals,genvecs* легко ее решают.

При шарнирных опорах на концах ротора можно принять $\varphi_i(z)=\sin(i\pi z/l)$. Компоненты матриц C,P определяются численно. Результаты расчета трех критических скоростей в зависимости от количества (n) координатных функций – на рис. 3:

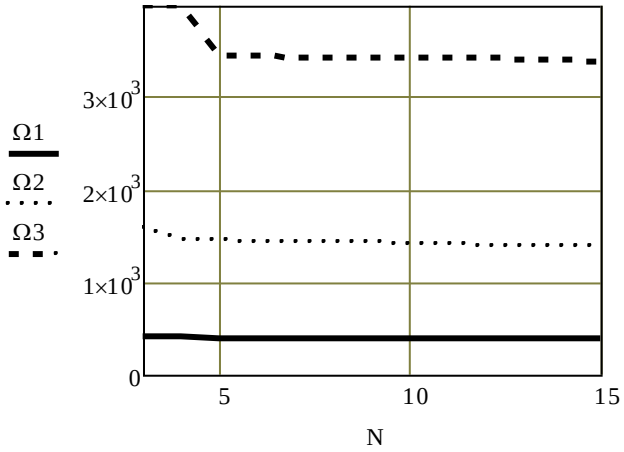


Рис. 3.

Расчетные значения критических скоростей, казалось бы, стабилизируются с ростом n. Но сохраняются отличия от решений ОДУ на 1.9, 2.1 и 1.2 % соответственно.

6. Обратимся снова к функционалу (16). Слагаемое с Ω^2 под интегралом представляет некую отрицательную жесткость. Уже на первой критической скорости как бы исчезает жесткость системы; она не может держать дисбаланс в статическом режиме. Ситуация аналогична неустойчивости равновесия упругой системы с ростом нагрузки.

Как и в теории устойчивости, полное понимание невозможно без рассмотрения динамики. Для роторов при этом появляются гироскопические силы [10]. При вариационном подходе им соответствует антисимметричная матрица. Но может быть необходим и учет диссипативных сил – например, как в линейной вязкоупругости [9].

Представленная теория использована как основа расчетной методики для новых роторов, создаваемых на предприятиях СПб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
2. Гусаров А.А. Динамика и балансировка гибких роторов. – М.: Наука, 1990. – 152 с.
3. Елисеев В.В. Динамика, критические скорости и балансировка термоупругих роторов. // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. №3. С. 311-317.
4. Елисеев В.В. К нелинейной динамике упругих стержней // ПММ, Т. 52, в. 4, 1988. С. 635-641.
5. Елисеев В.В. Механика деформируемого твердого тела. Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 231 с.
6. Елисеев В.В. Механика упругих тел. 2 изд. СПбГПУ, 2003. 336 с.
7. Елисеев В.В. Одномерные и трехмерные модели упругих стержней // Тр. СПбГТУ, 448, 1993. С. 29-52.
8. Елисеев В.В. Определяющие уравнения для упругих призматических стержней // Изв. АНСССР, МТТ, 1, 1989. С. 70-75.
9. Кельзон А.С., Циманский Ю.П., Яковлев В.И. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
10. Позняк Э.Л. Колебания роторов. В кн.: Вибрации в технике, в 6-ти т. Т.3. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 130-189.

V.V.Yeliseyev[1], A. I. Avksentev[2]

MODELS OF ELASTIC RODS IN THE DYNAMICS FLEXIBLE ROTORS

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]OOO «NPO «LEZ», Russia.

Abstract

The linear dynamics of flexible elastic rotor in a rotating frame of reference. The smallness of the relative thickness of the core allows the use of one-dimensional model. Inertia force and the Coriolis translational motion is drastically changing the stiffness of the rotor. Appear critical modes , disposable balancing. A method of calculating the critical speeds and balancing parameters using computer mathematics

Keywords: linear theory of elastic rods, spinning rotor inertia forces , critical speed , balancing conditions , methods of computer mathematics .

REFERENCES

[1] Goldin A.S. Vibraciya rotornih mashin. M.: Mashinostroenie, 2000. – 344 p. (rus.)

[2] Gusarov A.A. Dinamica I balansirovca gibkih rotorov. M.: Nauka, 1990. – 152 p. (rus.)

[3] Yeliseyev V.V. Dinamica, kriticheskie skorosti I balansirovka termouprugih rotorov. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka I obrazovanie. 2013. №3. P. 311-317 (rus.)

[4] Yeliseyev V.V. K nelineynoy dinamike uprugih sterjney // PMM, Vol.52, v.4, 1988. P. 635-641. (rus.)

[5] Yeliseyev V.V. Mahanica deformiruemogo tverdogo tela. Izd-vo Politehn. un-ta, 2006. 231 c. (rus.)

[6] Yeliseyev V.V. Mehanica uprugih tel. 2 izd. SPbGPU, 2003. 336 p. (rus.)

[7] Yeliseyev V.V. Odnomernie I trehmernie modeli uprugih sterjney //Tr. SPbGTU, 448, 1993. P. 29-52. (rus.)

[8] Yeliseyev V.V. Opredelyaushie uravneniya dlya uprugih sterjney // Izv. ANSSSR, MTT, 1, 1989. P. 70-75. (rus.)

[9] Kelzon A.S., Cimanskiy U.P., Yakovlev V.I. Dinamica rotorov v uprugih oporah. M.: Nauka, 1982. – 280 p. (rus.)

[10] Poznyak Y.L. Kolebaniya rotorov. Vibraciya v tehnike, v 6-I t. Vol.3. M.: Mashinostroenie, 1980. – 280 p. (rus.)

УДК 621.165

В.В.Елисеев[1], А.А.Москалец[2],

КОЛЕБАНИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК КАК ЕСТЕСТВЕННО ЗАКРУЧЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ

[1]Елисеев Владимир Васильевич, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 650-9353, E-mail: yeliseyev@inbox.ru

[2]Москалец Артем Анатольевич, бакалавр
Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (951) 642-71-04, E-mail: artem.moskalec@gmail.com

Аннотация

Турбинные лопатки рассматриваются как прямолинейные естественно-закрученные стержни произвольного переменного сечения. Колебания – свободные или вынужденные – считаются синусоидальными. Исходные уравнения представлены в тензорной форме. В компонентах для амплитуд получены краевые задачи восьмого порядка при вынужденных колебаниях и девятого – при свободных. Задачи решаются численно методом стрельбы в пакете Mathcad. В результате находятся собственные формы и частоты, а также амплитуды вынужденных колебаний.

Ключевые слова: линейная теория стержней, естественная крутка, краевая задача для ОДУ, частоты и формы колебаний, метод стрельбы.

Цель работы – создание методики расчета свободных и вынужденных колебаний турбинных лопаток как стержней. Моделью лопатки является прямой естественно закрученный консольный стержень несимметричного сечения. Закрученными называют стержни, боковая поверхность которых образуется винтовым движением контура сечения [4].

По механике турбинных лопаток как естественно закрученных стержней имеется обширная литература [2,3,7,9,10]. Особенностью данной работы является применение современной теории стержней [5,6] в сочетании с компьютерной математикой [8].

Перемещения, повороты и нагрузки считаются малыми величинами, в связи с этим используется линейная теория.

Поставленные задачи решаются с помощью системы компьютерной математики MathCAD [8].

Геометрические характеристики

Объектом исследования является лопатка паровой турбины Калужского турбинного завода [7], имеющая сложный переменный профиль. Для определения геометрических характеристик каждого сечения определены характеристики пяти сечений – корневого, концевого и трех промежуточных, с дальнейшей интерполяцией каждой характеристики по продольной координате *x*. (Увеличение числа сечений позволит задать более точную модель, но процесс моделирования неоправданно усложнится.)

На рис.1 изображено корневое сечение. Контур сечения задан двумя

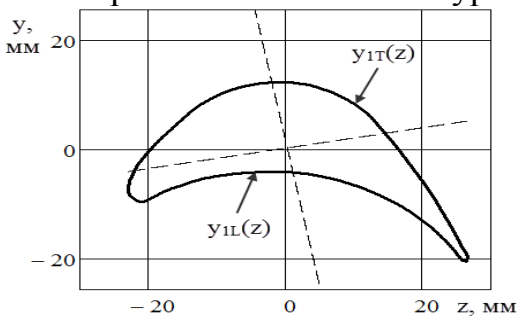


Рис.1. Корневое сечение

линиями – верхней $y_{1T}(z)$ и нижней $y_{1L}(z)$ (1 – номер сечения), уравнения которых заданы с помощью интерполяции двух соответствующих массивов точек. Пунктирными линиями изображены главные оси.

Радиус-вектор центра тяжести и площадь сечения:

$$\boldsymbol{r}_c = \frac{1}{S}\int_F \boldsymbol{r}\,dF = \frac{1}{S}\int_{z_1}^{z_2}\left(\int_{y_{1L}(z)}^{y_{1T}(z)} \boldsymbol{r}\,dy\right)dz,\ S = \int_{z_1}^{z_2}\left(y_{1T}(z) - y_{1L}(z)\right)dz. \qquad (1)$$

Тензор геометрических моментов инерции сечения:

$$\underline{\underline{\boldsymbol{J}}} = \int_F (\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_c)(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_c)\,dF\,. \qquad (2)$$

В главных осях будет

$$\underline{\underline{\boldsymbol{J}}} = J_y \boldsymbol{jj} + J_z \boldsymbol{kk}\,, \qquad (3)$$

где J_y, J_z – главные моменты инерции; $\boldsymbol{j}$, $\boldsymbol{k}$ – орты осей y, z соответственно (рис.2).

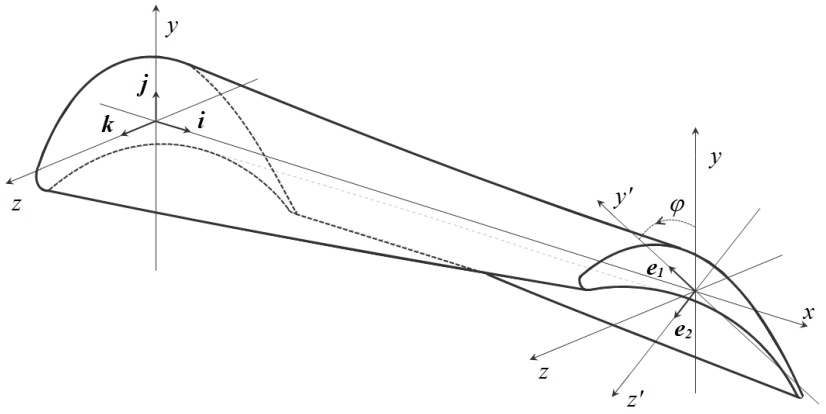


Рис. 2. Естественно закрученный стержень

Моменты вычисляются в нескольких сечениях. Зависимости $J_z(x)$, $J_y(x)$ получены интерполяцией по координате *x*.

Аналогичным образом строятся зависимости погонной массы $\rho_l(x)$ (для каждого сечения $\rho_l = S\rho$, где ρ – объемная плотность), а также угла поворота $\varphi(x)$ главных осей относительно исходных (рис.3).

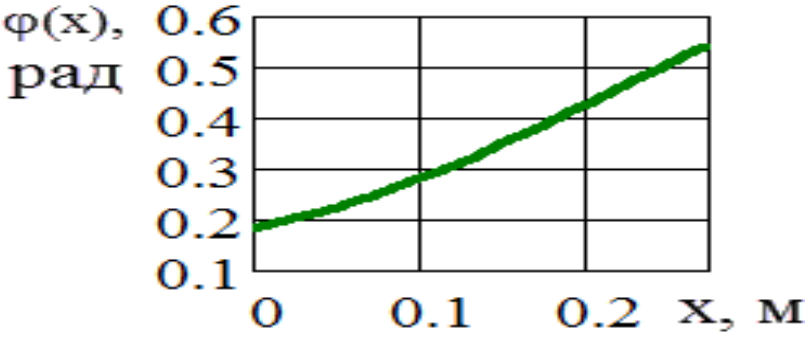


Рис. 3. Зависимость угла от координаты

Крутка стержня $\Omega \equiv d\varphi/dx$.

Система ОДУ и ее решение методом стрельбы

Система векторных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) для амплитуд имеет следующий вид [5,6]:

$$\boldsymbol{Q}' + \boldsymbol{q} = -\omega^2 \rho \boldsymbol{u};\ \boldsymbol{M}' = \boldsymbol{Q} \times \boldsymbol{i};\ \boldsymbol{\theta}' = \underline{\underline{\boldsymbol{A}}} \cdot \boldsymbol{M};\ \boldsymbol{u}' = \boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{i}. \qquad (4)$$

Здесь обозначены векторы: $\boldsymbol{Q}$, $\boldsymbol{M}$ – сила и момент в сечении, $\boldsymbol{\theta}$, $\boldsymbol{u}$ – поворот и перемещение, $\boldsymbol{q}$ – погонная нагрузка, $\boldsymbol{i}$ – орт оси *x*; $\underline{\underline{\boldsymbol{A}}} \equiv \underline{\underline{\boldsymbol{a}}}^{-1}$ – тензор податливости (обратный тензору жесткости); ω – частота, ρ – погонная масса; штрих означает дифференцирование по *x*.

При изгибных колебаниях достаточно следующего представления жесткости:

$$\underline{\underline{\boldsymbol{a}}} = a_1 \boldsymbol{e}_1 \boldsymbol{e}_1 + a_2 \boldsymbol{e}_2 \boldsymbol{e}_2, \qquad (5)$$

где $a_1 = EJ_z(x)$, $a_2 = EJ_y(x)$ – жесткости на изгиб в главных направлениях. Орты этих направлений $\boldsymbol{e}_1$, $\boldsymbol{e}_2$:

$$\boldsymbol{e}_1 = \boldsymbol{j}\cos\varphi + \boldsymbol{k}\sin\varphi,\ \boldsymbol{e}_2 = -\boldsymbol{j}\sin\varphi + \boldsymbol{k}\cos\varphi. \qquad (6)$$

Тогда тензор податливости принимает следующий вид:

$$\underline{\underline{\boldsymbol{A}}} = A_{yy}\boldsymbol{jj} + A_{zz}\boldsymbol{kk} + A_{yz}(\boldsymbol{jk} + \boldsymbol{kj}). \qquad (7)$$

Компоненты тензора:

$$A_{yy} = a_1^{-1}\cos^2\varphi + a_2^{-1}\sin^2\varphi,\ A_{zz} = a_1^{-1}\sin^2\varphi + a_2^{-1}\cos^2\varphi,$$
$$A_{yz} = (a_1^{-1} - a_2^{-1})\sin\varphi\cos\varphi. \qquad (8)$$

Граничные условия для консольного стержня без нагрузки на свободном конце:

$$x = 0:\ u_y = u_z = 0,\ \theta_y = \theta_z = 0;\ x = l:\ Q_y = Q_z = 0,\ M_y = M_z = 0. \qquad (9)$$

Векторные уравнения (8) в проекциях на оси *y*, *z* дают следующую систему восьми дифференциальных уравнений:

$$Q_y' + q_y = -\omega^2\rho u_y,\ Q_z' + q_z = -\omega^2\rho u_z,\ M_y' = Q_z,\ M_z' = -Q_y,$$
$$\theta_y' = A_{yy}M_y + A_{yz}M_z,\ \theta_z' = A_{yz}M_y + A_{zz}M_z,\ u_y' = \theta_z,\ u_z' = -\theta_y. \qquad (10)$$

Поставленная краевая задача решается методом стрельбы с использованием встроенных функций *sbval* и *rkfixed* [8]. При этом система уравнений представляется в матричном виде:

$$Y \equiv \left(Q_y \quad Q_z \quad M_y \quad M_z \quad \theta_y \quad \theta_z \quad u_y \quad u_z \quad \omega^2\right)^T,$$
$$Y' = D(x, Y) \equiv$$
$$\equiv \left(-Y_9\rho Y_7 \quad -Y_9\rho Y_8 \quad Y_2 \quad -Y_1 \quad A_{yy}Y_3 + A_{yz}Y_4 \quad A_{yz}Y_3 + A_{zz}Y_4 \quad Y_6 \quad -Y_5 \quad 0\right)^T. \qquad (11)$$

Постановка (11) относится к свободным колебаниям, когда частота ω неизвестна и рассматривается как дополнительный девятый элемент: $Y_9 = \omega^2$, $D_9 = 0$. Распределенная нагрузка $q_y = 0$, $q_z = 0$.

Результаты расчета

Найдены шесть собственных частот:

$$\omega_1 = 1.541\cdot 10^3,\ \omega_2 = 3.614\cdot 10^3,\ \omega_3 = 7.376\cdot 10^3,$$
$$\omega_4 = 1.755\cdot 10^4,\ \omega_5 = 2.05\cdot 10^4,\ \omega_6 = 3.573\cdot 10^4.$$

Видим, что закон возрастания частот с номером совсем не похож на тот, что при колебаниях в плоскости [1].

При расчете форм нормирующий множитель λ найден из условия:

$$\lambda^2 \int_0^L \rho_l(x)(u_y^2 + u_z^2)dx = 1, \qquad (12)$$

где u_y, u_z – столбцы собственных форм. Результаты расчета форм – на рис. 4:

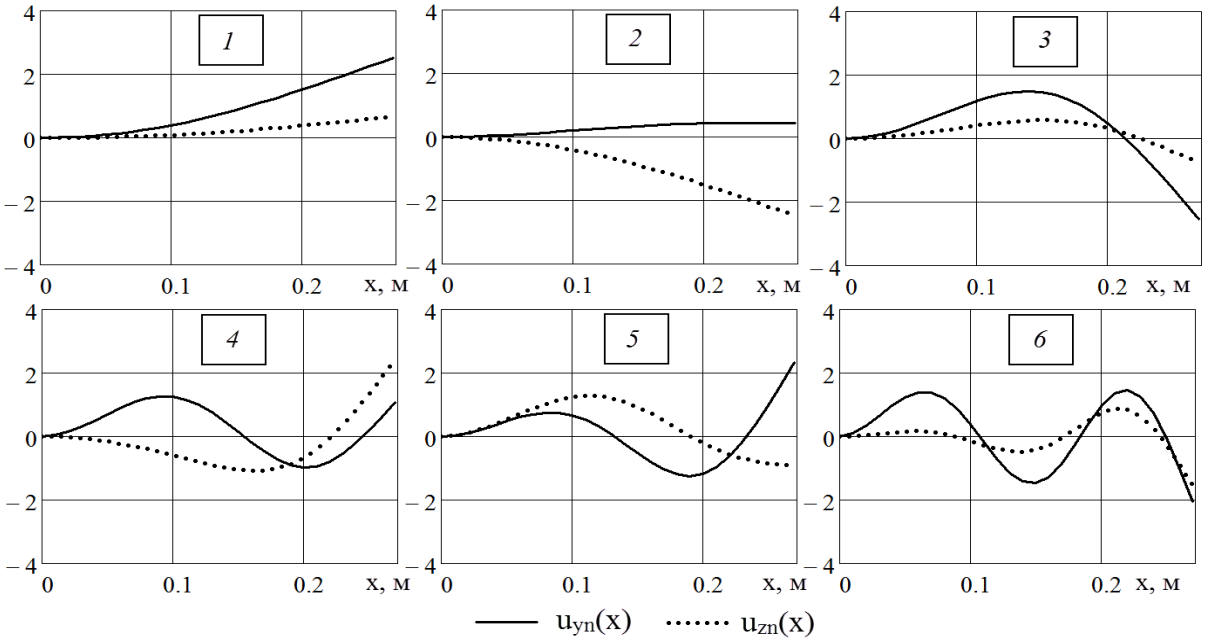


Рис. 4. Нормированные собственные формы

Из графиков следует, что известное правило для количества узлов формы [1] перестает работать при связанных колебаниях в двух плоскостях.

При вынужденных колебаниях система уравнений представляется в следующем матричном виде:

$$Y \equiv \left(Q_y \quad Q_z \quad M_y \quad M_z \quad \theta_y \quad \theta_z \quad u_y \quad u_z\right)^T; Y' = D(x,Y) \equiv$$

$$\equiv \left(-q_a - \omega^2 \rho Y_6 \quad -\omega^2 \rho Y_7 \quad Y_1 \quad -Y_0 \quad A_{yy}Y_2 + A_{yz}Y_3 \quad A_{yz}Y_2 + A_{zz}Y_3 \quad Y_5 \quad -Y_4\right)^T,$$

где $q_a = \dfrac{\rho_в v^2}{2} b$ – аэродинамическая нагрузка (равномерно распределенная по лопатке), $\rho_в$ – плотность воздуха, v – окружная скорость сечения лопатки, b – ширина лопатки в данном сечении.

На рис. 5 представлено решение для $\omega = 1.5 \cdot 10^4$.

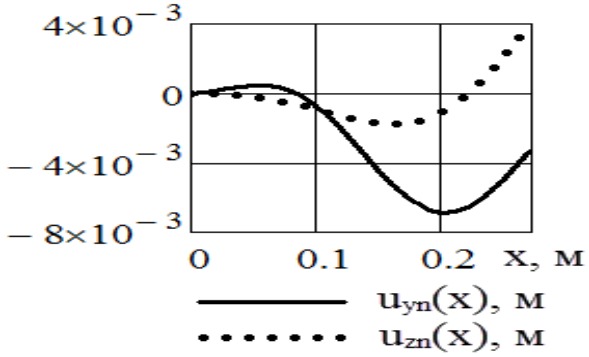


Рис. 5. Вынужденные колебания

Амплитуды велики (до 7 мм) – такие колебания опасны и недопустимы.

Итак, разработана новая методика расчета колебаний прямолинейных закрученных лопаток с произвольным изменением свойств по длине, основанная на численном интегрировании ОДУ теории стержней средствами компьютерной математики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Биргер И. А., Шорр Б. Ф. и др. Динамика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. Вибрация в технике; Справочник. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов./Под. Ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
4. Воробьев Ю. С., Шорр Б. Ф. Теория закрученных стержней. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 188 с.
5. Елисеев В. В. Механика деформируемого твердого тела. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 232 с.
6. Елисеев В. В. Механика упругих тел. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 336 с.
7. Жирицкий Г. С., Струнки́н В. А. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1968. – 520 с.
8. Кирьянов Д. В. Mathcad 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
9. Костюк А. Г. Динамика и прочность турбомашин: Учебник для студентов вузов по специальности «Турбиностроение». – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
10. Левин А. В., Боришанский К. Н., Консон Е. Д. Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин. – Л.: Машиностроение, 1981. – 710 с.

V.V. Yeliseyev, A.A. Moskalets

VIBRATIONS OF TURBINE SPADES AS OF NATURALLY TWISTED RODS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Turbine blades are considered as naturally twisted rods of arbitrary variable cross section. Both free and forced vibrations are considered sinusoidal. Initial equations are presented in the tensor form. Boundary value problems of the

eighth order in case of forced vibrations and of ninth order in case of free vibrations are obtained in component amplitudes. The problems are solved numerically using the shooting method in Mathcad. In the result of this, modes and frequencies, and amplitudes of forced vibrations are calculated.

Keywords: linear theory of rods, natural twist, ODE boundary value problem, frequencies and vibration modes, shooting method.

REFERENCES

[1] Biderman V. L. Teoriya mehanicheskih kolebaniy. – M.: Vyisshaya shkola, 1980. – 408 p. (rus.)
[2] Birger I. A., Shorr B. F. i dr. Dinamika aviatsionnyih gazoturbinnyih dvigateley. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 232 p. (rus.)
[3] Vibratsiya v tehnike; Spravochnik. T. 3. Kolebaniya mashin, konstruktsiy i ih elementov./Pod. Red. F. M. Dimentberga i K. S. Kolesnikova. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 544 p. (rus.)
[4] Vorobev Yu. S., Shorr B. F. Teoriya zakruchennyih sterzhney. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 188 p. (rus.)
[5] Eliseev V. V. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. – 232 p. (rus.)
[6] Eliseev V. V. Mehanika uprugih tel. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. – 336 p. (rus.)
[7] Zhiritskiy G. S., Strunkin V. A. Konstruktsiya i raschet na prochnost detaley parovyih i gazovyih turbin. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 520 p. (rus.)
[8] Kiryanov D. V. Mathcad 14. – SPb.: BHV-Peterburg, 2007. – 704 p. (rus.)
[9] Kostyuk A. G. Dinamika i prochnost turbomashin: Uchebnik dlya studentov vuzov po spetsialnosti «Turbinostroenie». – M.: Mashinostroenie, 1982. – 264 p. (rus.)
[10] Levin A. V., Borishanskiy K. N., Konson E. D. Prochnost i vibratsiya lopatok i diskov parovyih turbin. – L.: Mashinostroenie, 1981. – 710 p. (rus.)

УДК 625.748.32

В.В. Елисеев[1], Е.А. Оборин[2]

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОТИВОТАРАННОГО ШЛАГБАУМА

[1]Елисеев Владимир Васильевич, д.ф.-м.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 959-9607, E-mail: yeliseyev@inbox.ru

[2]Оборин Евгений Александрович, бакалавр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (812) 552-6429, E-mail: oborin1@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрен упругопластический изгиб балки шлагбаума с сосредоточенной нагрузкой от наезда автомобиля. Диаграмма деформирования материала считается кусочно-линейной. Для коробчатого сечения балки определена связь момента с кривизной. Нелинейная краевая задача для балки решена посредством Mathcad. Из уравнения баланса энергии найдена связь прогиба с массой и скоростью автомобиля.

Ключевые слова: противотаранный барьер, наезд автомобиля, балка, упругопластический изгиб, нелинейная краевая задача, метод стрельбы, баланс энергии.

Противотаранные барьеры служат для предотвращения доступа автотранспорта на охраняемую территорию. Ассортимент их разнообразен: ворота, столбики, блокираторы, шлагбаумы.

При большом разнообразии конструкторских и технологических решений мало внимания уделяется вопросам расчета наиболее значимых частей противотаранных изделий. Проверка прочности производится с помощью дорогих и трудоемких натурных испытаний – «краш-тестов». Но затраты на тестирование можно значительно сократить, применяя современные средства математического моделирования [1]. Существуют коммерческие программные системы (LS-DYNA) для подобных расчетов.

В работе предлагается альтернативный аналитико-вычислительный подход к оценке прочности противотаранных барьеров. Моделирование и расчет барьеров основаны на положениях современной теории стержней с

физической нелинейностью и применении компьютерной математики (Mathcad) [7].

Рассматриваемый барьер-шлагбаум представляет собой стальную балку коробчатого сечения (профильную трубу или сварную из двух швеллеров). Она может поворачиваться вокруг шарнирной опоры. Вторая опора (замковая) служит для удержания шлагбаума при его деформации. Под опорами расположены трубы основания, залитые армированным бетоном.

Расчетная схема шлагбаума как балки с сосредоточенной силой в середине представлена на рис. 1. Сечением является стальная профильная прямоугольная труба.

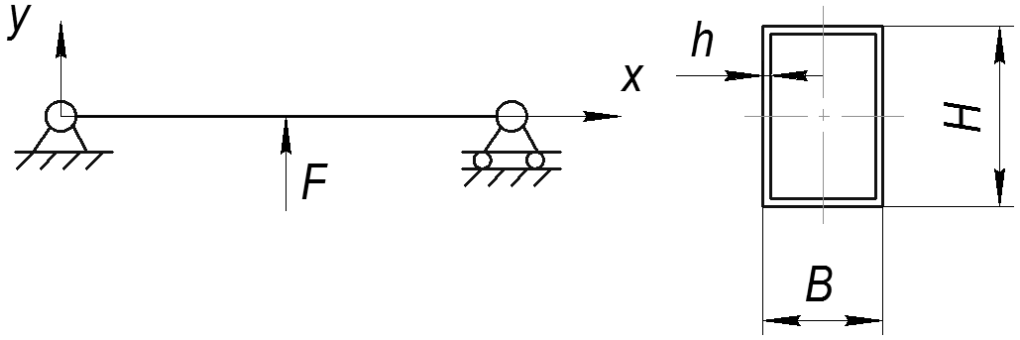


Рис. 1. Расчетная схема балки

Согласно элементарной теории изгиба балки [2-6,8,10] (в плоскости x, y с нагрузкой $f(x)$) имеем следующую краевую задачу для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\begin{aligned} &Q' = -f,\ M' = -Q,\ \theta' \equiv \underline{\kappa = AM},\ u' = \theta; \\ &x = 0, l:\ u = 0,\ M = 0. \end{aligned} \quad . \qquad (1)$$

Обозначено: Q и M – сила и момент, θ – угол поворота сечения, κ – кривизна, u – прогиб, A – изгибная податливость, $(...)' = d/dx$. При сосредоточенной нагрузке $f = F\delta(x-\xi)$ используется дельта-функция, ξ – координата точки приложения силы.

Но подчеркнутое соотношение между кривизной и моментом справедливо только для линейно упругого материала. Его необходимо заменить при появлении пластических деформаций (неизбежных при наезде). Используем характерные для элементарной теории соотношения между деформацией, кривизной, напряжением и моментом:

$$\varepsilon = -\kappa y,\ \kappa \equiv \theta',\ \sigma = \sigma(\varepsilon),\ M = -\int \sigma y dS = M(\kappa) \qquad (2)$$

(интеграл по сечению). Примем, что сечение симметрично, имеет высоту H и ширину $b(y)$. Тогда

$$M(\kappa) = -2\int_0^{H/2} b(y)\sigma(-\kappa y) y dy\,. \qquad (3)$$

Для сечения на рис. 1

$$b(y)=\begin{cases}2h, & 0<y<H/2-h\\ B, & y>H/2-h\end{cases},\quad b(-y)=b(y). \tag{4}$$

Напряжение считаем функцией от деформации даже в неупругой стадии, поскольку рассматриваем монотонную нагрузку. На рис. 2 представлена простейшая кусочно-линейная зависимость с учетом пластичности и упрочнения:

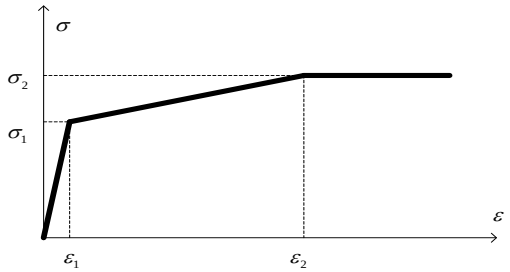


Рис. 2. Диаграмма деформирования

Аналитическая зависимость для диаграммы:

$$\sigma(\varepsilon)=\begin{cases}E\varepsilon, & 0<\varepsilon<\varepsilon_1\\ \sigma_1+E_1(\varepsilon-\varepsilon_1), & \varepsilon_1<\varepsilon<\varepsilon_2;\\ \sigma_2, & \varepsilon>\varepsilon_2\end{cases}\quad \sigma(-\varepsilon)=-\sigma(\varepsilon). \tag{5}$$

Здесь E – модуль Юнга, $\sigma_1=E\varepsilon_1$ – предел упругости, $\sigma_2=\sigma_1+E_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)$ – предел прочности, E_1 – модуль линейного упрочнения. При $\varepsilon=\varepsilon_2$ начинается неограниченная текучесть.

Функция (3) при зависимости (5) строится посредством пакета Mathcad 14, используемого на всех этапах данной работы. Обратная функция $\kappa(M)$ находится линейной интерполяцией с перестановкой массивов значений аргумента и функции.

При нагрузке сосредоточенной силой в середине балки из первых двух уравнений в (1) и граничных условий следует

$$Q=\frac{F}{2}-F\Phi(x-\xi),\ M=-\frac{F}{2}x+F(x-\xi)\Phi(x-\xi), \tag{6}$$

где $\Phi(x)$ – функция единичного скачка ($\Phi'(x)=\delta(x)$).

В системе (1) заменим подчеркнутое соотношение на $\theta'=\kappa(M)$ и воспользуемся (6). Придем к следующей системе (в матричном виде):

$$Y\equiv\begin{pmatrix}\theta\\ u\end{pmatrix},\ Y'=D(x,Y)=\begin{pmatrix}\kappa[M(x)]\\ Y_0\end{pmatrix},$$
$$M(x)\equiv-\frac{F}{2}x+F(x-\xi)\Phi(x-\xi);\ x=0,l:Y_1=0. \tag{7}$$

Это – нелинейная краевая задача. Она решается посредством Mathcad методом стрельбы со встроенными функциями *sbval-rkfixed* [7]. Переход от

(1) к (7) позволил преодолеть вычислительные трудности при сосредоточенной нагрузке.

Проведены расчеты при следующих значениях параметров (в системе СИ): $l=4$, $H=0{,}24$, $B=0{,}16$, $h=0{,}01$, $E=2{,}1\cdot10^{11}$, $\sigma_1=2\cdot10^8$, $\varepsilon_1=\sigma_1/E$, $\varepsilon_2=0{,}1$, $\sigma_2=3\cdot10^8$, $E_1=(\sigma_2-\sigma_1)/(\varepsilon_2-\varepsilon_1)$, $\xi=2$ (сила в середине).

Зависимость кривизны балки от изгибающего момента – на рис. 3.

Начальный «почти горизонтальный» участок соответствует линейной упругости. Рассматривая распределение напряжения $\sigma(\kappa y)$ по толщине, находим момент на пределе упругости $M_1=1{,}001\cdot10^5$ ($\kappa_1=7{,}93\times10^{-3}$), момент начала текучести $M_2=1{,}72\cdot10^5$ ($\kappa_2=2$) и предельный момент $M_3=1{,}829\cdot10^5$ ($\kappa\to\infty$).

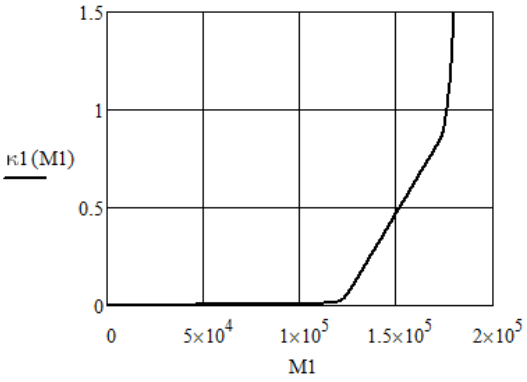


Рис. 3. Зависимость кривизны от момента

Нагрузка F в расчетах менялась с переменным шагом так, чтобы определить и предел упругости, и несущую способность. Соответственно, должно быть $|M(x)|=M_1$ и $|M(x)|=M_3$. Значения нагрузки оказались $F_1=1{,}001\cdot10^5$ и $F_3=1{,}72\cdot10^5$.

На рис. 4 представлен прогиб для предельной нагрузки F_3, а на рис. 5 – изгибающий момент. Образовался «пластический шарнир» – под силой:

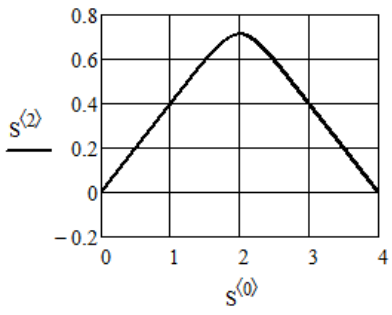


Рис. 4. Прогиб при предельной нагрузке

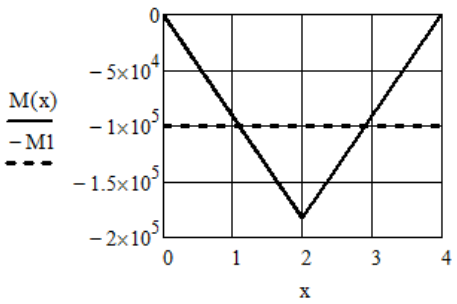


Рис. 5. Момент при предельной нагрузке. Граница зоны упругости

На графике момента пунктир показывает границы зоны упругости. Прогиб под силой в предельном состоянии $u_* = 0,714$.

Далее посредством интерполяции находим связь нагрузки с прогибом $F(q)$, а также соответствующую «потенциальную» энергию $\Pi(q) = \int_0^q F(u)du$. Результаты – на рис. 6 и 7:

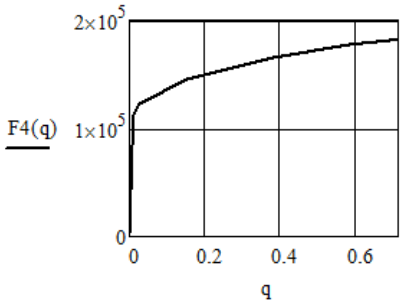


Рис. 6. Зависимость силы от прогиба

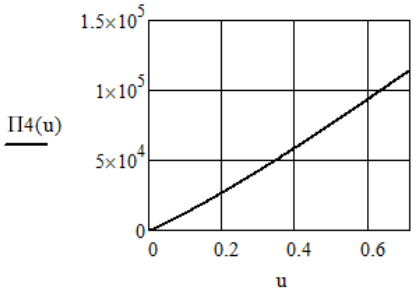


Рис. 7. Зависимость «потенциальной» энергии от прогиба

На графике энергии есть начальный квадратичный участок, но почти не виден. Заметим, что введение потенциальной энергии – не ошибка, поскольку рассматриваем только монотонное нагружение.

Далее представим, что сила F возникает от удара материальной точки массой m со скоростью v перпендикулярно балке. Уравнение Ньютона интегрируется как закон баланса энергии [9]:

$$m\ddot{q} = -F(q) \Rightarrow \frac{1}{2}m\dot{q}^2 + \Pi(q) = const \Rightarrow \underline{\frac{1}{2}mv^2 = \Pi(u)}. \qquad (8)$$

Последнее равенство определяет прогиб балки ограждения в месте удара u в зависимости от кинетической энергии тела. По предельному прогибу (u_*) находим $mv^2/2 = \Pi(u_*) = 1,143 \times 10^5$; для $m = 10^4$ (среднетоннажный грузовик) будет $v = 4,78$, т.е. $17,2$ *км/час*.

Проведены расчеты для некоторых размеров стальных профильных прямоугольных труб. Результаты представлены в таблице.

Таблица. Результаты расчетов барьеров с разным сечением

Размеры сечения в мм	Масса балки, кг	Максимальная нагрузка, кН	Минимальная скорость автомобиля при разрушении, км/ч
200×160×7	151	101	13,5
200×160×10	212	139	16,2
240×160×6	145	114	11,7
240×160×8	192	149	15,5
240×160×10	237	183	17,2

По таблице видно, что увеличение высоты сечения не всегда может быть оправдано. Также ясно, что максимальная нагрузка не может являться показателем работоспособности барьера.

В данной работе рассмотрена геометрически линейная постановка (прогибы малы). Но расчет для больших прогибов также возможен [3].

Представленные теория и методика расчета могут быть использованы при проектировании противотаранных шлагбаумов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянушко И.В., Карпов И.А. Расчет динамики наезда автомобиля на тросовое ограждение методом конечных элементов. Тез. докл. 71-ой науч.-метод. конференции МАДИ. – М.: Изд-во МАДИ, 2013. – С. 59-61.
2. Елисеев В.В. Механика деформируемого твердого тела. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 231 с.
3. Елисеев В.В., Зиновьева Т.В. Нелинейно-упругая деформация подводного трубопровода в процессе укладки // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т.5. – №1. – С. 70-78.
4. Елисеев В.В., Оборин Е.А. Деформация и пластическое разрушение балок дорожного ограждения при наезде автомобиля // Наука и техника в дорожной области. – 2014. – № 1. – С. 9 – 11.
5. Елисеев В.В., Оборин Е.А. Упругопластические деформации и разрушение балки дорожного ограждения при ударе. Тез. докл. 72-ой научно-метод. конф. МАДИ. 29 янв.-6 февр. 2014. С. 36-37.
6. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
7. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: «Машиностроение», 1975. – 399 с.
9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 590 с.

Vladimir V. Yeliseyev, Evgeniy A. Oborin

MODELING AND CALCULATION ANTI-RAM BARRIER

[1]St. Petersburg State Polytechnic University, Russia

Abstract

Elastic-plastic bending of barrier beam with a concentrated load from hit by the car is considered. Stress-strain diagram of the material is considered to be piecewise linear. For the box-section the connection between moment and curvature is defined. A nonlinear boundary value problem for a beam is solved by Mathcad. A connection with the mass deflection and vehicle speed is found from the energy balance equation.

Keywords: anti-ram barrier, impact of the car, beam, elastic-plastic bending, nonlinear boundary value problem, shooting method, the energy balance.

REFERENCES

[1] Demyanushko I.V., Karpov I.A. Raschet dinamiki naezda avtomobilya na trosovoe ograzhdenie metodom konechnyih elementov. Tez. dokl. 71-oy nauch.-metod. konferentsii MADI. – M.: Izd-vo MADI, 2013. – P. 59-61. (rus.)
[2] Eliseev V.V. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. – 231 p. (rus.)
[3] Eliseev V.V., Zinoveva T.V. Nelineyno-uprugaya deformatsiya podvodnogo truboprovoda v protsesse ukladki // Vyichislitelnaya mehanika sploshnyih sred. – 2012. – T.5. – №1. – P. 70-78.
[4] Eliseev V.V., Oborin E.A. Deformatsiya i plasticheskoe razrushenie ba¬lok dorozhnogo ograzhdeniya pri naezde avtomobilya // Nauka i teh¬nika v dorozhnoy oblasti. – 2014. – № 1. – P. 9 – 11. (rus.)
[5] Eliseev V.V., Oborin E.A. Uprugoplasticheskie deformatsii i razrushe¬nie balki dorozhnogo ograzhdeniya pri udare. Tez. dokl. 72-oy nauchno-metod. konf. MADI. 29 yanv.-6 fevr. 2014. S. 36-37.
[6] Kachanov L. M. Osnovyi teorii plastichnosti. – M.: Nauka, 1969. – 420 p. (rus.)
[7] Kiryanov D.V. Mathcad 14. – SPb.: BHV-Peterburg, 2007. – 704 p. (rus.)
[8] Malinin N.N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. – M.: «Mashinostroenie», 1975. – 399 p. (rus.)
[9] Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mehanicheskogo udara. – M.: Nauka, 1977. – 224 p. (rus.)
[10] Feodosev V.I. Soprotivlenie materialov. – M.: Izd-vo MGTU, 2004. – 590 p. (rus.)

УДК. 621.88.084; 539.3

М.М. Ермолаев[1], А.С. Иванов[2]

СОЕДИНЕНИЕ С НАТЯГОМ, НАГРУЖЕННОЕ ОСЕВОЙ И РАДИАЛЬНЫМИ СИЛАМИ, КРУТЯЩИМ И ИЗГИБАЮЩИМИ МОМЕНТАМИ

(Работа выполнена по гранту РФФИ 12-08-01-047а)

[1]Михаил Михайлович Ермолаев, аспирант
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (916)579-78-62, E-mail: mmermolaev@gmail.com

[2]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (917)501-50-88, E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

Аннотация

Предложена методика оценки распределения нагрузок и упругих перемещений в соединении с натягом, передающем осевые и радиальные силы, крутящие и изгибающие моменты. Учтены податливости деталей и контактного слоя между ними.

Ключевые слова: соединение с натягом, контактная податливость

При необходимости получения неподвижного соединения деталей типа вал-втулка широко применяют соединение с натягом. С натягом устанавливают зубчатые колеса, кольца подшипников, роторы встраиваемых электродвигателей, бандажи колес железнодорожного транспорта, инструмент и оснастку в металлорежущих станках и др. Соединения с натягом могут быть нагружены произвольной системой сил и моментов, действующих как по отдельности, так и совместно. Нагрузка в соединениях с натягом передается через контактный слой, образованный шероховатыми сопрягаемыми поверхностями вала и втулки.

Традиционный [1], [16] расчет соединения с натягом предполагает, что осевые силы и крутящие моменты передаются за счет равномерного распределения касательных напряжений в стыке, не превышающих трение покоя, а изгибающий момент – за счет перераспределения давления в стыке. При этом игнорируются деформации вала, втулки и контактного слоя, приводящие к неравномерному распределению нагрузки по поверхности контакта. Численные эксперименты, проведенные немецкими исследователями [18], показали, что изгибающий момент в соединении с

натягом передается в большей степени (порядка 70%) за счет перераспределения касательных напряжений в контактном слое, в меньшей (порядка 30%) – за счет перераспределения давления в контактном слое, что указывает на необходимость уточнения традиционного расчета.

Уточнению расчетов соединений с натягом, передающих крутящий момент и осевые силы, посвящены теоретические и экспериментальные исследования Е.С. Гречищева, А.А. Ильяшенко [3], З.М. Левиной, Д.Н. Решетова [14], В.И. Максака, Б.Ф. Советченко [15], Г.Б. Иосилевича [12], а также наши работы [8], [5]. Соединениям с натягом, нагруженным изгибающим моментом и радиальными силами, посвящены работы В.Л. Бидермана, В.М. Тимонина, М.В. Ярошенко [2], Г.Б. Иосилевича, Ю.В. Лукащук [13], Д.Н. Решетова, Г.А. Хачияна, Л.М. Лейках [17], а также наши работы [9].

Взаимосвязь между напряжением и смещениями в контактном слое нелинейна [14], поэтому уточненный расчет соединения с натягом должен учитывать действие всех возможных нагрузок (крутящего и изгибающих моментов, осевой и радиальных сил) одновременно (т.е. принцип суперпозиции не выполняется). Тем не менее, до настоящего времени модель, учитывающая одновременное действие и взаимное влияние различных нагрузок на распределение напряжений и смещений в контактном слое соединения с натягом, предложена не была. Данная работа представляет собой попытку синтеза подобной модели.

На основании работ Н.Б. Демкина [4], А.С. Ивановым и В.В. Измайловым [10], предложена формула, выражающая взаимосвязь между давлением p и сближением δ в контактном слое при повторных нагружениях, параметры которой известны конструктору на стадии проектирования:

$$\delta = Ra\ c_0 \varepsilon \sqrt{\frac{p}{E}}, \tag{1}$$

где c_0 – безразмерный параметр, зависящий от вида обработки поверхностей и направления следов обработки, который в случае параллельности следов обработки для контактирующих поверхностей, полученных торцовым точением или строганием равен 115, и во всех остальных случаях, т.е. для контактирующих поверхностей, полученных шлифованием или фрезерованием независимо от направления следов обработки и полученных торцовым точением или строганием в случае непараллельности следов обработки составляет 355; $\varepsilon = f(\Delta - W\max)$ – 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 $W_{\max}$ (коэффициент влияния масштаба для соединений размером порядка 50 мм можно принять равным единице, в остальных случаях следует

пользоваться зависимостями, указанными в [7]); $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$ – 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 коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей составляющим 0,3.

Касательные смещения δ_τ зависят от касательных напряжений τ в контактном слое линейно:

$$\delta_\tau = k_\tau \tau, \tag{2}$$

где k_τ – коэффициент касательной податливости контактного слоя, который можно считать равным коэффициенту нормальной податливости контактного слоя k, получаемый при линеаризации зависимости (1) в окрестности некоторого давления p:

$$k_\tau = \frac{Rac_0\varepsilon}{2\sqrt{Ep}}. \tag{3}$$

Рассмотрим соединение с натягом (рис. 1), образованное валом *1* с наружным диаметром d, внутренним диаметром d_1 и втулкой *2* с наружным диаметромd_2, нагруженное некоторой системой сил и моментов (в том числе распределенных по длине соединения). Нагрузка между валом и втулкой передается через контактный слой *3*, образованный шероховатыми поверхностями вала и втулки.

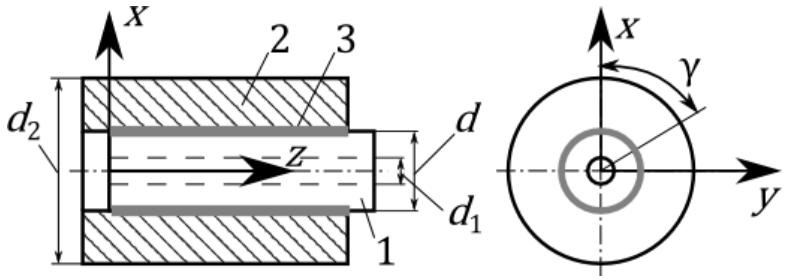


Рис. 1. Соединение с натягом

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. Концентрация напряжений на концах соединения из-за резкого изменения геометрии деталей не учитывается.

5. При изгибе вала и втулки их поперечные сечения сохраняют кольцевую форму, но поворачиваются в горизонтальной и вертикальной плоскостях.
6. Деформации соединения невелики и изменением мест приложения нагрузки можно пренебречь. В частности, не происходит потери устойчивости вала и втулки.
7. После запрессовки давление в каждой точке контактного слоя одинаково, предварительные касательные напряжения в контактном слое отсутствуют.
8. Изменения толщины вала и втулки, обусловленные действием растягивающих (сжимающих) сил, незначительны и не влияют на сближение в контактном слое.
9. Материал деталей – сталь, чугун, алюминиевые или медные сплавы, для которых давление в некоторой точке контактного слоя можно считать пропорциональным квадрату сближения в этой точке контактного слоя.

Давление p_0 связано с измеренным диаметральным натягом N выражением [11]:

$$N = p_0 d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right) + 2\delta_0, \quad (4)$$

где первое слагаемое – это формула Ляме, характеризующая диаметральные деформации абсолютно гладких поверхностей, а второе слагаемое – два радиальных сближения $\delta_0 = Ra\ c_0\ \varepsilon\ (E\ p_0)^{0,5}$ в контактном слое. В выражении обозначено: E_1, E_2 – модули упругости материалов вала и втулки; $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$ – приведенный модуль упругости; $Ra = (Ra_1^{\ 2} + Ra_2^{\ 2})^{0,5}$ – приведенная шероховатость; Ra_1, Ra_2 – средние арифметические высоты микронеровностей контактирующих поверхностей вала и втулки; $C_1 = \frac{1+(d_1/d)^2}{1-(d_1/d)^2} - \mu_1$, $C_2 = \frac{1+(d/d_2)^2}{1-(d/d_2)^2} + \mu_2$– коэффициенты вала и втулки; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов вала и втулки.

Введем систему координат: ось z направлена вдоль оси вала с началом на левом краю соединения; оси x, y выходят из центра масс сечения вала; оси x, y и z образуют правую тройку векторов. Для описания распределения нагрузок и смещений в контактном слое к этой системе добавим цилиндрическую систему координат (γ, z), в которой ось z совпадает с одноименной в системе координат xyz, а угол γ отсчитывается от вертикальной оси x в сторону положительного направления оси y.

Следующие факторы характеризуют внешние нагрузки, действующие на соединение, и известны к началу расчета:

$F_{x\Sigma}(z)$, $F_{y\Sigma}(z)$ – радиальные силы по осям x, y, воспринимаемые соединением в целом в z-м сечении, Н;

$F_{a\Sigma}(z)$ – осевая сила, воспринимаемая соединением в целом в z-м сечении, Н;

$M_{x\Sigma}(z)$, $M_{y\Sigma}(z)$ – изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях, воспринимаемые соединением в целом в z-м сечении, Н·мм;

$T_\Sigma(z)$ – крутящий момент, воспринимаемый соединением в целом в z-м сечении, Н·мм;
$f_{x1}(z)$, $f_{x2}(z)$, $f_{y1}(z)$, $f_{y2}(z)$ – распределенные радиальные силы, действующие на вал и втулк по осям x, y, Н/мм;
$f_{a1}(z)$, $f_{a2}(z)$ – распределенные осевые силы, действующие на вал и втулку, Н/мм;
$m_{x1}(z)$, $m_{x2}(z)$, $m_{y1}(z)$, $m_{y2}(z)$ – распределенные изгибающие моменты, действующие на вал и втулку в вертикальной и горизонтальной плоскостях, (Н·мм)/мм;
$t_1(z)$, $t_2(z)$ – распределенные крутящие моменты, действующие на вал и втулку, (Н·мм)/мм.

Следующие факторы характеризуют внутренние нагрузки на вал и подлежат определению в каждом z-м сечении:
$F_x(z)$, $F_y(z)$ – радиальные силы по осям x, y, воспринимаемые валом, Н;
$F_a(z)$ – осевая сила, воспринимаемая валом, Н;
$M_x(z)$, $M_y(z)$ – изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях, воспринимаемые валом, Н·мм;
$T(z)$ – крутящий момент, воспринимаемый валом, Н·мм;

Согласно формулам (1), (2), давления p, окружные τ_γ и осевые τ_z составляющие касательных смещений в контактном слое связаны со сближениями δ и касательными смещениями $\delta_{\tau\gamma}$, $\delta_{\tau z}$:

$$\begin{cases} p(z,\gamma) = \dfrac{E}{(Rac_0\varepsilon)^2} = \dfrac{1}{2k_{\tau 0}\delta_0}\,\delta(z,\gamma)^2; \\ \tau_\gamma(z,\gamma) = \dfrac{\sqrt{Ep(z,\gamma)}}{0{,}5Rac_0\varepsilon}\,\delta_{\tau\gamma}(z,\gamma) = \dfrac{1}{k_{\tau 0}\delta_0}\,\delta(z,\gamma)\;\delta_{\tau\gamma}(z,\gamma); \\ \tau_z(z,\gamma) = \dfrac{\sqrt{Ep(z,\gamma)}}{0{,}5Rac_0\varepsilon}\,\delta_{\tau z}(z,\gamma) = \dfrac{1}{k_{\tau 0}\delta_0}\,\delta(z,\gamma)\delta_{\tau z}(z,\gamma), \end{cases} \quad (5)$$

где $k_{\tau 0} = 0{,}5Rac_0\varepsilon/(Ep_0)^{0,5}$ – коэффициент касательной податливости контактного слоя при давлении p_0.

Сближение δ и касательные смещения $\delta_{\tau\gamma}$, $\delta_{\gamma z}$ в каждой точке контактного слоя зависят от деформаций вала и втулки (рис. 2).

Эти деформации удобно описать шестью функциями: $u(z) = u_1(z) + u_2(z)$ – прогиб вала относительно втулки по вертикальной оси x, состоящий из прогиба вследствие изгиба в вертикальной плоскости u_1 (рис. 2, *г*) и прогиба вследствие сдвига в вертикальной плоскости u_2 (рис. 2, *в*); $v(z) = v_1(z) + v_2(z)$ – прогиб вала относительно втулки по горизонтальной оси y, состоящий из прогиба вследствие изгиба в горизонтальной плоскости v_1 (рис. 2, *г*) и прогиба вследствие сдвига в горизонтальной плоскости v_2 (рис. 2, *в*); $\alpha(z)$ – угол поворота поперечных сечений вала относительно втулки вследствие изгиба в горизонтальной плоскости (рис. 2, *г*); $\beta(z)$ – угол поворота поперечных сечений вала относительно втулки вследствие изгиба в вертикальной плоскости (рис. 2, *г*); $\varphi(z)$ – угол закручивания вала

относительно втулки (рис. 2, *б*); $w(z)$ – растяжение вала относительно втулки на оси вала (рис. 2, *а*).

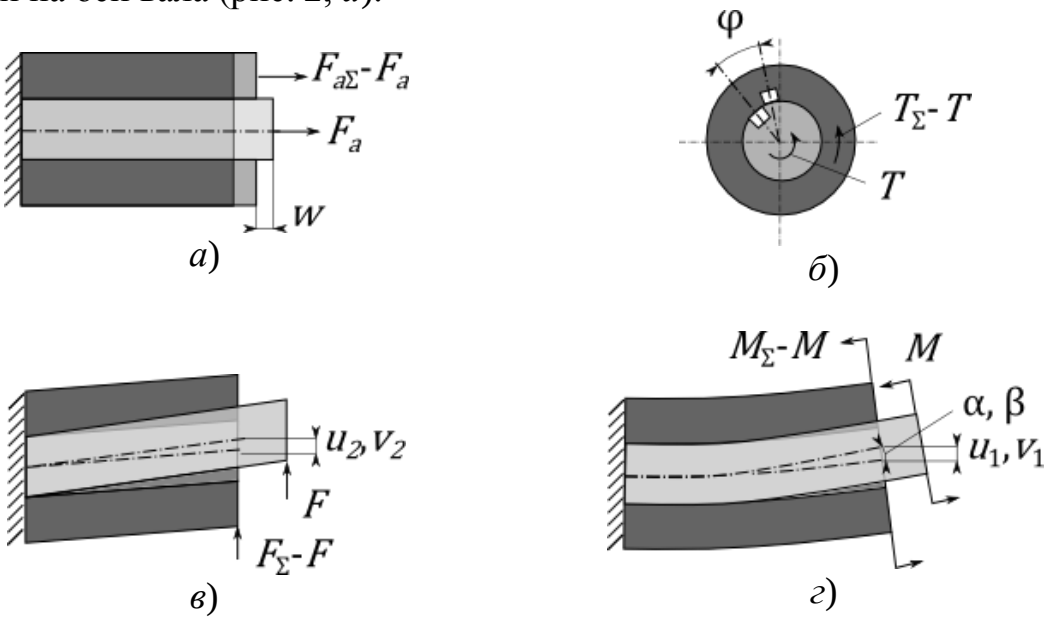


Рис. 2. Деформации соединения с натягом
а – растяжение (сжатие), *б* – кручение (шпоночные пазы показаны условно), *в* – сдвиг, *г* – изгиб

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:

$$\begin{cases} \delta(z,\gamma) = \delta_0 + u(z)\cos\gamma + v(z)\sin\gamma; \\ \delta_{\tau\gamma}(z,\gamma) = u(z)\sin\gamma - v(z)\cos\gamma - \dfrac{d}{2}\varphi(z); \\ \delta_{\tau z}(z,\gamma) = \dfrac{d}{2}(\beta(z)\cos\gamma + \alpha(z)\sin\gamma) - w(z). \end{cases} \quad (6)$$

Следующие коэффициенты характеризуют податливость контактного слоя и самих деталей:

$k_{\tau 0} = 0{,}5Rac_0\varepsilon/(Ep_0)^{0,5}$ – коэффициент податливости контактного слоя после запрессовки, мм^3/Н;

$k_{EA} = (E_1A_1)^{-1} + (E_2A_2)^{-1}$ – коэффициент, характеризующий суммарную податливость вала и втулки при растяжении-сжатии, Н$^{-1}$, где $A_1 = \pi(d^2 - d_1^2)/4$, $A_2 = \pi(d_2^2 - d^2)/4$ – площади сечений вала и втулки, мм^2;

$k_{GI} = (2G_1I_1)^{-1} + (2G_2I_2)^{-1}$ – коэффициент, характеризующий суммарную крутильную податливость вала и втулки, (Н·мм^2)$^{-1}$, где $I_1 = \pi(d^4 - d_1^2)/64$,

$I_2 = \pi(d_2^4 - d^2)/64$ – моменты инерции сечений вала и втулки, $G_1 = E_1/2(1 + \mu_1)$, $G_2 = E_2/2(1 + \mu_2)$ – модули упругости второго рода материалов вала и втулки;

$k_{EI} = (E_1 I_1)^{-1} + (E_2 I_2)^{-1}$ – коэффициент, характеризующий суммарную изгибную податливость вала и втулки, $(\text{Н}\cdot\text{мм}^2)^{-1}$;

$k_{GA} = K_1/(G_1 A_1) + K_2/(G_2 A_2)$ – коэффициент, учитывающий суммарную податливость вала и втулки при сдвиге от действия радиальных сил, Н^{-1}, где K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения касательных напряжений в поперечных сечениях вала и втулки; для их определения можно использовать известные зависимости [1].

Добавляя к уравнениям совместности перемещений (5), (6) уравнения равновесия кольцевого элемента вала и уравнения, связывающие деформации вала с нагрузками на валу, после ряда преобразований можно получить систему дифференциальных уравнений, решениями которой будет нахождение функций $u(z)$, $v(z)$, $w(z)$, $\alpha(z)$, $\beta(z)$, $\varphi(z)$ на некотором участке $0..L$, где функции $F_{x\Sigma}(z)$, $F_{y\Sigma}(z)$, $F_{a\Sigma}(z)$, $M_{x\Sigma}(z)$, $M_{y\Sigma}(z)$, $T(z)$ непрерывны:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^2\alpha}{\mathrm{d}z^2} - k_{EI}\left(\dfrac{1}{k_{GA}} + \dfrac{\pi d^3}{8k_{\tau 0}}\right)\alpha(z) + \dfrac{k_{EI}}{k_{GA}}\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z} + \dfrac{\pi d^2 k_{EI}}{4k_{\tau 0}\delta_0}v(z)w(z) = G_\alpha(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\beta}{\mathrm{d}z^2} - k_{EI}\left(\dfrac{1}{k_{GA}} + \dfrac{\pi d^3}{8k_{\tau 0}}\right)\beta(z) + \dfrac{k_{EI}}{k_{GA}}\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z} + \dfrac{\pi d^2 k_{EI}}{4k_{\tau 0}\delta_0}u(z)w(z) = G_\beta(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\pi d k_{GA}}{k_{\tau 0}}\left[u(z) - \dfrac{d}{4\delta_0}\varphi(z)\,v(z)\right] = G_u(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2v}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\pi d k_{GA}}{k_{\tau 0}}\left[v(z) + \dfrac{d}{4\delta_0}\varphi(z)\,u(z)\right] = G_v(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2w}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\pi d k_{EA}}{k_{\tau 0}}\left[w(z) - \dfrac{d}{4\delta_0}[v(z)\,\alpha(z) + u(z)\,\beta(z)]\right] = G_a(z); \\ \dfrac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}z^2} - \dfrac{\pi d^3 k_{GI}}{4k_{\tau 0}}\varphi(z) = G_\varphi(z), \end{cases} \qquad (7)$$

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:

$$\begin{cases} G_\alpha(z) = \dfrac{m_{x2}(z)}{E_2 I_2} - \dfrac{m_{x1}(z)}{E_1 I_1} + \left(\dfrac{1}{E_2 I_2} - \dfrac{k_{EI}}{k_{GA}} \dfrac{K_2}{G_2 A_2}\right) F_{y\Sigma}(z); \\ G_\beta(z) = \dfrac{m_{y2}(z)}{E_2 I_2} - \dfrac{m_{y1}(z)}{E_1 I_1} + \left(\dfrac{1}{E_2 I_2} - \dfrac{k_{EI}}{k_{GA}} \dfrac{K_2}{G_2 A_2}\right) F_{x\Sigma}(z); \\ G_u(z) = \dfrac{K_2}{G_2 A_2} f_{x2}(z) - \dfrac{K_1}{G_1 A_1} f_{x1}(z); \\ G_v(z) = \dfrac{K_2}{G_2 A_2} f_{y2}(z) - \dfrac{K_1}{G_1 A_1} f_{y1}(z); \\ G_a(z) = \dfrac{f_{a2}(z)}{E_2 A_2} - \dfrac{f_{a1}(z)}{E_1 A_1}; \\ G_\varphi(z) = \dfrac{t_2(z)}{2 G_2 I_2} - \dfrac{t_1(z)}{2 G_1 I_1}. \end{cases} \quad (8)$$

Граничные условия системы (7) можно получить в точках z_i, где известны нагрузки на валу M_x, M_y, F_x, F_y, T, F_a (на концах соединения):

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z}(z_i) = k_{EI} M_x(z_i) - \dfrac{M_{x\Sigma}(z_i)}{E_2 I_2}; \\ \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}z}(z_i) = k_{EI} M_y(z_i) - \dfrac{M_{y\Sigma}(z_i)}{E_2 I_2}; \\ \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z}(z_i) - \beta(z_i) = k_{GA} F_x(z_i) - \dfrac{K_2}{G_2 A_2} F_{x\Sigma}(z_i); \\ \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}(z_i) - \alpha(z_i) = k_{GA} F_y(z_i) - \dfrac{K_2}{G_2 A_2} F_{y\Sigma}(z_i); \\ \dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}z}(z_i) = k_{EA} F_a(z_i) - \dfrac{F_{a\Sigma}(z_i)}{E_2 A_2}; \\ \dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}z}(z_i) = k_{GI} T(z_i) - \dfrac{T_\Sigma(z_i)}{2 G_2 I_2}, \end{cases} \quad (9)$$

Система уравнений (7) справедлива на некотором участке соединения при условии непрерывности функций $M_{x\Sigma}(z)$, $M_{y\Sigma}(z)$, $F_{x\Sigma}(z)$, $F_{y\Sigma}(z)$, $T_\Sigma(z)$, $F_{a\Sigma}(z)$ на этом участке. Это условие не выполняется в местах приложения сосредоточенных внешних нагрузок. Если сосредоточенные нагрузки приложены не на концах соединения, то соединение следует разделить на участки z_0-z_1, z_1-z_2, .., z_{n-1}-z_n и записать систему уравнений (7) для каждого участка. При этом к граничным условиям (9) добавляются условия непрерывности: прогибов u, v; углов поворота сечений α, β; угла закручивания φ; растяжения w.

Шестое уравнений в системе (7) зависит только от угла поворота φ; его можно решить аналитически и исключить из общей системы. Оставшуюся систему из пяти дифференциальных уравнений можно решить численно.

В результате решения системы дифференциальных уравнений (7), (8) с граничными условиями (9) определяются функции перемещений вала относительно втулки: $u(z)$, $v(z)$, $\alpha(z)$, $\beta(z)$, $\varphi(z)$, $w(z)$. После этого можно определить распределения нагрузок на валу.

Радиальные силы на валу передаются за счет перераспределения давления и окружных составляющих касательных напряжений в контактном слое. Радиальная сила в z-м сечении составляет:

$$F_x(z) = F_{xe}(z) + F_{xp}(z) + F_{x\gamma}(z), \tag{10}$$

где F_{xe} – внешняя радиальная сила:

$$F_{xe}(z) = F_x(0) - \int_0^z f_{x1}(z_1)dz_1, \tag{11}$$

$F_{xp}(z)$ – радиальная сила, создаваемая перераспределением давления в контактном слое:

$$F_{xp}(z) = \frac{\pi d}{2k_{\tau 0}} \int_0^z u(z_1)dz_1, \tag{12}$$

$F_{x\gamma}(z)$ – радиальная сила, создаваемая окружными составляющими касательных напряжений в контактном слое:

$$F_{x\gamma}(z) = \frac{\pi d}{2k_{\tau 0}} \int_0^z u(z_1)dz_1 - \frac{\pi d^2}{8k_{\tau 0}\delta_0} \int_0^z \varphi(z_1)v(z_1)dz_1. \tag{13}$$

Изгибающие моменты на валу передаются за счет перераспределения давления, окружных и осевых составляющих касательных напряжений в контактном слое. Изгибающий момент в z-м сечении составляет:

$$M_y(z) = M_{ye}(z) + M_{yp}(z) + M_{y\gamma}(z) + M_{yz}(z), \tag{14}$$

где $M_{ye}(z)$ – изгибающий момент, создаваемый внешними нагрузками:

$$M_{ye}(z) = M_y(0) - \int_0^z m_{1y}(z_1)dz_1 + \int_0^z F_{xe}(z_1)dz_1, \tag{15}$$

$M_{yp}(z)$ – изгибающий момент, создаваемый перераспределением давления в контактном слое:

$$M_{yp}(z) = -\int_0^z F_{xp}(z_1)dz_1, \tag{16}$$

$M_{y\gamma}(z)$ – изгибающий момент, создаваемый окружными составляющими касательных напряжений в контактном слое:

$$M_{y\gamma}(z) = -\int_0^z F_{x\gamma}(z_1)dz_1, \tag{17}$$

$M_{xz}(z)$, $M_{yz}(z)$ –изгибающие моменты, создаваемые осевыми составляющими касательных напряжений в контактном слое:

$$M_{yz}(z) = \frac{\pi d^3}{8k_{\tau 0}} \int_0^z \beta(z_1)dz_1 - \frac{\pi d^2}{4k_{\tau 0}\delta_0} \int_0^z u(z_1)w(z_1)dz_1. \tag{18}$$

Анализ выражений (15)..(18) показывает, что перераспределением давления воспринимается от 15 до 30% изгибающего момента, а остальная нагрузка воспринимается окружными и осевыми составляющими касательных напряжений в контактном слое, что подтверждает результаты исследований [18].

Выводы:

1. Анализ деформированного состояния соединения с натягом можно производить следующим образом: соединение разделяется на участки так, чтобы сосредоточенные нагрузки были приложены на концах участков. Для каждого участка записывается система уравнений (7), (8). В точках, где известна доля нагрузки, воспринимаемой валом, (в начале и на конце соединения) составляются граничные условия вида (9). Система уравнений решается численно или, в некоторых частных случаях, аналитически. При этом определяются: функции прогиба вала относительно втулки $u(z)$, $v(z)$; функции поворота сечений вала относительно втулки $\alpha(z)$, $\beta(z)$; функция закручивания вала относительно втулки $\varphi(z)$; функция растяжения вала относительно втулки $w(z)$.
2. Распределение нагрузок на валу может быть определено по формулам выражений (10)..(18).
3. Распределение сближений и касательных смещений в контактном слое может быть определено по формулам (6).
4. Распределение давлений и касательных напряжений в контактном слое может быть определено по формулам (5).
5. При передаче соединением с натягом изгибающего момента большая доля нагрузки воспринимается окружными и осевыми составляющими касательных напряжений в контактном слое (70...85%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Биргер И.А., Мавлютов Р.Р.* Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
2. *Бидерман В.Л., Тимонин В.М., Ярошенко М.В.* Остаточные деформации в прессовых соединениях при поперечном изгибе // Вестник машиностроения. 1981, № 10. – С. 18 − 20.
3. *Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А.* Соединения с натягом. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
4. *Демкин Н.Б.* Контактирование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
5. *Иванов А.С.* Нормальная, угловая и касательная контактные жесткости плоского стыка // Вестник машиностроения, 2007, № 7. – С. 34 – 37.
6. *Иванов А.С., Воронцов А.В., Терехин С.А.* Расчет соединения с натягом на несдвигаемость с учетом контактной жесткости сопрягаемых поверхностей // Вестник машиностроения, 2003, № 2. – С. 19 – 22.
7. *Иванов А.С., Ермолаев М.М.* Влияние волнистости шероховатых поверхностей на их контактную жесткость // Известия ВУЗов: Машиностроение, 2012. Спец. выпуск. – С. 8 − 16.
8. *Иванов А.С., Ермолаев М.М.* Локальное проскальзывание в соединении с натягом при нагружении крутящим моментом // Вестник машиностроения. 2010, № 6. – С. 46 − 50.

9. *Иванов А.С., Ермолаев М.М.* Работа соединения с натягом при передаче соединением изгибающего момента // Вестник машиностроения, 2009, № 5. –
10. С. 45 − 48.
11. *Иванов А.С., Измайлов В.В.* Расчет контактной деформации при конструировании машин // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2006, № 8. – С. 3 – 10.
12. *Иванов А.С., Попов Б.А.* Расчет соединения с натягом с учетом контактной жесткости сопрягаемых поверхностей // Вестник машиностроения, 2005, № 4. – С. 31 – 36.
13. *Иосилевич Г. Б.* Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
14. *Иосилевич Г.Б., Лукащук Ю.А.* Влияние некоторых конструктивных факторов на распределение напряжений в соединениях с натягом // Вестник машиностроения, 1980, № 4. – С. 22 − 23.
15. *Левина З.М., Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
16. *Максак В. И., Советченко Б.Ф.* Расчет смещений в соединениях с натягом при нагружении их крутящим моментом // Машиноведение, 1975, № 5. – С. 63 − 68.
17. *Решетов Д.Н.* Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
18. *Решетов Д.Н., Хачиян Г.А., Лейках Л.М.* Скорость сползания в циркуляционно-нагруженных соединениях с натягом // Известия ВУЗов: Машиностроение, 1980, № 12. – С. 53 − 57.
19. *Häusler N.* Zum Mechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpfverbindungen // Konstruktion, 1976, 28, N 3. – P. 103 − 108.

M.M. Ermolaev, A.S. Ivanov

TIGHT JOINT, LOADED BY AXIAL AND RADIAL FORCES, TORQUE AND BLENDING MOMENS

Bauman Moscow State Technical University

Abstract

The method of calculation of load and deflection distribution in tight joint, loaded by axial and radial forces, torque and blending moments has been proposed. Pliability of parts and contact layer has been obtained.

Keywords: tight joint, pliability of contact layer.

REFERENCES

[1] Birger I.A., Mavljutov R.R. Soprotivlenie materialov. – M.: Nauka, 1986. – 560 p.

[2] Biderman V.L., Timonin V.M., Jaroshenko M.V. Ostatochnye deformacii v pressovyh soedinenijah pri poperechnom izgibe // Vestnik mashinostroenija. 1981, N10. – P. 18 − 20.
[3] Grechishhev E.S., Il'jashenko A.A. Soedinenija s natjagom. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 247 p.
[4] Demkin N.B. Kontaktirovanie sherohovatyh poverhnostej. – M.: Nauka, 1970. – 227 p.
[5] Ivanov A.S. Normal'naja, uglovaja i kasatel'naja kontaktnye zhestkosti ploskogo styka // Vestnik mashinostroenija, 2007, N7. – P. 34 – 37.
[6] Ivanov A.S., Voroncov A.V., Terehin S.A. Raschet soedinenija s natjagom na nesdvigaemost' s uchetom kontaktnoj zhestkosti soprjagaemyh poverhnostej // Vestnik mashinostroenija, 2003, N2. – P. 19 – 22.
[7] Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Vlijanie volnistosti sherohovatyh poverhnostej na ih kontaktnuju zhestkost' // Izvestija VUZov: Mashinostroenie, 2012. Spec. vypusk. – P. 8 − 16.
[8] Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Lokal'noe proskal'zyvanie v soedinenii s natjagom pri nagruzhenii krutjashhim momentom // Vestnik mashinostroenija. 2010, N6. – P. 46 − 50.
[9] Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Rabota soedinenija s natjagom pri peredache soedineniem izgibajushhego momenta // Vestnik mashinostroenija, 2009, N5. – P. 45 − 48.
[10] Ivanov A.S., Izmajlov V.V. Raschet kontaktnoj deformacii pri konstruirovanii mashin // Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah, 2006, N8. – P. 3 – 10.
[11] Ivanov A.S., Popov B.A. Raschet soedinenija s natjagom s uchetom kontaktnoj zhestkosti soprjagaemyh poverhnostej // Vestnik mashinostroenija, 2005, N4. – P. 31 – 36.
[12] Iosilevich G. B. Koncentracija naprjazhenij i deformacij v detaljah mashin. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 224 p.
[13] Iosilevich G.B., Lukashhuk Ju.A. Vlijanie nekotoryh konstruktivnyh faktorov na raspredelenie naprjazhenij v soedinenijah s natjagom // Vestnik mashinostroenija, 1980, N4. – P. 22 − 23.
[14] Levina Z.M., Reshetov D.N. Kontaktnaja zhestkost' mashin. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 264 p.
[15] Maksak V. I., Sovetchenko B.F. Raschet smeshhenij v soedinenijah s natjagom pri nagruzhenii ih krutjashhim momentom // Mashinovedenie, 1975, N5. – P. 63 − 68.
[16] Reshetov D.N. Detali mashin. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 496 p.
[17] Reshetov D.N., Hachijan G.A., Lejkah L.M. Skorost' spolzanija v cirkuljacionno-nagruzhennyh soedinenijah s natjagom // Izvestija VUZov: Mashinostroenie, 1980, N12. – P. 53 − 57.
[18] *Häusler N.* Zum Mechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpfverbindungen // Konstruktion, 1976, 28, N 3. – P. 103 − 108.

УДК 620.194.4

В.А. Жуков

КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Владимир Андреевич Жуков, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия, Санкт- Петербург
Тел.(812)552-6429, E-mail: v.zhukoff2011@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрена взаимосвязь электрохимических параметров и сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением (SCC – Stress corrosion cracking) титановых сплавов в искусственной морской воде. Установлено, что имеет место соответствие между снижением сопротивления SCC малоцикловому разрушению и изменением потенциала выделения кислорода.

Ключевые слова: титановый сплав, коррозионное растрескивание под напряжением, потенциал выделения кислорода, температурный коэффициент термо-ЭДС.

Несмотря на относительно высокую стоимость материала и технологии изготовления конструкций, область применения титановых сплавов в различных отраслях машиностроения продолжает расширяться [1]. Активно ведутся исследования и опытные разработки с целью использования этих сплавов в качестве материала трубопроводов при морской добычи нефти и газа [2], а также конструктивных элементов нагруженных частей морских платформ.

Одним из существенных препятствий для использования средне- и высокопрочных сплавов на основе титана является резкое снижение сопротивления разрушению в водных растворах хлоридов при наличии острых концентраторов и трещин, впервые выявленное при испытании крупногабаритных образцов для определения критического коэффициента интенсивности напряжений [3]. SCC обнаруживается во многих отраслях промышленности: авиационно-космической техники, ядерных реакторов, коммунальных услуг и трубопроводов [4]. Влияние различных факторов коррозионного растрескивания под напряжением обычно оценивают по изменению K_{ISCC} при испытании плоских образцов с трещиной усталости, толщина W которых соответствующих условию $W \geq 2{,}5(K_1^2/\sigma_{\mathrm{T}}^2)$[5]. Образцы с усталостной трещиной испытываются также при активном растяже-

нии с малыми скоростями перемещения захватов испытательной машины, например от 0.02 мм/мин до 0.005мм/мин [6]. Реже проводятся испытания образцов при малоцикловом нагружении. Наибольший эффект SCC титановых сплавов наблюдается при частотах нагружения порядка циклов в минуту и уменьшается при более низких частотах, т.е. при увеличении длительности испытания [7].

Несмотря на значительный интерес к проблеме SCC, задача оценки чувствительности материала заготовок и сварных элементов конструкций из титановых сплавов к действию коррозионной среды по-прежнему актуальна. Это объясняется тем, что даже при лабораторных исследованиях методами рентгеноструктурного анализа не удаётся обнаружить участки выделений в титановых сплавах [8], склонных после старения к коррозионной хрупкости (corrosion embrittlement) в водных растворах хлоридов. Наиболее чувствительными методами оценки структурных превращений в процесс старения сплавов являются метод электросопротивления и метод температурного коэффициента ε_t термо-ЭДС. Однако эти методы практически непригодны, если необходимо ценить структурное состояние по завершению технологического процесса или в период эксплуатации.

В группу параметров, по изменению которых можно судить о сопротивлении титановых сплавов «быстрому» разрушению при коррозионно-механическом воздействии, естественно включить параметры электрохимического взаимодействия металла с раствором. В данной работе представлены результаты оценки соответствия электрохимического потенциала титановых сплавов в водном растворе и эффекта SCC этих материалов.

На рис. 1, а представлены зависимости отношения разрушающей нагрузки F при статическом изгибе плоских образцов β-сплава Ti-10V-11Cr-3Al (B-120VCA) с усталостной трещиной и с острым надрезом в долях от нагрузки F_f, разрушающей образцы при кратковременном статическом нагружении на воздухе. На рис. 1, б – зависимости отношения максимальной нагрузки при коэффициенте асимметрии $R \approx 0$ малоцикловой усталости круглых образцов этого же сплава с острым надрезом и частоте 1 цикл в минуту также в долях от нагрузки F_f, разрушающей образцы при кратковременном статическом нагружении на воздухе. Эффект негативного влияния 3,5%-ного водного раствора NaCl при малоцикловой усталости образцов с острым оказался больше, чем при статическом испытании образцов с трещиной. Опираясь на эти и аналогичные данные по ряду других титановых сплавов, авторы работы [9] предложили проводить испытания на малоцикловую выносливость в коррозионной среде небольших образцов кругового сечения с острым надрезом. Это позволило существенно сократить затраты на проведение испытаний по сравнению с испытаниями образцов с трещиной.

Сопротивление малоцикловому разрушению при испытании образцов с острым надрезом оценивалось нами по расчётному значению деформа-

ции $\varepsilon_{f\sigma}$ субмикроскопического объёма, находящегося в вершине трещины на расстоянии, равном шагу трещины ν малоциклового разрушения в последнем (перед разрушением этого объема) цикле деформирования [10]:

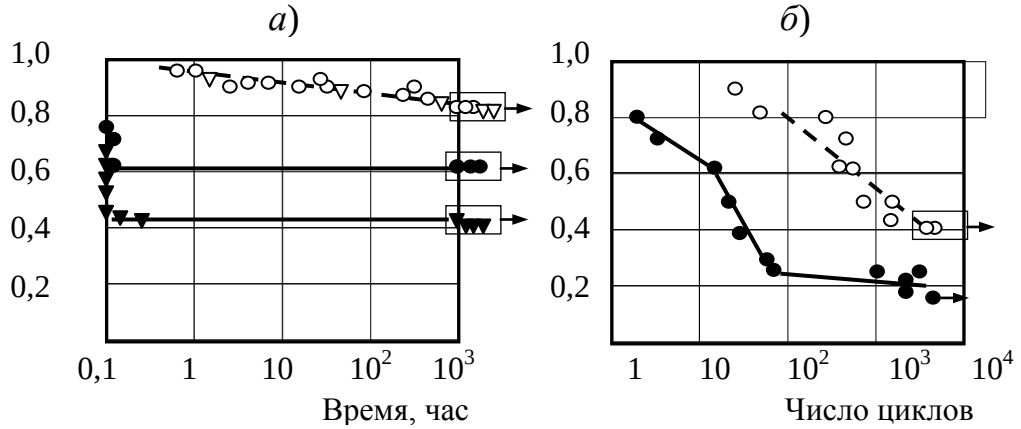


Рис. 1. Эффект воздействия 3,5%-ного водного раствора NaCl на сопротивление разрушению при длительной статической нагрузке (*а*) и при малоцикловой нагрузке (*б*) сплава Ti-10V-11Cr-3Al (В-120VCA):

○ , ▽ – испытания на воздухе; ●, ▼ – испытания в растворе;
○, ● – образцы с острым надрезом; ▽ , ▼ – образцы с усталостной трещиной

$$\varepsilon_{f\sigma} = \frac{K}{E\sqrt{6\pi\nu}}$$

где K – размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при отнулевом цикле малоцикловом нагружения;

E – модуль нормальной упругости материала.

В соответствии с условиями подобия испытания материалов с различными значениями предела текучести $\sigma_т$ проводили при условии $K/\sigma_т$ = = idem, или $r_т^{1|2}$ = idem, где $r_т$ – радиус пластической зоны в вершине макротрещины по Ирвину при данном значении КИН. Количество образцов в серии от 4 до 10. Потенциалы выделения кислорода и водорода определяли на полярографе с автоматическом изменении напряжения от – 0,9*в* до + 0,9*в*; поверхность образца, находящегося в растворе под напряжением – 0,9*в*, повреждали стеклянным скребком.

На рис. 2 представлены зависимости $\varepsilon_{f\sigma}$ сплавов титана при испытании в растворе (при $r_т$ = 0,055 мм). Все сплавы подвергались горячей обработке давлением в β - области, после охлаждения до комнатной температуры производилось старение при 773 К. Пунктирная линия на рис. 2 соответствует нижней границе $\varepsilon_{f\sigma}$ = 0,07 доверительного интервала при p = 0,05 значений $\varepsilon_{f\sigma}$ сплава ПТ3В при испытании на воздухе.

В состоянии после горячей обработки давлением с охлаждением на воздухе технически чистый титан и сплав ПТ3В с 4,5% Al, а также α+β - сплавы с содержанием 6% Al после закалки из β - области практически не чувствительны к действию коррозионной среды. Последующее после закалки старение сплавов с повышенным содержанием алюминия приводит к существенному снижению сопротивления коррозионно-механическому разрушению.

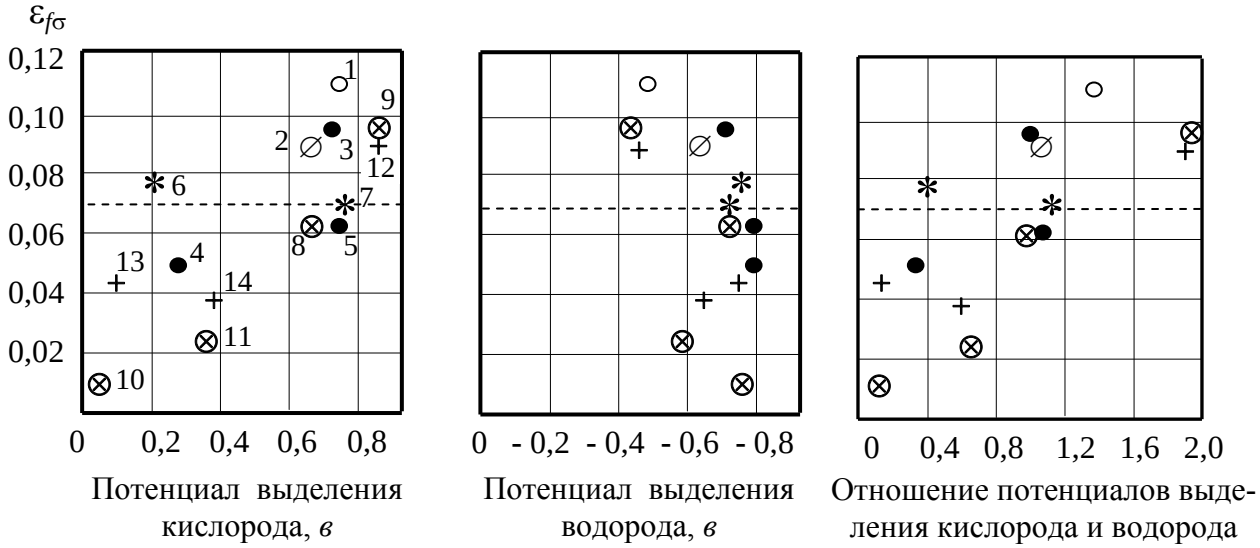


Рис. 2. Зависимость $\varepsilon_{f\sigma}$ в водном растворе NaCl титановых сплавов:
○ – ВТ1; ∅ – ПТ3В; ● – ВТ6; ✻ – В-120 VCA; ⊗ – ВТ6; + – ВТ20;
1, 2, 5, 6, 7, 8 – охлаждение на воздухе; 4 – охлаждение с печью; 3, 9, 12 – закалка,
10 – охлаждение на воздухе + старение; 11, 13, 14 – закалка + старение.

В целом можно отметить, что для одного и того же материала, например сплавов ВТ6 (т. 8 -11) и ВТ20 (т.12-14) имеет место соответствие между величиной $\varepsilon_{f\sigma}$ и значением потенциала выделения кислорода. Для α- и α+β - сплавов, значение $\varepsilon_{f\sigma}$ которых находится в области выше 0,07 нижней границы интервала, потенциал выделения кислорода не менее 0,65*в*, а отношение потенциалов кислорода и водорода – не менее 1,1. Потенциал выделения кислорода менее 0,4*в* свидетельствует о снижении пластичности α + β - сплавов в коррозионной среде. Однако для β - сплава подобное соответствие не обнаружено.

Такое соответствие между потенциалом выделения кислорода и склонностью к коррозионно-механическому разрушению позволяет сделать вывод о существенном влиянии структурного состояния на способность титановых сплавов к восстановлению разрушаемого при деформировании защитного барьерного слоя. На рис. 3 показано изменение электрохимического потенциала в 3,5%-ом водном растворе NaCl сплава ВТ-1 и сплава ВТ6. Измерения проводились на образцах, которые после их разрушения на разрывной машине оставались в том же контейнере с раство-

ром. Скорость восстановления барьерного слоя сплава с меньшим значением потенциала выделения кислорода существенно меньше.

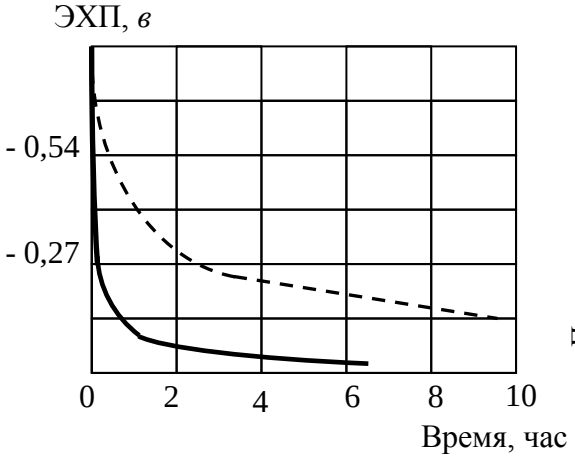


Рис. 3. Изменение ЭХП после разрушения образцов:
— ВТ-1 и - - - ВТ6 (старение)

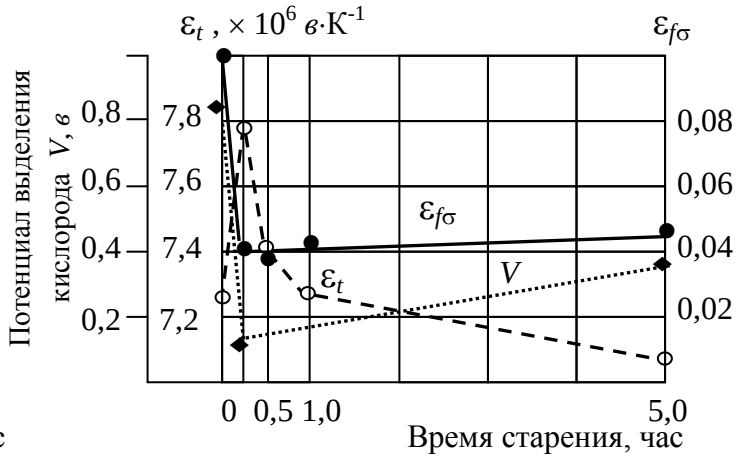


Рис. 4. Зависимость коэффициента ε_t, потенциала выделения кислорода V и $\varepsilon_{f\sigma}$ от продолжительности старения сплава ВТ20

Для оценки соответствия между параметрами электрохимического взаимодействия «металл – раствор» и склонностью титановых сплавов к коррозионно-механическому разрушению в результате старения был использован метод сравнения различных структурных состояний при старении по изменению температурного коэффициента ε_t термо-ЭДС, разработанный в ЦКТИ им. И.И. Ползунова. Результаты исследования представлены на рис. 3. Зависимость температурного коэффициента ε_t термо-ЭДС при старении сплава ВТ20 подобна зависимости удельного электросопротивления при старении дюралюминия и других сплавов. Первый участок этой зависимости соответствует образованию локальных неоднородностей на структурных несовершенствах кристаллической решётки. Именно на этом этапе старения обнаруживается резкое снижение сопротивления разрушению титановых сплавов и потенциала выделения кислорода. Уменьшение потенциала выделения кислорода означает, что способность адсорбировать кислород из раствора, следовательно, формировать барьерный слой материалом, повреждаемым в процессе деформирования, снижается.

Выводы

1. Снижению сопротивления псевдо α- и α + β - сплавов титана разрушению в коррозионной среде при малоцикловом нагружении имеет место при одновременном существенном уменьшении потенциала выделения кислорода.

2. На этапе старения, вызывающем уменьшение сопротивления сплавов титана коррозионно-механическому разрушению, имеет место повы-

шение температурного коэффициента ε_t термо-ЭДС при одновременном снижении потенциала выделения кислорода.

3. Подтверждается возможность использования косвенных методов выявления непосредственно на конструкции таких состояний псевдо α- и $\alpha + \beta$ - сплавов титана, для которых характерна пониженная коррозионно-механическая прочность в водных растворах хлоридов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Направление совершенствования быстроходных паровых турбин АЭС/ Г.А. Филиппов [и др.] // Энергетические машины и установки. – 2008. – №3. – С.3-12.
2. Титановые сплавы для морской техники/ И.В. Горынин [и др.]. – СПб.: Политехника, 2007. – 387 с.
3. B.F. Brown. Material Research and Standards, 1966. – Vol. 6. – P. 3-129.
4. V.S. Raja. Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice. India: Bombay, 2011. – 816 p.
5. W. Dietzel. Fracture mechanics approach to stress corrosion cracking. Anales de mecanica de la fractura. – 2001. – Vol.18
6. S. Barella, C. Mapelli, R. Venturini. Investigation about the Stress Corrosion Cracking of Ti-6Al-4V . [Электронный ресурс] http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf
7. Dawson D.B., Pelloux R.M. Corrosion Fatigue Crack Growth of Titanium Alloys and Aqueous Environments //Met.Trans. – 1974. – Vol.5. – №3. – P.723-731.
8. Цвиккер У. Титан и его сплавы / Пер. с нем.; под ред. О.П. Елютина и С.Г.Глазунова. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
9. Термическая стабильность псевдо-α-сплавов титана и методы её оценки/ В.А. Жуков [и др.]// Металловедение и термическая обработка металлов. – 1981. –№12. – С. 37-39.
10. Жуков В.А. Квантовомеханический подход к анализу явлений при деформировании и разрушении металлов// Металлы. – 1994. – № 6. – С. 93-97.

V.A. Zhukov

STRESS CORRUSION CRACKING AND ELECTROCHEMICAL POTENTIAL OF TITANIUM ALLOYS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In the work the mutual effect of the electrochemical parameters and the Stress corrosion cracking of titanium alloys at the synthetic sea water is considered. It is determination that there is accordance between the oxygen secretion potential and reduction of SCC - resistivity of $\alpha + \beta$ - alloys.

Key words: titanium alloy, Stress corrosion cracking, oxygen secretion potential, thermal coefficient of thermoelectricity.

REFERENCES

[1] Napravlenie sovershenstvovanija bystrohodnyh parovyh turbin AJeS/ G.A. Filippov [i dr.] // Jenergeticheskie mashiny i ustanovki. – 2008. – №3. – P.3-12. (rus.)
[2] Titanovye splavy dlja morskoj tehniki/ I.V. Gorynin [i dr.]. – SPb.: Politehnika, 2007. – 387 p. (rus.)
[3] B.F. Brown. Material Research and Standards, 1966. – Vol. 6 . – P. 3-129.
[4] V.S. Raja. Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice. India: Bombay, 2011. – 816 p.
[5] W. Dietzel. Fracture mechanics approach to stress corrosion cracking. Anales de mecanica de la fractura. – 2001. – Vol.18
[6] S. Barella, C. Mapelli, R. Venturini. Investigation about the Stress Corrosion Cracking of Ti-6Al-4V . [Jelektronnyj resurs] http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf
[7] 7. Dawson D.B., Pelloux R.M. Corrosion Fatigue Crack Growth of Titanium Alloys and Aqueous Environments //Met.Trans. – 1974. – Vol.5. – №3. – P.723-731.
[8] Cvikker U. Titan i ego splavy / Per. s nem.; pod red. O.P. Eljutina i S.G.Glazunova. – M.: Metallurgija, 1979. – 512 p. (rus.)
[9] Termicheskaja stabil'nost' psevdo-□-splavov titana i metody ejo ocenki/ V.A. Zhukov [i dr.]// Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. – 1981. –№12. – P. 37-39. (rus.)
[10] Zhukov V.A. Kvantovomehanicheskij podhod k analizu javlenij pri deformirovanii i razrushenii metallov// Metally. – 1994. – №6. – P. 93-97. (rus.)

УДК.621.81

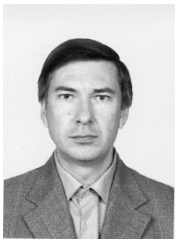
А.С. Иванов[1], М.М. Ермолаев[2], С.В. Муркин[3]

К РАСЧЁТУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СОВРЕМЕННЫХ МОТОР-РЕДУКТОРОВ

(Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки по проекту 1403)

[1]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел: (917)501-50-88, E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[2]Михаил Михайлович Ермолаев, аспирант
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
E-mail: mmermolaev@gmail.com



[3]Сергей Владимирович Муркин, ст. научн. сотр.
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
E-mail: svmurkin@mail.ru

Аннотация

В работе проанализированы конструктивные исполнения современных зарубежных редукторов и мотор-редукторов. На основе этого анализа предложены некоторые расчеты и способы повышения технического уровня отечественных мотор-редукторов.

Ключевые слова: мотор-редуктор, уменьшение массы.

В настоящее время конструирование мотор-редукторов у нас в стране производится по справочникам, учебным пособиям и атласам, составленным на основе анализа конструктивных исполнений и работоспособности серийно изготавливаемых в стране мотор-редукторов разработки 1965 − 1985 годов. Одним из основных критериев технического уровня мотор-редуктора служит [7] относительная масса $\gamma_{отн} = m/T$, где m – масса; T – вращающий момент на выходном валу. Нами произведено сопоставление по техническому уровню редукторов, предназначенных для встраивания в мотор-редукторы. Результаты этого сопоставления редукторов отечественного и зарубежного изготовления (рассматриваемое исполнение – редуктор на лапах) сведены в таблицу. Из анализа таблицы

следует: 1) относительная масса зарубежных редукторов в среднем в два раза меньше редукторов отечественного производства; 2) планетарно-цевочные редукторы имеют меньшую относительную массу по сравнению с большинством остальных видов.

Таблица

Достигнутые значения технического уровня редуктора

Тип	Типоразмеры отечественного редуктора	$\gamma_{отн}$, кг/(Н·м)	Страна-изготовитель, фирма, типоразмеры зарубежного редуктора	$\gamma_{отн}$, кг/(Н·м)
Червячный	Ч-80÷Ч-160	0,071÷ 0,106	Великобритания, Challenge, SMRV 030 ÷ SMRV 150	0,027÷ 0,050
Зубчатый цилиндрический двухступенчатый соосный	Ц-63÷Ц-100	0,065÷ 0,120	Великобритания и Италия, Renold и Inovari, P202 ÷ P602	0,031÷ 0,038* 0,046÷ 0,049**
Волновой	МВз-80÷ МВз-160	0,053÷ 0,066	Германия, Harmonic Drive AG, CSF-5-14-05-1U-CC÷ CSF-5-14-14-1U-CC	0,012÷ 0,019
Планетарно-цевочный	ПЦР 47÷ПЦР 400	До 0,02	Япония, Sumitomo Fine Cyclo FC-D	0,023÷0,0116

Материал корпуса: * – алюминий, ** – чугун

Из анализа таблицы следует, что, чтобы разрабатывать мотор-редукторы меньшей относительной массы, конкурентоспособные на мировом рынке, необходимо осваивать конструирование новых видов редукторов, а также существующие в стране методы расчета и конструирования дополнить новыми, основанными на учете результатов анализа методов проектирования современных зарубежных мотор-редукторов.

Ниже приведены результаты наших исследований в указанном направлении:

1. Целесообразно осваивать методы расчета, конструирования и изготовления планетарно-цевочных мотор-редукторов, имеющих меньшую относительную массу по сравнению с другими типами.

Кинематический анализ планетарно-цевочных редукторов приведен в работе [13]. Планетарно-цевочный редуктор *k-h-v* изображен на рис. 1. Он работает следующим образом. Вращение входного эксцентрикового вала преобразуется в плоскопараллельное движение сателлитов, находящихся во взаимодействии с пальцами, при этом сателлиты,

обкатываясь своими эпициклоидальными зубьями по зубьям-роликам корпуса, сообщают вращательное движение выходному фланцу. Сателлит имеет число зубьев на единицу меньшее, чем число зубьев-роликов, при этом передаточное число редуктора равно числу зубьев сателлита. Редуктор крепится к приводному оборудованию через крепежные отверстия выходного фланца и через крепежные отверстия в корпусе.

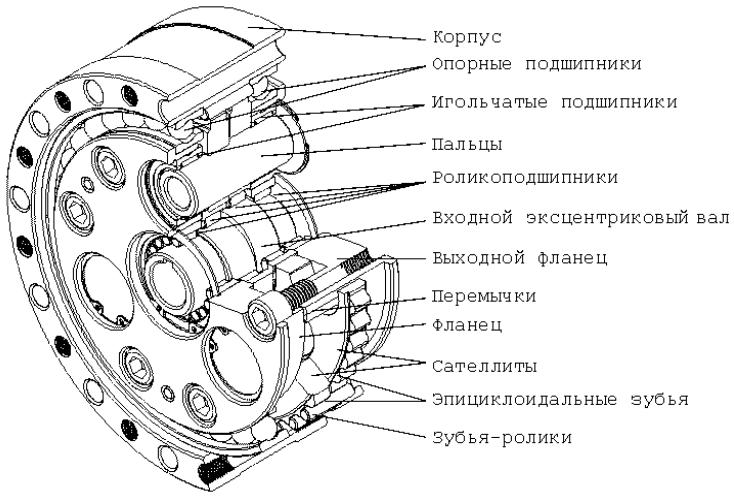


Рис. 1

Планетарно-цевочные редукторы компактны вследствие многопарности зацепления. Их долговечность определяется ресурсом подшипников. Расчёт зацепления можно производить по формулам работы [10], а расчет подшипников по формулам работы [11]. Результаты разработки гаммы прецизионных планетарно-цевочных редукторов с моментом на выходном валу от 270 до 4000 Н·м, передаточным числом 73÷209 и относительной массой 0,03÷0,04 кг/(Н·м) приведены в работе [8].

2. Чтобы уменьшить массу винтов и стягиваемых винтами фланцев мотор-редуктора, следует отказаться от определения необходимого диаметра винтов по эмпирическим формулам и перейти к их расчету из условий обеспечения нераскрытия стыка и несдвигаемости.

В настоящее время диаметр винтов d, мм, стягивающих редукторы с рамой (обычно в соединении используют четыре винта), в отечественной практике конструирования не рассчитывают, а рекомендуют назначать в работах [1], [7], [9] по эмпирической формуле $d = 1{,}56T^{0{,}33}$, где T – крутящий момент, Н·м, на выходном валу редуктора. При этом предполагается, что класс прочности винта составляет не менее 6.6. При расчете по этой эмпирической формуле для цилиндро-коническо-цилиндрического мотор-редуктора Bockwoldt (Германия) (рис. 2) исполнения CB 2K 112-71N/4D с моментом на выходе 301 Н·м и передаточным числом 127,1 диаметр винта необходимо было бы принять равным 12 мм, а для исполнения CB 2K 212-100L/4D с моментом на

выходе 2760 Н·м и передаточным числом 201,7 – 22 мм, в то время как используются винты [12] соответственно 10 и 16 мм.

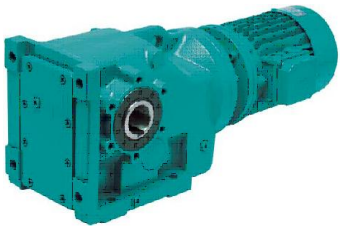


Рис. 2

Аналогичные эмпирические формулы предложены в работах [1], [7], [9] для определения диаметра винтов крепления крышки редуктора к корпусу и других. Такими эмпирическими формулами не учитывается расстояние между винтами, не указывается необходимая сила затяжки винта, не определяются внешние силы, нагружающие винты.

Чтобы уменьшить требуемые диаметры винтов, следует: перейти на использование высокопрочных винтов; производить расчет резьбовых соединений по методике [5], подтвержденной результатами экспериментальных исследований, с учетом не только моментов на выходном валу, но и с учетом геометрических параметров стыка, податливости стягиваемых деталей, податливости винтов и податливости контактного слоя; определять расчетом и указывать в чертежах необходимый параметр шероховатости контактирующих поверхностей и моменты завинчивания винтов. В этом случае существенно уменьшатся диаметры винтов и геометрические размеры стягиваемых ими фланцев, что снизит массу машины.

3. Для уменьшения металлоёмкости корпуса целесообразно отказаться от разъёмов корпуса в его нагруженной части и применять сборку зубчатых колес с валами внутри корпуса.

На рис. 3, *а* представлен чертеж трехступенчатого цилиндрического редуктора, выполненного по развернутой схеме. В его конструкции заложен радиальный способ сборки. Межосевые расстояния ступеней редуктора обозначены: тихоходной – $a_т$, промежуточной – $a_{пр}$, быстроходной – $a_б$. Габаритные размеры редуктора по длине L_1 и по высоте H_1. Если радиальный способ сборки заменить осевым способом (рис. 3, *б*) (не предусматривая напрессовку зубчатых колес на валы внутри редуктора), то не произойдет существенного уменьшения габаритных размеров (размеры L_2 и H_2) и массы редуктора, хотя будет реализовано пространственное расположение валов, которое в значительной степени повышает компактность редуктора. Если же напрессовку колес на валы осуществлять внутри редуктора, перенеся разъём корпуса в его ненагруженную область, и пространственно разместить валы (рис. 3, *в*), то можно существенно уменьшить габаритные размеры (размеры L_3 и H_3) и

массу корпуса.

Напрессовка зубчатых колес и подшипников на валы внутри редуктора широко применяется в мотор-редукторах большинства зарубежных фирм (Bauer, Nord, SEW, Renold, Inovari, Rotor и др.). Для осуществления напрессовки используют оригинальные конструкции пневмо- и гидроцилиндров. Этот способ сборки можно также реализовать [2],[3] с помощью завинчивания винтов в резьбовые отверстия, нарезанные в торцах валов.

На рис. 4 изображена напрессовка зубчатого колеса на вал, осуществляемая с помощью завинчивания винта диаметра $d_в$ в резьбовое отверстие, нарезанное в торце вала. При передаче вращающего момента с зубчатого колеса на вал с помощью шпонки обычно применяют посадку колеса на вал H7/p6, обеспечивающую хорошее центрирование колеса на валу.

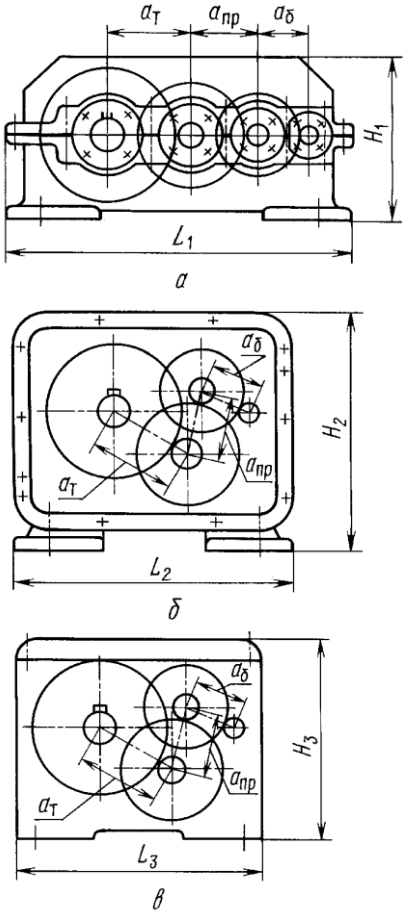


Рис. 3

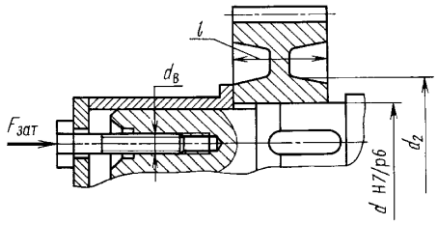


Рис. 4

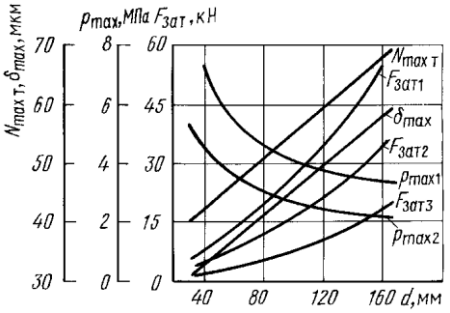


Рис. 5

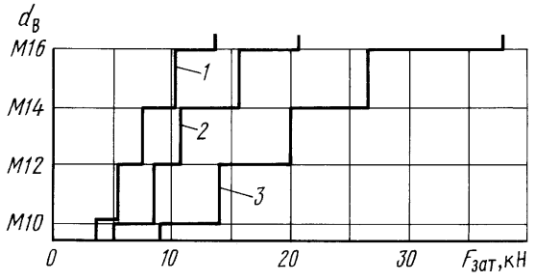


Рис. 6

Для этой посадки на рис. 5 представлены значения максимального измеренного табличного натяга $N_{max\,т}$ при разных диаметрах вала d. На этом же рисунке приведены значения расчетного максимального натяга δ_{max} в предположении, что параметры шероховатости вала и отверстия составляют $R_{a1} = R_{a2} = 0{,}8$ мкм. Значения δ_{max}, подставленные в формулу

Ляме, позволили найти и представить на этом же рисунке максимальные давления p_{max} в сопряжении вал-колесо в предположении, что колесо стальное (модули упругости материалов вала и колеса $E_1 = E_2 = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа) при двух величинах его наружного диаметра: $d_2 = 3d$ ($p_{max\,1}$) и $d_2 = 1{,}5d$ ($p_{max\,2}$). Причем первое значение соответствует случаю, когда колесо выполнено в форме диска, второе – если в нем предусмотрена его ступичная часть. По значениям p_{max}, предполагая длину l посадочной поверхности равной диаметру d вала, с использованием формулы $F_{зат} = p\pi dlf$ рассчитаны и приведены на том же рисунке необходимые силы затяжки винта $F_{зат}$ для трех возможных сочетаний параметров: 1) $d_2 = 3d$, $f = 0{,}2$ ($F_{зат\,1}$); 2) $d_2 = 1{,}5d$, $f = 0{,}2$ ($F_{зат\,2}$); 3) $d_2 = 1{,}5d$, $f = 0{,}1$ ($F_{зат\,3}$). Здесь f – максимальное значение коэффициента трения в сопряжении, равное 0,2 при сборке без смазки и равное 0,1 при наличии смазочного материала.

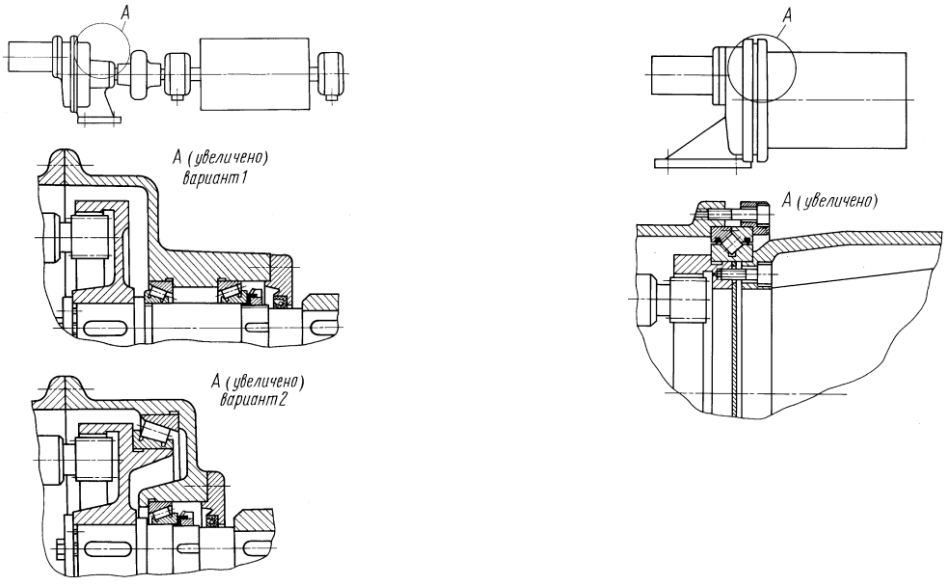
На рисунке 6 значению силы затяжки винта поставлен в соответствие требуемый диаметр винта. Вычисления проведены при запасе прочности винта равном 2 для трех классов его прочности: 1) 4.6; 2) 6.6; 3) 8.8. Графики рис. 4 и рис. 5 позволяют при конструировании определить диаметр винта $d_в$, необходимый для напрессовки зубчатого колеса на вал.

4. Уменьшению габаритных размеров и массы редукторов может способствовать применение в них опорно-поворотных подшипников.

На рис. 7, *а* изображен привод ленточного транспортера. Привод осуществляется одноступенчатым цилиндрическим мотор-редуктором с внутренним зацеплением. Представлено два варианта опор тихоходного вала этого редуктора. Опоры выполнены в виде конических роликовых подшипников, установленных «врастяжку», и имеют в первом варианте одинаковый диаметр обоих подшипников, а во втором – разный (на рисунке изображен конический подшипник серии диаметров 100, который есть в зарубежных каталогах). Регулировку осевого зазора в подшипниках осуществляют гайкой. Благодаря размещению одного подшипника внутри другого, второй вариант получается более компактным в осевом направлении.

Опорно-поворотные подшипники, в отличие от обычных подшипников, позволяют реализовать для валов одноопорное закрепление благодаря тому, что они могут воспринимать осевую и радиальную силы, а также опрокидывающий момент. На рис. 7, *б* изображен тот же привод ленточного транспортера с одноступенчатым цилиндрическим мотор-редуктором с внутренним зацеплением, но в качестве опоры колеса с внутренним зацеплением применен опорно-поворотный подшипник. В связи с тем, что это колесо имеет достаточно большой диаметр, оказалось удобным использовать в качестве опоры такой подшипник с большим средним диаметром. При этом, учитывая, что подшипник допускает нагружение опрокидывающим моментом значительной величины, на этом

же подшипнике закреплен и барабан ленточного транспортера. Из чертежа видно, что тихоходный вал оказался ненужным. Таким образом, благодаря замене двух радиально-упорных подшипников одним опорно-поворотным удалось не только снизить осевой габаритный размер, но и массу привода.



а *б*

Рис. 7

В отечественных волновых мотор-редукторах опорами тихоходного вала обычно служат два подшипника, установленные «врастяжку». Так, например, выполнен волновой мотор-редуктор МВз-2, изображенный на рис. 8, *а*. Фирма Harmonic Drive AG, в отличие от принятого в России конструктивного исполнения, в последних своих разработках для опоры тихоходного вала волнового мотор-редуктора использует опорно-поворотный подшипник (см. рис. 8, *б*). Мотор-редуктор при этом значительно укорачивается, а допустимые радиальная и осевая нагрузки на выходной конец вала и опрокидывающий момент существенно возрастают.

Возможные конструктивные исполнения опорно-поворотных подшипников и их расчеты приведены в работе [3].

5. В косозубой цилиндрической зубчатой передаче быстроходной ступени редуктора следует отказаться от ограничения угла наклона зуба величиной 22°, что позволит доводить передаточное число ступени до 10÷12,5.

Рассмотрим соединение вала двигателя и вала редуктора шестерней. Обычно в отечественных редукторах передаточное число одноступенчатой цилиндрической зубчатой передачи ограничивают значением $u = 6{,}3$. Если же шестерню напрессовывают на вал двигателя, то удается добиться для такой передачи только $u \leq 5$, что связано со значительной величиной

диаметра выходного конца его вала (рис. 9, *а*). В то же время фирмы SEW (Германия), Lenze (Германия), Renold (Великобритания) и Rossi (Италия) обеспечивают в быстроходной цилиндрической ступени своих мотор-редукторов передаточное число соответственно равное 8,65 (серия RX), 11,86 (серия GST) и 10,86 (серия RP). Отмечена тенденция у фирмы Lenze довести *u* до 12,5. Эти фирмы для увеличения передаточного числа при заданном межосевом расстоянии уменьшают диаметр шестерни, устанавливая шестерню в расточке входного вала редуктора (рис. 9, *б*). Увеличение передаточного числа ступени снижает необходимое число ступеней редуктора, что повышает его КПД.

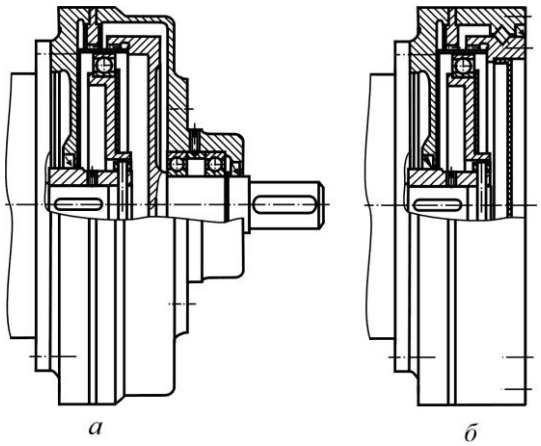


Рис. 8

Уменьшения диаметра шестерни добиваются снижением нормального модуля m зацепления до величины 1,5, 1,25, 1,0 мм и менее, а также уменьшением числа z_1 ее зубьев до 7÷11 с увеличением угла β наклона зуба до 25÷40°, в то время как у нас принято $\beta \leq 22^{o}$. Увеличение угла наклона зуба до 25÷40°, хотя повышает осевые силы, нагружающие подшипники, существенно понижает уровень шума передачи вследствие увеличения коэффициента осевого перекрытия. Радиальные однорядные шарикоподшипники, на которых обычно устанавливают входной вал редуктора и вал двигателя, достаточно приспособлены к восприятию умеренной осевой нагрузки. Поэтому уровень шума становится определяющим фактором [14] при выборе угла β зарубежных мотор-редукторов.

Для увеличения нагрузочной способности передачи поверхность зуба закаливают, повышая ее твердость до 50÷55 HRC и более.

Чтобы при нарезании шестерни с малым числом зубьев не возникло ни подрезания зуба, ни его заострения, вводят коэффициент $x_1 > 0$ смещения инструмента для зубьев шестерни. Предельные значения этого коэффициента при различных значениях угла β для исходного контура по ГОСТ 13755 – 81 определяется [4] графиком рис. 10, *а*, где сплошные

линии – предельные значения по подрезанию зубьев и пунктир – по их заострению.

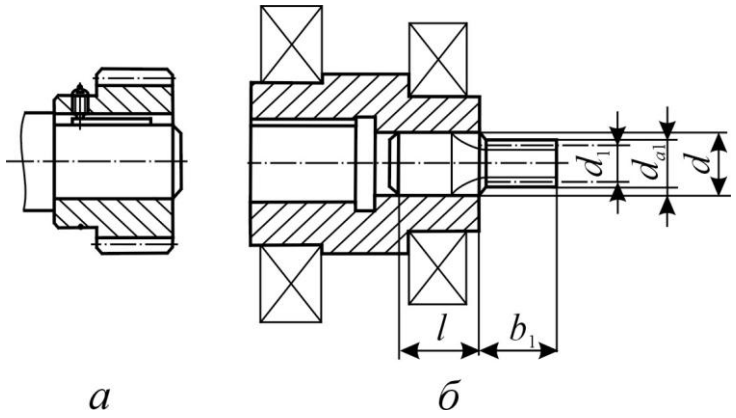


Рис. 9

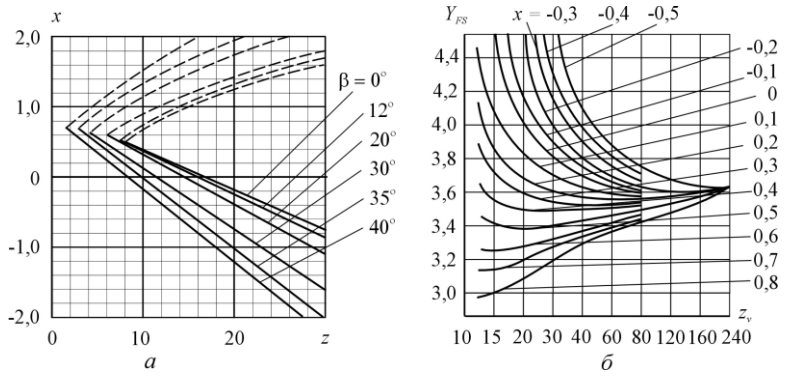


Рис. 10

Как известно [4], критерием работоспособности зубчатой передачи с высокой поверхностной твердостью зубьев и малым модулем зацепления является изгибная выносливость зубьев. В этом случае расчеты опираются на коэффициент формы зуба Y_{FS} (рис. 10, *б*), где $z_v = z/\cos^3\beta$ – эквивалентное число зубьев. Следует помнить, что изменение типа используемого жидкого смазочного материала практически никак не влияет на несущую способность по излому зубьев.

При соединении валов двигателя и редуктора шестерней можно реализовать передаточное число быстроходной цилиндрической ступени до 12,5. При этом угол наклона зуба принимают до 40° , число зубьев шестерни назначают в пределах 7÷11, а модуль зацепления определяют при расчете на изгибную выносливость. В большинстве случаев при передаваемой мощности до 5 кВт принимают m = 1,0÷1,5 мм.

Передачу крутящего момента с входного вала мотор-редуктора на шестерню можно обеспечить клеевым или клее-прессовым соединением. Конструирование и расчёт такого соединения приведен в работе [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие. − М.: Академия, 2004. − 496 с.
2. Иванов А.С. Конструируем машины шаг за шагом. В 2-х частях. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 1-я часть – 328 с; –2-я часть – 392 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. Кудрявцев В.Н. Детали машин: Учебник для вузов. − Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. − 464 с.
5. Муркин С.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Теоретико-экспериментальное исследование группового резьбового соединения, нагруженного отрывающей силой и опрокидывающим моментом // Вестник машиностроения. − 2014. № 5. − С. 20 − 29.
6. Муркин С.В., Иванов А.С. Соединения валов двигателя и редуктора в современных мотор-редукторах / Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: Труды Международ. научно-техн. конф., 27 − 28 апреля 2010 г. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2010. − С. 107 − 110.
7. Проектирование механических передач: Учебно-справочное пособие для вузов / С.А. Чернавский [и др.], − М.: Машиностроение, 1984. − 560 с.
8. Разработанная гамма высокоточных планетарно-цевочных редукторов / А.С. Иванов [и др.], // Вестник машиностроения. − 2013. № 4. − С. 15 – 18.
9. Редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения: Справочник / Л.С. Бойко [и др.]. − М.: Машиностроение, 1984. − 247 с.
10. Фомин М.В. Планетарно-цевочные передачи: Учеб. пособие. − М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. − 64 с.
11. Фомин М.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Расчет опор качения планетарно-цевочного редуктора // «Справочник» Инженерный журнал, изд-во «Машиностроение». − 2014. № 1. − С. 29 − 34.
12. Kegelradgetriebemotoren 2K // Katalog 7. URL:http: //www.bockwoldt.de/downloads/produkte/Kegelradgetriebe/katalog_7_kegelradgetriebe 2k.pdf (дата обращения: 06.07.2010).
13. Kinematic Analysis of Planetary Lantern Gear Systems / Ivanov A.S., Fomin M.V., Ermolaev M. M. // Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, No. 11–12. − P. 707–710. (Vestnik Mashinostroeniya. − 2012, No. 8.− P. 22–25).
14. Rackov M., Trbojevic R., Kuzmanovic S. Influence of shaft height on

technical characteristics of universal helical gear units //Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering. Vol. IV (XIV), 2005. − P. 754 –761.

A.S. Ivanov, M.M. Ermolaev, S.V. Murkin

ON THE DESIGN OF MODERN GEAR MOTORS

Bauman Moscow State Technical University, Russia;

Abstract

The analysis of the structural design of modern foreign reducing gears and gear motors is provided in the paper. Some calculations and methods of increasing the technical level of domestic gear motors are suggested on the basis of this analysis.

Keywords: gear motor, weight reduce

REFERENCES

[1] Dunaev, P.F., Lelikov, O.P. Konstruirovanie uzlov i detalei mashin [Machine design], Moscow: Akademiya, 2004, 496 p. (rus.)

[2] Ivanov, A.S. Konstruiruem mashiny shag za shagom. V 2-kh chastyakh []Machine design step by step], Moscow: Izdatel’stvovo MGTU imeni N.E. Baumana, 2003, 1-ya chast' – 328 p; –2-ya chast' – 392 p. (rus.)

[3] Ivanov, A.S., Murkin, S.V. Konstruirovanie sovremennykh motor-reduktorov [Modern gear motors design], Moscow: MGTU imeni N.E. Baumana, 2012, http://wwwcdl.bmstu.ru/rk3/Motor.html. (rus.)

[4] Kudryavtsev, V.N. Detali mashin [Machine design], Leningrad: Mashinostroenie, 1980, 464 p.

[5] Murkin, S.V., Ivanov, A.S., Ermolaev, M.M. Teoretiko-eksperimental'noe issledovanie gruppovogo rez'bovogo soedineniya, nagruzhennogo otryvayushchei siloi i oprokidyvayushchim momentom [Theoretical and experimental study of multi-screw joint subject to separating forces and moments], in *Vestnik mashinostroeniya*, 2014,N 5, P. .... (rus.)

[6] Murkin, S.V., Ivanov, A.S. Soedineniya valov dvigatelya i reduktora v sovremennykh motor-reduktorakh [Reducer-motor connections in modern motor reducers], in *Aktual'nye zadachi mashinovedeniya, detalei mashin i tribotekhniki: Trudy Mezhdunarod. nauchno-tekhn. konf.*, 27 − 28 april 2010, StPetersburg: Balt. gos. tekhn. un-t., 2010, P. 107 − 110. (rus.)

[7] Proektirovanie mekhanicheskikh peredach [Mechanical transmission design], Moscow: Mashinostroenie, 1984, 560 p. (rus.)
[8] Ivanov, A.S. [et al.]. Razrabotannaya gamma vysokotochnykh planetarno-tsevochnykh reduktorov [Series of high precision cycloidal reducers], in *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, N 4. P. 15–18. (rus.)
[9] Reduktory i motor-reduktory obshchemashinostroitel'nogo primeneniya: Spravochnik [Industry reducers and motor reducers. Handbook] –Moscow: Mashinostroenie, 1984, 247 p. (rus.)
[10] Fomin M.V. Planetarno-tsevochnye peredachi [Cycloidal transmissions], Moscow: MGTU imeni N.E. Baumana, 2009, 64 p. (rus.)
[11] Fomin M.V., Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Raschet opor kacheniya planetarno-tsevochnogo reduktora [Calculations of bearings for cycloidal reducer], in *«Spravochnik» Inzhenernyi zhurnal*, Moscow: Mashinostroenie, 2014, № 1, P. 29−34. (rus.)
[12] Kegelradgetriebemotoren 2K. In *Katalog 7*. http://www.bockwoldt.de/downloads/produkte/Kegelradgetriebe/katalog_7_kegelradgetriebe 2k.pdf.
[13] Ivanov, A.S., Fomin, M.V., Ermolaev, M. M. Kinematic Analysis of Planetary Lantern Gear Systems, in *Russian Engineering Research*, 2012, Vol. 32, No. 11–12, P. 707–710. (*Vestnik Mashinostroeniya*, 2012, No. 8. P. 22–25).
[14] Rackov M., Trbojevic R., Kuzmanovic S. Influence of shaft height on technical characteristics of universal helical gear units, in *Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering*. Vol. IV (XIV), 2005, P. 754–761.

УДК 621.882.001.572

А.С. Иванов[1], С.В. Муркин[2]

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ, НАГРУЖЕННОГО ПРОИЗВОЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ СИЛ И МОМЕНТОВ

(Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки по проекту 1403)

[1]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
Тел: (917)501-50-88, E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[2]Сергей Владимирович Муркин, ст. научн. сотр.
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
Россия, Москва
E-mail: svmurkin@mail.ru

Аннотация

В работе представлена уточненная методика расчета группового резьбового соединения, нагруженного произвольной системой сил и моментов, учитывающая упругие свойства контактных поверхностей соединяемых деталей.

Ключевые слова: групповое резьбовое соединение, контактная податливость.

В современных методах расчета резьбового соединения, широко применяемых при конструировании и приведенных в учебниках [3, 5, 12], а также в общетехнических справочниках [2, 7] не учитываются упругие свойства контактных поверхностей соединяемых деталей. Однако, следует отметить, что пренебрежение контактной податливостью стыка приводит в расчетах резьбового соединения к ошибке в необходимой силе затяжки винта 50% [6] и в оценке прочности винта 30 % [1]. В точных машинах [6] (станках, роботах) отсутствие учета контактной податливости дает погрешность в оценке точности позиционирования рабочего органа машины до 70%.

В данной работе предлагается методика расчёта резьбового соединения, нагруженного произвольной системой сил и моментов, учитывающая контактную податливость соединяемых деталей, разработанная на основе результатов теоретико-экспериментальных исследований, приведенных в статье [8].

Рассматривается групповое резьбовое соединение (рис. 1) с номинальной площадью A стыка, стянутое n винтами. Предполагается, что суммарная толщина Σh лап стягиваемых фланцев достаточна для обеспечения отсутствия их значимых изгибных деформаций: $\Sigma h \geq 2d$, где d − наружный диаметр винта. Винты имеют внутренний диаметр резьбы $d_3 = d - 1{,}227P$ (P – шаг резьбы), длину гладкой части $l_1 = l_v - l_в$ и длину нарезанной нагруженной части $l_2 = \Sigma h - l_1$, где l_v и $l_в$ – длины винта и его нарезанной части. Модули упругости материала винтов – $E_в$, стягиваемых фланцев – $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$, где E_1, E_2 − модули упругости материалов контактирующих поверхностей. Винты затягивают до напряжения в них $\sigma_{зат\ в} = (0{,}6 \div 0{,}8)\sigma_т$, где $\sigma_т$ – предел текучести материала винта. Сила затяжки каждого винта

$$F_{зат} = \sigma_{зат\ в}\pi\, d_3^2/4. \qquad (1)$$

После затяжки винтов соединение нагружают, прикладывая отрывающую силу F_a, опрокидывающие моменты M_x и M_y в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях, сдвигающую силу F_t и крутящий (в горизонтальной плоскости) момент $T_{кр}$.

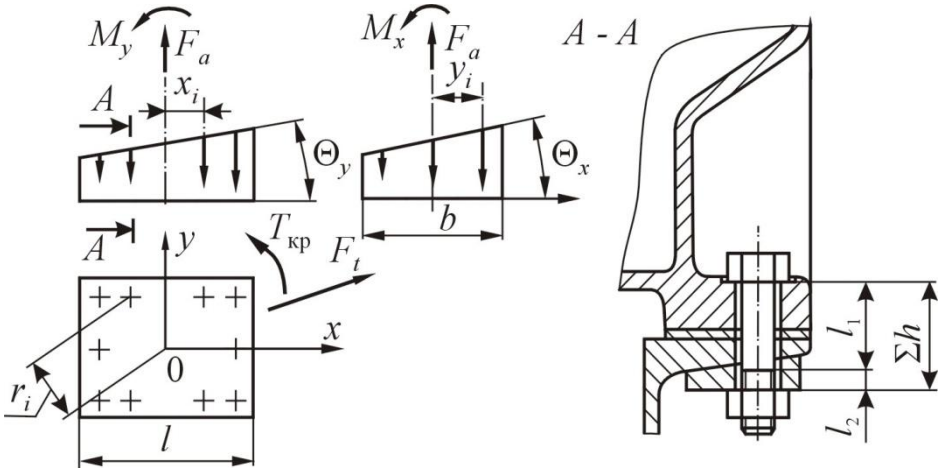


Рис. 1. Расчетная схема группового резьбового соединения

Доля внешней растягивающей нагрузки, приходящаяся на винты,

$$\chi_F = \left(\lambda_к + \lambda_д\right)/\left(\lambda_к + \lambda_д + \lambda_в/n\right), \qquad (2)$$

доли внешней изгибающей нагрузки относительно осей x и y, приходящиеся на винты,

$$\chi_{Mx} = \left(\lambda_к + \lambda_д\right)/\left(\lambda_к + \lambda_д + \lambda_в I_x/A\sum_i z_i y_i^2\right); \qquad (3)$$

$$\chi_{My} = \left(\lambda_к + \lambda_д\right)/\left(\lambda_к + \lambda_д + \lambda_в I_y/A\sum_i z_i x_i^2\right), \quad (4)$$

где $\lambda_к = k\varepsilon/A$, $\lambda_д = \Sigma h/(EA)$ и $\lambda_в = [(0{,}5d + l_1)/(\pi d^2) + (0{,}5d + l_2)/(\pi d_3{}^2)]4/E_в$ – податливости контактного слоя, деталей и винта, мм/Н, т.е. изменение их размера под единичной нагрузкой;

$$k = 0{,}5Ra \cdot c_0/(E \cdot p)^{0,5} \quad (5)$$

– коэффициент контактной податливости, мм^3/Н ($Ra = (Ra_1{}^2 + Ra_2{}^2)^{0,5}$ – параметр шероховатости контактного слоя, где Ra_1, Ra_2 − параметры шероховатости контактирующих поверхностей; c_0 – коэффициент, который при повторных нагружениях ≈ 355; $p = zF_{зат}/A$ – давление по контактной поверхности, создаваемое силой затяжки винтов, МПа); ε – коэффициент влияния масштаба, зависящий от наибольшего размера l контактной поверхности: при l = 50 мм ε = 1; при l < 50 мм ε = l/50; при l > 50 мм, если $3a_0{}^{1/3} < a_0$, то $\varepsilon = 3a_0{}^{1/3}$, и, если $3a_0{}^{1/3} > a_0$, то $\varepsilon = 0{,}5a_0 + (1 - a_0{}^2/12)^{1/2}$ (здесь $a_0 = (\Delta - W\max)/\delta_{p0}$; Δ – допуск плоскостности [9] для поверхности контакта, мм; Wmax – высота волны [14] шероховатой поверхности, мм; $\delta_{p0} = Ra\ c_0\ (p/E)^{0,5}$ – сближение в контактном слое, мм, наибольший размер l_0 = 50 мм которого выбран за эталон); I_x и I_y – моменты инерции опорной поверхности относительно её нейтральных осей x и y.

Параметры χ_F, χ_{Mx} и χ_{My} будем называть коэффициентами основных растягивающей и изгибающей нагрузок.

Условие нераскрытия стыка заключается в необходимости обеспечения минимальных напряжений в стыке не менее 2 МПа:

$$\sigma_{min} = \frac{nF_{зат}}{A} - \left[\frac{(1-\chi_F)F_a}{A} + \frac{(1-\chi_{My})M_y}{W_y} + \frac{(1-\chi_{Mx})M_x}{W_x}\right] \geq 2, \quad (6)$$

где W_x и W_y − моменты сопротивления изгибу контактной поверхности.

Несдвигаемость считается обеспеченной, если при силе затяжки каждого винта $F_{зат\ 1}$ сила трения в стыке будет на меньше сдвигающей силы под наиболее удаленным от центра масс стыка винтом:

$$\left[F_{зат\ 1} - \frac{(1-\chi_F)F_a}{n}\right] f \geq F_{t1}$$

где $F_{t\ 1} = F_t/n + T_{кр}r_1\ \cos\alpha/[\Sigma(z_i\ r_i^2)]$ − сдвигающая сила в месте расположения 1-го винта, наиболее удаленного от центра масс стыка; r_1 − его расстояние от центра масс стыка винта, α − угол между направлением силы F_t и сдвигающей силы, создающейся моментом $T_{кр}$, в месте

расположения 1-го винта; z_i − группы винтов, удаленные от центра масс стыка на расстояние r_i; f – коэффициент трения в контакте стягиваемых поверхностей (обычно f = 0,2 для несмазанных поверхностей контакта). Отсюда условие несдвигаемости можно представить как

$$F_{\text{зат}} \geq F_{\text{зат 1}} \geq \frac{[F_t/n + T_{\text{кр}} r_1 \cdot \cos\alpha / \sum_i z_i r_i^2]}{f} + \frac{(1-\chi_F) F_a}{n} \quad . \qquad (7)$$

Прочность винтов проверяют при нагружении резьбового соединения отрывающей силой F_a и опрокидывающими моментами M_x и M_y.

Внешняя сила на наиболее нагруженный винт:

$$F_{\text{в}FM} = \chi_F \frac{F_a}{n} + \chi_{My} M_y \frac{x_1}{\sum_i z_{xi} x_i^2} + \chi_{Mx} M_x \frac{y_1}{\sum_i z_{yi} y_i^2}, \qquad (8)$$

где z_{xi} − группы винтов, удаленные от оси y на расстояние x_i; z_{yi} − группы винтов, удаленные от оси x на расстояние y_i ($\Sigma z_{xi} = \Sigma z_{yi} = \Sigma z_i = n$).

Расчетная нагрузка на винт

$$F_{\text{р}} = 1{,}3 F_{\text{зат}} + F_{\text{в}FM}, \qquad (9)$$

где коэффициент 1,3 учитывает возникновение касательных напряжений в стержне винта при завинчивании его гаечным ключом.

Суммарная сила F_Σ, действующая на наиболее нагруженный винт,

$$F_\Sigma = F_{\text{зат}} + F_{\text{в}FM}. \qquad (10)$$

Прочность винтов в опасном сечении проверяют:

- по напряжению [1]

$$\sigma_{\text{р}} = 4F_{\text{р}}/(\pi d_3^2), \qquad (11)$$

определяемому расчетной нагрузкой и действующему только в первые моменты работы привода (считается, что со временем касательные напряжения в стержне винта исчезают);

- по максимальному напряжению, возникающему на протяжении всего срока службы привода,

$$\sigma_{max} = 4F_\Sigma/(\pi d_3^2); \qquad (12)$$

- по амплитудному напряжению σ_a [1, 7, 12], которое вычисляют в предположении, что резьбовое соединение подвергается пульсационному (отнулевому) циклу нагружения,

$$\sigma_a = 0{,}5 F_{\text{в}FM}/(\pi d_3^2/4). \qquad (13)$$

Коэффициенты запаса, соответствующие этим напряжениям, должны удовлетворять условиям:

$$S_{\text{р}} = \sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{р}} \geq 1; \quad (14)$$

$$S_{max} = \sigma_{\text{т}}/\sigma_{max} \geq 1{,}2; \quad (15)$$

$$S_a = \sigma_{a\text{п}}/\sigma_a \geq 2, \quad (16)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала; $\sigma_{a\text{п}}$ – предельная амплитуда цикла (меньшие из указанных значения коэффициентов запаса принимают при наличии контроля момента завинчивания динамометрическим ключом).

Предельная амплитуда $\sigma_{a\text{п}}$ цикла зависит от класса прочности винта, способов изготовления резьбы, термообработки и по данным работ [1, 7, 12] составляет, МПа: для винтов класса прочности 8.8 с резьбой нарезной – 45 (55), накатанной – 55 (65); для винтов класса прочности 10.9 с резьбой нарезной – 65÷80 (75÷110), накатанной – 75÷95 (85÷110). В скобках указаны значения $\sigma_{a\text{п}}$ для винтов, термообработанных до изготовления резьбы.

Если условия прочности винта выполнены, диаметр винта считается выбранным.

После выбора диаметра винта вычисляют момент завинчивания

$$T_{\text{зав}} = F_{\text{зат}}[\text{tg}(\varphi' + \psi)\, d_2/2 + f_{\text{т}}\, d_{\text{т}}/2], \quad (17)$$

где d_2 – средний диаметр резьбы; $\varphi' = \text{arctg}(f_{\text{р}}/\cos 30^0)$ – приведенный угол трения; $\psi = \text{arctg}\,[P/(\pi d_2)]$ – угол наклона винтовой линии резьбы по ее среднему диаметру; $f_{\text{р}}$ и $f_{\text{т}}$ – коэффициенты трения в резьбе и по торцу (обычно принимают $f_{\text{р}} = f_{\text{т}} = 0{,}15$, если резьба не смазана); $d_{\text{т}}$ – средний диаметр торца гайки.

Вычисляют углы поворота соединения относительно осей *x* и *y*:

$$\theta_x = \left(k\varepsilon + \lambda_{\text{д}} A\right)(1 - \chi_{Mx})\, M_x/W_x\,; \quad (18)$$

$$\theta_y = \left(k\varepsilon + \lambda_{\text{д}} A\right)\left(1 - \chi_{My}\right) M_y/W_y. \quad (19)$$

Методика расчета И.А. Биргера [1] не учитывает податливость контактного слоя и заменяет резьбовое соединение n втулками, соединенными жесткой диафрагмой, параллельной плоскости стыка, где втулка имеет высоту Σh и площадь поперечного сечения $A_{\text{вт}} = 0{,}25[(S + 0{,}5\,\Sigma h)^2 - d_0{}^2]$, S − размер головки винта под ключ, d_0 − диаметр отверстия под винт в соединяемых деталях. Зная податливость $\lambda_{\text{в}}$ винта и податливость втулки $\lambda_{\text{вт}} = \Sigma h/(E\, A_{\text{вт}})$, оценивают коэффициент основной нагрузки $\chi = \lambda_{\text{вт}}/(\lambda_{\text{вт}} + \lambda_{\text{в}})$. Условие нераскрытия стыка

$$\frac{nF_{\text{зат}}}{A} \geq k\left[\frac{(1-\chi)F_a}{A} + \frac{(1-\chi)M_y}{W_y} + \frac{(1-\chi)M_x}{W_x}\right], \quad (20)$$

где k − запас по нераскрытию стыка, который при действии статической нагрузки рекомендуется принимать равным полтора, а при действии динамической нагрузки равным четырем. Внешнюю силу, действующую на наиболее нагруженный винт, вычисляют по формуле

$$F_{\text{в}FM} = \chi \frac{F_a}{n} + \chi M_y \frac{x_1}{\sum_i z_i x_i^2} + \chi M_x \frac{y_1}{\sum_i z_i y_i^2}. \quad (21)$$

Методика расчета Д.Н. Решетова [12] не учитывает податливость контактного слоя и предлагает принимать на стадии проектирования коэффициент основной нагрузки $\chi = 0{,}2 \div 0{,}3$ (обычно принимают $\chi = 0{,}25$), предполагая, что в передаче нагрузок участвует вся контактная поверхность. Следует отметить, что в работе [13] по результатам численного моделирования фланцевых соединений получено аналогичное среднее значение коэффициента основной нагрузки $\chi = 0{,}25$. Условием нераскрытия стыка является выражение (6).

По трем изложенным выше методикам произведем расчет резьбового соединения цилиндро-коническо-цилиндрического мотор-редуктора Bockwoldt (Германия) исполнений CB 2K 112 массой 32 кг и CB 2K 212 массой 125 кг с рамой. Их геометрические параметры и параметры нагружения, взятые из каталога [15], обозначены на рис. 2 и приведены в строках 1÷24 таблицы. Параметры, взятые из справочников [2−4], приведены в строках 25÷30 таблицы.

В соединении используются 4 винта ($n = z_i = 4$, $i = 1$) соответственно М10 и М16 класса прочности 10.9. В каталоге редукторов для винтов такого класса прочности приводятся необходимые им моменты завинчивания, соответственно равные 67 и 285 Н·м, что, согласно формулам (1), (17), предполагает затяжку винтов до $\sigma_{\text{зат в}} = 0{,}7\sigma_{\text{т}}$, где $\sigma_{\text{т}} = 900$ МПа – предел текучести материала винта. Принимаем, что материал корпуса редуктора – чугун, материал рамы – сталь.

После затяжки винтов мотор-редуктор можно эксплуатировать и нагружать соединение, прикладывая к выходному валу крутящий момент T, консольную $F_{\text{к}}$ и направленную по оси вала F_A силы. Причем сила $F_{\text{к}}$ может быть направлена как горизонтально, так и вертикально.

Сила $F_{\text{к}}$ в случае её горизонтального направления и сила F_A создают крутящий момент $T_{\text{кр}} = (0{,}5L + e + y)F_{\text{к}} + aF_A$ относительно центра масс стыка и сдвигающую силу $F_t = (F_{\text{к}}^2 + F_A^2)^{0{,}5}$. Эти две компоненты приводят к образованию сдвигающей силы $F_{t\,1}$ в месте расположения 1-го винта, наиболее удаленного от центра масс стыка. При определении силы $F_{\text{зат }1}$ в формулу (7) подставляем $r_1 = r_i = (x^2 + y^2)^{0{,}5}$ и $\alpha \approx 0$.

Прочность винтов проверяем при нагружении резьбового соединения отрывающей силой $F_a = F_{\text{к}}$ и опрокидывающими моментами $M_x = (0{,}5L + e + y)F_A + HF_a$ и $M_y = T + aF_a$.

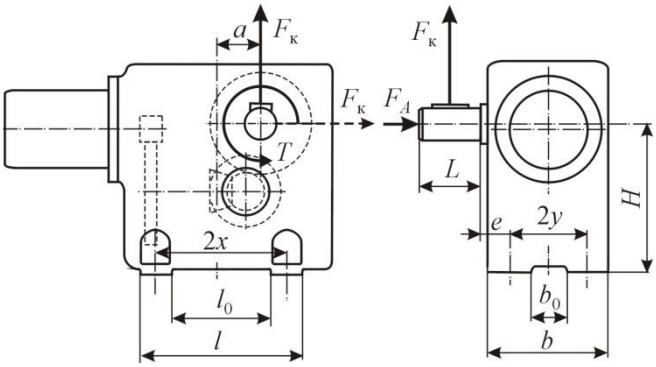


Рис. 2. Резьбовое соединение цилиндро-коническо-цилиндрического мотор-редуктора Bockwoldt с рамой

Расчеты проведены при *Ra* = (1,25, 3,2, 6,3) мкм. При *Ra* = (3,2, 6,3) мкм запасы по усталостной прочности получены 1,65 и 1,20, что меньше допустимой величины, равной 2,0. Поэтому результаты расчета в строках 31÷41 таблицы приведены только при *Ra* = 1,25 мкм. Класс прочности винтов принят равным 10.9.

При расчетах по методике И.А. Биргера получено для мотор-редуктора СВ 2К 112-71N/4D S_p = 1,06, S_{max} = 1,7, S_a = 6,76 (χ = 0,102), для мотор-редуктора СВ 2К 212-71N/4D S_p = 1,04, S_{max} = 1,33, S_a = 2,92 (χ = 0,131), по методике Д.Н. Решетова − для мотор-редуктора СВ 2К 112-71N/4D S_p = 1,04, S_{max} = 1,33, S_a = 2,75 (χ = 0,25), для мотор-редуктора СВ 2К 212-71N/4D $S_p \approx 1{,}0$, S_{max} = 1,26, S_a = 1,53 (χ = 0,25), что указывает на достаточную прочность винтов.

Сопоставляя результаты расчётов по предлагаемой методике, методике И.А. Биргера и методике Д.Н. Решетова, можно заключить, что для мотор-редуктора СВ 2К 112-71N/4D оказались достаточными диаметры винта 10 мм, а для мотор-редуктора СВ 2К 212-100L/4D − 16 мм. Эти расчеты проведены для величин сил $F_к$ и F_A, регламентированных работой [15], существенно бóльших по сравнению с рекомендацией ГОСТ Р 50891–96 (см. примечание к таблице). Диаметр винтов в рассмотренных редукторах соответствует результатам расчётов по трем методикам.

В настоящее время диаметр винтов *d*, мм, стягивающих мотор-редукторы или редукторы с рамой (обычно в соединении используют четыре винта), в отечественной практике конструирования не рассчитывают, а рекомендуют назначать по эмпирической формуле $d = 1{,}56T^{0,33}$, где *T* – крутящий момент, Н·м, на выходном валу редуктора. При этом предполагается, что класс прочности винта составляет не менее 6.6 [4, 10, 11]. В этом случае не учитывается расстояние между винтами, расчеты необходимой силы затяжки винта и внешних сил, нагружающих винты, не проводятся. По этой эмпирической формуле для мотор-редуктора СВ 2К 112-71N/4D диаметр винта необходимо было бы принять равным 12 мм, а для мотор-редуктора СВ 2К 212-100L/4D – 22 мм.

Таблица

№	Параметр	Мотор-редуктор	
		СВ 2К 112-71N/4D	СВ 2К 212-100L/4D
1.	Мощность, кВт	0,37	2,2
2.	Передаточное число	127,1	201,7
3.	T, Н·м	301	2760
4.	$F_к$, кН	7*	30**
5.	F_A, кН	2,33***	10***
6.	l, мм	156	230
7.	l_0, мм	104	130
8.	b, мм	146	230
9.	b_0, мм	94	130
10.	H, мм	112	212
11.	L, мм	40	70
12.	e, мм	20	35
13.	a, мм	30	35
14.	x, мм	65	90
15.	y, мм	60	90
16.	d, мм	10	16
17.	P, мм	1,5	2
18.	Σh, мм	36	64
19.	l_v, мм	50	80
20.	l_1, мм	24	42
21.	$\sigma_{зат\ в}$	$0{,}7\sigma_т$	$0{,}7\sigma_т$
22.	E, МПа	$1{,}476 \cdot 10^5$	
23.	Класс прочности винта; $E_в$, МПа	10.9; $2{,}1 \cdot 10^5$	
24.	$\sigma_т$, МПа	900	
25.	Способ изготовления резьбы	Нарезание	
26.	Термообработка проводится	После изготовления резьбы	
27.	$\sigma_{ап}$, МПа	65	
28.	Ra, мкм	1,25	
29.	Δ, мкм	8	10
30.	Wmax, мкм (фрезерование)	7,5	
31.	$T_{кр}$, Н·м	770	5150
32.	$F_{t\,1}$, кН	2950	15050
33.	$F_{зат\ 1}$, кН	4100	20900
34.	$F_{зат}$, кН	32900	90800
35.	σ_{min}, МПа	35,7	16,3
36.	$S_р$	1,04	1,03
37.	S_{max}	1,33	1,32
38.	S_a	2,94	2,42
39.	$T_{зав}$, Н·м	64	279
40.	Θ_x, рад	0,00007	0,00011
41.	Θ_y, рад	0,00002	0,00004

Примечание: По ГОСТ Р 50891–96: индекс «*» – $F_к = 5{,}31$ кН; «**» – $F_к = 13{,}13$ кН; «***» – $F_A = 0$ кН.

Выводы:

1. Подбор диаметров винтов по эмпирической формуле, рекомендуемой в работах [4, 10, 11], завышает необходимый диаметр винтов. Поэтому назначение необходимого диаметра винтов по эмпирической формуле следует заменить расчетом.
2. Методики И.А. Биргера и Д.Н. Решетова не учитывают контактной податливости, что не позволяет регламентировать в рабочих чертежах необходимые параметры шероховатости контактной поверхности и, так как не реагируют на то, что с уменьшением силы затяжки винта внешняя нагрузка, приходящаяся на винт и запас его усталостной прочности уменьшаются, обоснованно назначать необходимую силу затяжки винта. Поэтому на стадии проектирования использование предлагаемой методики расчета резьбовых соединений предпочтительно.
3. Расчеты по предлагаемой методике позволяют не только выбрать винты, но и определить углы поворота в соединении, возникающий под действием на него опрокидывающих моментов.
4. Из анализа результатов расчетов следует, что если проводить расчеты не по эмпирической формуле, принятой в России, а по предлагаемым формулам (1)÷(19), использовать высокопрочные винты, обеспечивать среднюю арифметическую высоту микронеровностей контактирующих поверхностей стягиваемых деталей не выше 1,25 мкм, создавать напряжения затяжки в винте 0,7 от предела текучести его материала, пользуясь динамометрическим ключом для обеспечения необходимого момента завинчивания, то можно существенно уменьшить требуемый диаметр винта. В свою очередь это даст возможность уменьшить размеры стягиваемых винтами фланцев, а следовательно и массу машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1993. –640 с.
3. Детали машин: Учебник для вузов / Л.А. Андриенко [и др]; под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.
4. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учебное пособие. –М.: Академия, 2004. –496 с.
5. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
6. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
7. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. IV-1. Под общ. ред.

Д.Н.Решетова./ Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка.–М.: Машиностроение, 1995. – 864 с.
8. Муркин С.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Теоретико-экспериментальное исследование группового резьбового соединения, нагруженного отрывающей силой и опрокидывающим моментом // Вестник машиностроения.– 2014. –№ 5. – С. 20 − 29.
9. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: Справочник. В 2.ч. Ч.1.– СПб.: Политехника, 2001.– 576 с.
10. Проектирование механических передач: учеб.-справ. пособие для втузов / С.А. Чернавский [и др.] –М.: Машиностроение, 1984. –560 с.
11. Редукторы и мотор-редукторы общемашиностроительного применения: Справочник / Л.С. Бойко [и др.] –М.: Машиностроение, 1984. – 247 с.
12. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для вузов. –М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
13. Суханов А.А. Инженерные расчеты болтовых соединений //Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. –С. 387-402
14. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. –М.: Машиностроение, Кн.1. 1978. – 400 с.
15. Kegelradgetriebemotoren 2K [электронный ресурс]// Katalog7. URL:http://www.bockwoldt.de/downloads/produkte/Kegelradgetriebe/katalog_7_kegelradgetriebe_2k.pdf (дата обращения: 06.07.2010).

A.S. Ivanov, S.V. Murkin

THE METHOD OF CALCULATION OF THE THREADED CONNECTION UNDER RANDOM SYSTEM OF FORCES AND MOMENTS

Bauman Moscow State Technical University, Russia;

Abstract

The paper presents a refined method of computing group threaded connections under random system of forces and moments that take into account the elastic properties of the member contact surfaces.

Keywords: group threaded connection, contact yielding.

REFERENCES

[1] Birger, I.A., Iosilevich, G.B. Rez'bovye i flantsevye soedineniya [Threaded and flange joints], Moscow: Mashinostroenie, 1990, 368 p. (rus.)

[2] Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B. Raschet na prochnost' detalei mashin. Spravochnik [Calculation on durability of machine parts. Handbook], Moscow: Mashinostroenie, 1993, 640 p. (rus.)
[3] Detali mashin [Machine design], Moscow: Izdatel'stvvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2002, 544 p. (rus.)
[4] Dunaev, P.F., Lelikov, O.P. Konstruirovanie uzlov i detalei mashin [Machine design], Moscow: Akademiya, 2004, 496 p. (rus.)
[5] Iosilevich G.B. Detali mashin [Machine design], Moscow: Mashinostroenie, 1988, 368 p. (rus.)
[6] Levina, Z.M., Reshetov, D.N. Kontaktnaya zhestkost' mashin [Contact Rigidity in Machines], Moscow: Mashinostroenie, 1971, 264 p. (rus.)
[7] Mashinostroenie. Entsiklopediya. V 40 t. T. IV-1 [Mechnical engineering. Encyclopedia], Moscow: Mashinostroenie, 1995, 864 p. (rus.)
[8] Murkin, S.V., Ivanov, A.S., Ermolaev, M.M. Teoretiko-eksperimental'noe issledovanie gruppovogo rez'bovogo soedineniya, nagruzhennogo otryvayushchei siloi i oprokidyvayushchim momentom [Theoretical and experimental study of multi-screw joint subject to separating forces and moments], in *Vestnik mashinostroeniya*, 2014,N 5, P. .... (rus.)
[9] Palei, M.A., Romanov, A.B., Braginskii, V.A. Dopuski i posadki: Spravochnik [Tolerances and fits. Handbook]. V 2.ch. Ch.1.– StPetersburg: Politekhnika, 2001, 576 p. (rus.)
[10] Proektirovanie mekhanicheskikh peredach [Mechanical transmission design], Moscow: Mashinostroenie, 1984, 560 p. (rus.)
[11] Reduktory i motor-reduktory obshchemashinostroitel'nogo primeneniya: Spravochnik [Industry reducers and motor reducers. Handbook] –Moscow: Mashinostroenie, 1984, 247 p. (rus.)
[12] Reshetov, D.N. Detali mashin [Mashine Designe], Moscow: Mashinostroenie, 1989, 496 p. (rus.)
[13] Sukhanov, A.A. Inzhenernye raschety boltovykh soedinenii [Engineering calculation of bolted connections], in *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii,* StPetersburg: Izdatel'stvvo Politekhn. un-ta, 2013, P. 387-402 (rus.)
[14] Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik. V 2-kh kn. [Friction, wear and lubrication], Moscow: Mashinostroenie, Kn.1, 1978, 400 p. (rus.)
[15] Kegelradgetriebemotoren 2K. In *Katalog7*. http://www.bockwoldt.de/downloads/produkte/Kegelradgetriebe/katalog_7_kegelradgetriebe_2k.pdf .

УДК 621

В.М.Медунецкий[1] , Е.В.Шалобаев[2], Р.Р.Магдиев[3], К.Н.Заикин[4], Д.Г.Суриков[5]

УПРОЧНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

[1]Виктор Михайлович Медунецкий, д-р техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики – Университет ИТМО) Россия, Санкт-Петербург
тел. +7-965-762-50-51; E-mail: vm57med@yandex.ru

[2]Евгений Васильевич Шалобаев, канд. техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики — Университет ИТМО) Россия, Санкт-Петербург
тел. +7-921-988-00-86; E-mail: shalobaev47@mail.ru

[3]Ренат Рауфович Магдиев, канд. техн. наук, доц.
Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики — Университет ИТМО) Россия, г.Санкт-Петербург
тел. +7-921-967-60-74, E-mail: magdi@mail.ru

[4]Константин Николаевич Заикин канд. техн. наук, доц.
Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики — Университет ИТМО) Россия, г.Санкт-Петербург
+7-921-965-09-26, E-mail: stsz@inbox.ru

[5]Дмитрий Геннадьевич Суриков старший преподаватель
Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики — Университет ИТМО) Россия, г.Санкт-Петербург
тел. +7-911-794-08-36; E-mail: surikov77@mail.ru

Аннотация

В работе показана роль поверхностного слоя рабочих профилей зубьев и указан комплекс мер по его упрочнению. Теория и практика показывают, что именно упрочнение поверхностного слоя позволяют достичь предельных эксплуатационных свойств зубчатыми передачами.

Ключевые слова: инженерия поверхности, упрочнение поверхности, химико-термическая обработка, пластическая деформация.

Одним из значимых направлений повышения качественных показателей зубчатых венцов из металлов и их сплавов является комплекс мер по упрочнению поверхностного слоя рабочих поверхностей, что позволяет, как показывает практика и теория, достичь предельных эксплуатационных свойств зубчатых колёс. Важно отметить, что на современном этапе развития этого направления (прежде всего, упрочнение поверхностей путём химико-термической обработки) является новый научно-практический подход как новому методу – инженерии поверхности. В данном случае проблема прочности и долговечности зубчатых венцов определяется геометрическими размерами поверхностного слоя, соотношением между толщинами отдельных составляющих слоя (диффузионной зоны и зоны химических соединений), соотношением между твёрдостью составляющих слоя и твёрдостью материала в объёме зубчатого венца, а также фазовым и структурным состоянием диффузионного слоя.

По отзыву проф. Прусакова Б.А. в работе [1] впервые поверхность после химико-термической обработки рассматривается по существу как композиционный материал. На рисунке 1 изображено характерное для зубчатого венца микростроение с зонами толщин слоёв после упрочнения типовыми режимами цементации и нитроцементации. Из этого рисунка видно, что упрочнение поверхностного слоя неоднородно. Важно выделить, что упрочнённый поверхностный слой во впадине на 15-20% дефектнее, чем на активных (рабочих) поверхностях. На рисунке 2 показана неравномерность толщины упрочнённого слоя по профилю зуба. Максимальная толщина слоя в верхней части головки зуба, а минимальная – во впадине между зубьями.

Проф. В.М. Зинченко [1] разработал систему конструкторско-технологических показателей оценки качества зубчатых колёс, отражающей зависимость их свойств от структурного состояния, что и составляет основу метода инженерии поверхности. В целом на основе инженерии поверхности потенциально возможно решить проблему значительного повышения и стабилизации прочности и долговечности зубчатых венцов на предельном уровне (в том числе и комбинированных зубчатых колёс с металлическими венцами).

Практика показывает, что в высоконагруженных передачах подавляющая часть разрушений зубчатых венцов начинается с рабочих поверхностей, так как этому способствует характер действующих нагрузок, а также особенности строения материала в поверхностном слое. Поверхностные рабочие слои зубчатых венцов в зацеплении при их эксплуатации нагружены более интенсивно, чем внутренние объёмы тела

зубьев, поэтому возникающие напряжения имеют максимальные значения в этих зонах и далее уменьшаются по сечению зуба. Напряжения в поверхностных слоях увеличиваются из-за действия различных концентраторов напряжений и контактного нагружения.

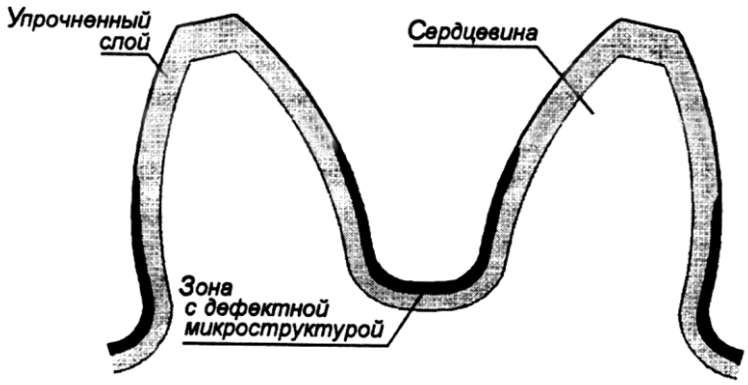


Рис. 1. Сформированный упрочнённый слой (оболочка) на металлическом зубчатом венце (воспроизводится из работы [1])

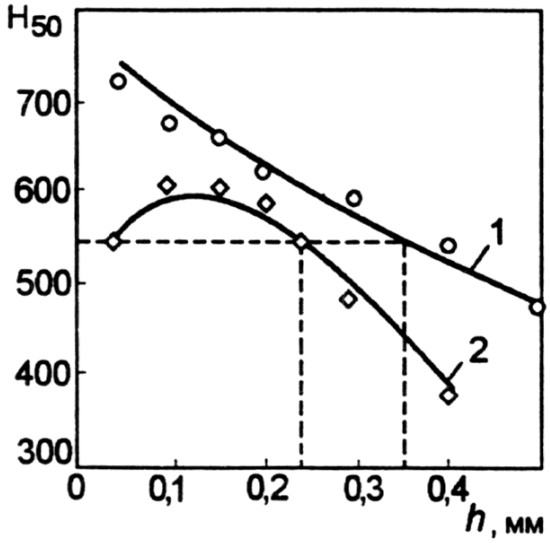


Рис. 2. Распределение микротвёрдости по толщине упрочнённого слоя нитроцементированного зубчатого колеса из стали 35Х в зоне рабочей поверхности “1” и в зоне впадины “2” (воспроизводится из работы [1])

“Значительно повышает нагруженность поверхности и поверхностных слоёв деталей нестационарность их напряжённо-деформированного и теплового состояния, возникающая под действием сил трения, инерции, температуры и т. п. При этом материал поверхности и поверхностного слоя (без специального упрочнения), как правило, обладает меньшей прочностью по сравнению с сердцевиной детали в связи с возникновением уже на стадии изготовления и упрочнения различного рода поверхностных

дефектов” [1]. На поверхности из-за разрыва кристаллической решётки материала получается нескомпенсированность связей между атомами, что приводит к возрастанию дефектности кристаллического строения и приводит к снижению структурной стабильности [2].

При изготовлении зубчатого венца на рабочих поверхностях образуется соответствующий микрорельеф (шероховатость), материал в поверхностных слоях подвергается пластической деформации, причём степень наклёпа на различных участках, а также толщина наклёпанного слоя, неравномерные. Также возникают остаточные напряжения в поверхностном слое вследствие изменения конфигурации и обработки изделия. Частичное улучшение даёт объёмная термическая обработка, однако практика показывает, что следует дополнительно использовать и химико-термические методы обработки с целью упрочнения именно поверхностного слоя, что приводит к повышению надёжности и долговечности зубчатых венцов.

Зубчатые венцы при эксплуатации “находятся в сложнонапряжённом состоянии под воздействием статических и динамических нагрузок, вибраций, пульсирующих тепловых потоков, вызывающих неравномерную упругую деформацию деталей, приводящую к искажениям их размеров и формы, накапливание микропластической деформации в поверхностных слоях, ускоренное диффузионное перемещение химических элементов, входящих в состав материала.

Все эти явления интенсифицируют процесс разрушения поверхностных слоёв зубчатых колёс. Учитывая комплексность данной проблемы, инженерию поверхности методами химико-термической обработки следует рассматривать как совокупность методов и средств целенаправленного конструирования композиционного строения поверхностного слоя с учётом его свойств и свойств сердцевины детали” [1].

В.М.Зинченко выделяет несколько задач инженерии поверхности.

Первой задачей является определение условий эксплуатации зубчатых колёс. На этой стадии при проектировании следует учесть число и характер колебаний нагрузок, которые в сочетании с дефектностью материала приводит к критической степени разрушения рабочей поверхности.

Второй задачей инженерии поверхности является разработка системы конструкторско-технологических показателей оценки качества. Важно определить зависимости функциональных свойств зубчатых колёс от их структурного состояния в различных зонах на поверхности и в поверхностных слоях.

В третью задачу входит обеспечение точности относительного расположения поверхностей в процессе их образования и упрочнения. Данный комплекс перечисленных задач формируют совокупность свойств зубчатых венцов для определённых условий эксплуатации, оцениваемый

принятой системой показателей и критериев.

В отдельную группу задач инженерии поверхности выделяется направление по созданию технологической базы, которая обеспечивает реализацию потенциальных возможностей выбранных методов упрочнения зубчатых колёс.

Решение всего комплекса вопросов инженерии поверхности зубчатых венцов позволит достичь стабильного обеспечения их предельных качественных свойств.

В современных малогабаритных зубчатых передачах используют достаточно широкий спектр материалов. К примеру, для приводов сервисных устройств и многофункциональной техники с целью снижения виброакустической активности при повышении удельной мощности передачи используют алюминиевые сплавы с поверхностно модифицированными оксидокерамическими покрытиями [3]. Такие покрытия формируют методом анодно-катодной микродуговой обработки. Это тоже вариант обеспечения поверхностных слоёв функциональных поверхностей зубчатых венцов с заданными параметрами качества.

Исследования, начатые в ИНДМАШ НАН Беларуси и продолженные в Объединенном институте машиноведения НАН Б, показали, что выбор рациональной топографии контактирующих поверхностей и состава многослойного композиционного покрытия с рациональным сочетанием свойств материалов и толщин слоёв для достижения статической и многоцикловой контактной усталостной прочности, а также трибологических параметров поверхностных слоёв, выбор рациональных технологических схем формирования многослойного композита на основе металлокерамики, приводит к снижению динамической нагруженности рабочих поверхностей зубьев, снижению виброакустической активности и надёжности, увеличению ресурса работоспособности при обеспечении снижения значений массогабаритных показателей. Использование модифицируемой оксидокерамики для создания поверхностного слоя позволяет снизить генерируемые шумы (по данным [3]) на 6 – 10 дБ и вибрации в 2-4 раза.

Другим современным потенциально оптимальным вариантом (в определённых условиях) является создание упрочняющего рабочего поверхностного слоя зубьев венца путём использования ультразвуковых технологий. В этом случае возможно достичь улучшения качества поверхностного слоя путём изменения микрорельефа поверхности и его уплотнения. Ультразвуковой инструмент в контакте с обрабатываемой поверхностью деформирует её в минимальных пределах, сглаживая, при этом, вершины микронеровностей и производит микронаклёп, упрочняя поверхностную структуру материала. Ультразвуковая технология обработки поверхностей основана на использовании энергии ультразвука и специфических свойств геоминералов природного происхождения в основе

своей обладающих пьезоэлектрическими свойствами. К примеру известно, что финишный проход ультразвукового наконечника при исходной шероховатости Ra = 6,3 мкм даёт поверхность с Ra = 0,1 мкм (10 класс). Ультразвуковым методом обрабатываются достаточно большое число используемых в промышленности марок сталей и цветных металлов (и их сплавов). К достоинству применения такой технологии относят: исключение применения абразивных материалов, уменьшение необходимых припусков на размеры в технологических операциях, обеспечение возможности нанесения покрытий различного назначения, в том числе и антифрикционных. Для упрочнения поверхностных слоёв зубчатого венца следует применять сменные инденторы из титановых сплавов с твёрдосплавными плоскими вставками. Акустическую головку (с инструментом) необходимо закрепить на подвижном держателе на станке с ЧПУ с целью обеспечения огибания (обкатки) по профилю зубчатого венца.

В данной технологии упрочнения рабочих поверхностей зубьев и впадин венца можно использовать универсальное оборудование (станки с числовым программным управлением) и промышленная универсальная ультразвуковая установка малой мощности (разработка и производство Северо-Западного Центра ультразвуковых технологий для различных видов изделий под руководством проф. Ю.В. Холопова) с двумя видами преобразователей электрической энергии в механическую (магнитострикционные и пьезоэлектрические).

В магнитострикционных преобразователях используют эффект магнитострикции, при котором ферримагнитные материалы изменяют линейные размеры в переменном поле.

Переменное магнитное поле вызывает механические колебания ультразвуковой частоты за счёт деформации магнитопровода в такт с частотой магнитного поля. Пьезопреобразователи преобразуют электрическую энергию в механическую за счёт использования пьезоэлектрического эффекта, при котором пьезоэлектрики изменяют линейные размеры под действием электрического поля. Выпускаются различные виды преобразователей: титановые, стальные и другие с излучателями со специальными покрытиями для увеличения их срока службы.

Еще одним методом улучшения контактной поверхности является ее пластическое деформирование с целью создания регулируемого микрорельефа, которое осуществляется вибронакатыванием [4]. Реализованная идея проф. Ю.Г. Шнейдера приводит к многим положительным качественным изменениям. Разработан и введен в действие ГОСТ, связывающий геометрические параметры с параметрами вибронакатки. Однако есть ограничения для зубчатых передач. Вибронакатчики не могут отработать поверхности зубьев у колес с

модулем менее 0.8 мм [5].

Именно поэтому в данной работе речь идет о малогабаритных редукторах, которые отличаются от мелкомодульных тем, что к ним относят передачи с модулями до 2...2,5 мм. В данных случаях термины приборные и малогабаритные редукторы следует рассматривать как синонимы. Основанием для этого можно считать, например, действующий отраслевой стандарт ОСТ5.8686-84 по нормированию параметров точности в судовом приборостроении, распространяющийся на колеса с аналогичными максимальными значениями модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колёс методом химико-термической обработки. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Баумана, 2001. - 303 с.
2. Дубинин Г.Н. Структурно-энергетическая гипотеза влияния диффузионного слоя на объёмные свойства сплавов // Защитные покрытия на металлах. Вып.10. 1976. - С. 86-90.
3. Басинюк В.Л., Мардосевич Е.И. Металлокерамические планетарные передачи // Материалы конференции Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы / Под ред. Е.В.Шалобаева. Изд. 2-е перераб. и доп. – СПб.: Светоч, 2003. - С.68.
4. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулируемым микрорельефом. Изд. 2-е, испр. и доп. - Л.: Машиностроение, 1982. - 248с.
5. Шалобаев Е.В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. №4. С.8-12.

V.M.Medunetsky, E.V.Shalobaev, R.R.Magdiev, K.N.Zaikin, D.G.Surikov

HARDENING OF FUNCTIONAL SURFACES FOR INCREASE OF RELIABILITY AND WORKING CAPACITY OF SMALL-SIZED TOOTH GEARINGS

National research university of information technology, mechanics and optics – NIU IFMO, St.-Petersburg, Russia

Abstract

In work the role of a blanket of working profiles of teeths is shown and the series of measures on its hardening is specified. The theory and practice show, what exactly blanket hardening allow to reach limiting operational properties

tooth gearings.

Keywords: surface engineering, surface hardening, himiko-thermal processing, plastic deformation.

REFERENCES

[1] Zinchenko V.M. Inzheneriya poverhnosti zubchatyih kolyos metodom himiko-termicheskoy obrabotki. - M.: izd-vo MGTU im. N.Baumana, 2001. - 303 p.
[2] Dubinin G.N. Strukturno-energeticheskaya gipoteza vliyaniya diffuzionnogo sloya na ob'Yomnyie svoystva splavov // Zaschitnyie pokryitiya na metallah. Vyip.10. 1976. - P. 86-90.
[3] Basinyuk V.L., Mardosevich E.I. Metallokeramicheskie planetarnyie peredachi // Materialyi konferentsii Reduktorostroenie Rossii: sostoyanie, problemyi, perspektivyi / Pod red. E.V.Shalobaeva. Izd. 2-e pererab. i dop. – SPb.: Svetoch, 2003. - P. 68.
[4] Shneyder Yu.G. Ekspluatatsionnyie svoystva detaley s reguliruemyim mikrorelefom. Izd. 2-e, ispr. i dop. - L.: Mashinostroenie, 1982. – 248 p.
[5] Shalobaev E.V. Mikrosistemnaya tehnika i mehatronika: osobennosti sootnosheniya mikro- i makrourovney // Mikrosistemnaya tehnika. 2000. № 4. P.8-12.

УДК 620.192

Е.Ю. Нефедьев [1], А.Д. Смирнов [2], В.П. Гомера [3]

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

[1]Евгений Юрьевич Нефедьев, к.ф.-м.н.,
НПО по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова
Россия, Санкт-Петербург
телефон: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04;
e-mail: ne246@ya.ru

[2]Анатолий Джамамуратович Смирнов, аспирант
НПО по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова
Россия, Санкт-Петербург
телефон: +7-812-578-88-04, факс: +7-812-271-12-04;, E-mail: kfnmpa@mail.ru

[3]Виктор Петрович Гомера, инженер
ОТН ООО «КИНЕФ»
Россия, г. Кириши, Ленинградская обл.
Тел.: .(813)6897276, E-mail: Gomera-V-P@yandex.ru

Аннотация

В работе рассматриваются методические приемы оценки данных АЭ контроля, которые позволяют повысить достоверность тестирования путем сочетания различных локационных алгоритмов и оценки результатов их применения. Интерпретация результатов АЭ контроля крупногабаритных сосудов и аппаратов, как правило, является нетривиальной задачей. Ее сложность тем выше, чем сложнее конструкция объекта контроля. В этом отношении кожухотрубные теплообменники являются одним из наиболее сложных объектов. В предложенном подходе реализуется возможность обнаружения дефектов в различных элементах конструкции – как в материале корпуса, так и в трубном пучке.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, теплообменник, планарная и трехмерная локация

Введение

Акустическая эмиссия – современный метод неразрушающего контроля [1-3]. Он хорошо развит для выявления трещин в случаях статиче-

ского разрушения, циклического разрушения и поиска течей [4-7]. Разработаны основные приемы для диагностики корпусных частей сосудов давления [8-10]. Однако при нагружении аппарата внутренним давлением сигналы АЭ могут исходить не только от источников (потенциальных дефектов) в материале корпуса, но и от источников, расположенных в элементах трубного пучка, занимающего практически все внутреннее пространство аппарата. Такие сигналы через испытательную среду (воду) передаются на корпус теплообменника и регистрируются установленными на нем датчиками как локационные события-артефакты.

В этом случае на корпусе могут быть локализованы несуществующие в действительности зоны АЭ активности, что приводит к непроизводительным работам при последующей инспекции соответствующих участков корпуса дополнительными методами НК. Сюда входит установка лесов или другие работы по организации доступа к нужному участку, вскрытие и восстановление изоляции, зачистка корпуса для подготовки к дополнительной диагностике, и сама диагностика, например, методом УЗК, результат которой, очевидно, будет отрицательным. Такие ситуации приводят к снижению эффективности АЭ контроля, а также к определенным репутационным потерям для метода.

Для решения этой проблемы предлагаются некоторые методические приемы анализа данных, которые позволяют разделить сигналы от разных элементов конструкции.

В свою очередь, решение задачи разделения сигналов открывает возможность для нового подхода к решению проблемы выявления на ранней стадии дефектов трубок и других элементов пучка. Данная проблема является актуальной для НПЗ. Так, например, доля теплообменников в структуре емкостного оборудования ООО КИНЕФ – 30,7%, а доля отказов, приходящаяся на их число – 91,8% (в период 2003-2007 гг.). При этом доля сквозного повреждения трубок среди причин отказов составляет 71,7%. Предлагается сигналы из внутренней области аппарата, ранее оцениваемые как помехи при АЭ контроле корпуса, использовать как полезную информацию о наличии и расположении дефектов трубного пучка.

Также предлагается способ оценки зон АЭ активности с организацией их градации по степени развития потенциальных дефектов для определения приоритета в проведении дополнительного контроля.

Полученные результаты могут быть использованы при создании методик АЭ контроля сосудов и аппаратов, содержащих внутренние устройства.

Методические приемы анализа локационных результатов АЭ контроля

1. Первый этап анализа. Разделение локационных источников по местоположению.

1.1. Массив зарегистрированных данных последовательно обрабатывается с помощью алгоритмов планарной и трехмерной локации, предполагающих расположение источников АЭ на корпусе и внутри аппарата соответственно. Отдельно решается задача выбора скорости распространения сигнала для каждого алгоритма (по обечайке и по межтрубному пространству). Далее проводится оценка достоверности локации. Для этого из массива данных извлекается информация о временной последовательности сигналов, формирующих отдельные АЭ события, и соответствующих расстояний, рассчитанных в рамках работы локационных алгоритмов. Вычисляются соотношения:

$$R(D_i) = \frac{Dst_{i+1}}{Dst_i},\ i = 1...N,\ N \geq 3, \qquad (1)$$

где Dst_i – вычисленное в рамках использованного локационного алгоритма расстояние от источника АЭ до i-ого датчика.

Полученные оценки позволяют отфильтровать события, для которых $(R(D_i)-1)<0$ для конкретного алгоритма, как явно некорректные для данной предполагаемой области их локализации. На этой основе можно провести первое разделения источников АЭ. События, для которых этот критерий не выполняется для обоих алгоритмов, удаляются из дальнейшего анализа.

1.2. Для данных, прошедших фильтр, на втором этапе проводится оценка степени корреляции между временными характеристиками (разность времен прихода сигнала на датчик) и соответствующими расстояниями. Для всех сигналов, входящих в локализованные АЭ события, вычисляются среднеквадратичные отклонения соотношений от корреляционной прямой (k=1):

$$ASD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(R_i - 1\right)^2},\ i = 1...N,\ N \geq 3, \qquad (2)$$

где $R_i = \frac{R(D_i)}{R(t_i)}$, $R(t_i) = \frac{t_1 + \Delta t_{i+1}}{t_1 + \Delta t_i}$, $t_1 = \frac{Dst_1}{V}$,

Δt_i – разность по времени прихода сигнала на 1-ый и на i-ый датчик, V – скорость распространения сигнала в среде.

Полученные значения параметра ASD используются в нескольких приложениях. Прежде всего, при сравнении данной характеристики для тех АЭ событий, для которых существует возможность локализации в обеих областях аппарата, определяется область наиболее вероятной локализации.

Программа в качестве входных данных использует результаты обработки исходных данных АЭ тестирования. Эта обработка может включать различные виды фильтрации и селекции по непосредственно измеряемым, а также сформированным экспертом характеристикам. В итоге формируются результаты планарной (2D) и трехмерной (3D) локации, которые используются в качестве входных данных программы. В ней происходит

объединение информации по двум видам локации с целью построения единой схемы оценки зарегистрированных АЭ источников и их локализации относительно элементов конструкции

Второе приложение параметра *ASD* – возможность разделения источников АЭ по природе происхождения в случае, если распределение АЭ событий по этому параметру характеризуется выраженной полимодальностью.

Третьей областью приложения значения *ASD*, как показано далее, является его использование в качестве одного из параметров на этапе оценки зон АЭ активности.

2. Второй этап анализа. Процедура градации участков АЭ активности по размерам потенциальных дефектов, расположенных в их площади/области.

На практике эта оценка служит, в основном, как критерий определения относительной целесообразности проведения дополнительного контроля выявленных участков АЭ активности. Для этого используется критерий *P(R)*, который вводится в виде выражения:

$$P(R) = 1 - (1 - P_{SCl})\,(1 - P_{Amp})\,(1 - P_{Cnt})\,(1 - P_{ASD})\,(1 - P_{Graf}) \qquad (3)$$

Значения P_{SCl}, P_{Amp}, P_{Cnt}, P_{ASD}, P_{Graf} – оценки каждого участка по следующим параметрам: размер кластера, средняя амплитуда событий, среднее значение по Counts (число осцилляций в импульсе), среднее значение событий по параметру *ASD*, положение на конструкции соответственно (Рис.1). Каждая из этих оценок сформирована как экспертная по результатам АЭ контроля более 600 сосудов давления и проверки результатов проведенного контроля. По мере обработки результатов новых испытаний продолжается работа по уточнению данных оценок.

Участки, для которых значение $P(R) \geq 0{,}85$, подлежат обязательной дополнительной проверке арбитражным методом НК.

Участки, для которых $0{,}85 \geq P(R) \geq 0{,}8$, проверяются выборочно. Для меньших значений *P(R)* дополнительный контроль не проводится.

Примеры использования предложенных методических приемов

Пример 1. АЭ контроль нижнего корпуса сырьевого теплообменника предварительной гидроочистки риформинга.

Технические характеристики обечайки: длина – 5280 мм; внутренний диаметр – 600 мм, толщина стенки – 16/25 мм, материал – сталь 16ГС.

На Рис.2 на развертке цилиндрической поверхности корпуса (вид снаружи) представлены формальные результаты планарной локации и результат использования соотношений вида (1) по разделению АЭ источников на истинные и ложные события. На этом этапе отфильтровано около 33,4 % ложных источников на корпусе (453 из 1356). На схеме указано точное положение сварных швов, опор и штуцеров, что позволяет использовать ее в

качестве полноценного графического фильтра при анализе положения источников АЭ активности. Затем была проведена оценка данных по параметру *ASD*. На Рис.3 представлены результаты обработки данных после исключения основного массива событий-артефактов. Использованный подход не выявляет, очевидно, все ложные события, но достаточно эффективен для практического АЭ контроля, поскольку позволяет отделить основную часть таких источников. В данном примере на схеме обечайки после фильтрации осталось 15,2 % АЭ событий от их первоначального количества.

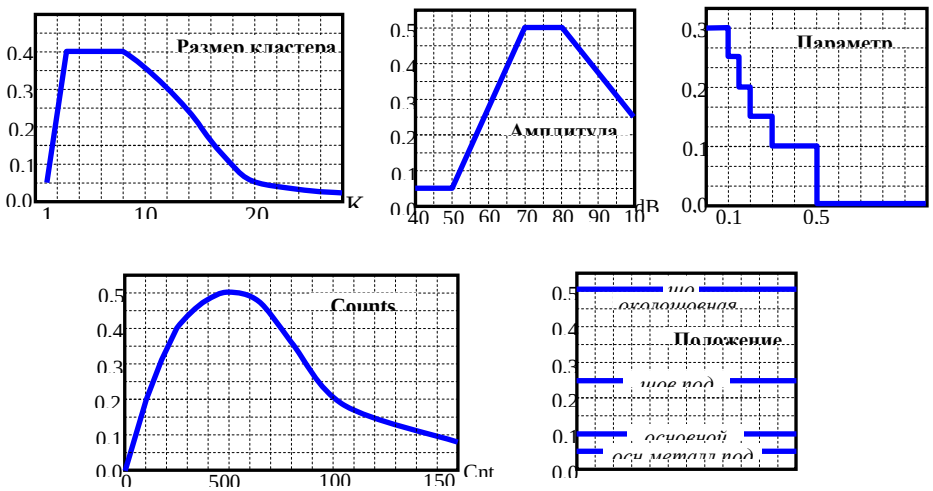


Рис. 1. Схема определения значений параметров, входящих в выражение для критерия *P(R)*

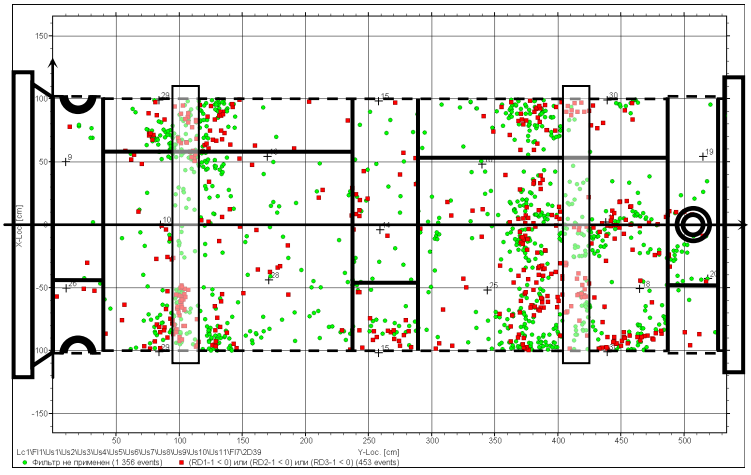


Рис. 2. Выделение среди формальных результатов планарной локации ложных АЭ источников (обозначены красными точками) на развертке цилиндрической поверхности корпуса теплообменника (вид снаружи)

Красным цветом и буквой «T» (True) обозначено положение зон для дополнительного контроля методом УЗК. Зоны синего цвета, обозначенные буквой «F» (False), содержали ложные (по отношению к корпусу) события. Если бы не применялась процедура по их выявлению, то особенности локализации таких источников относительно конструктивных элементов корпуса послужили бы причиной проведения во всех этих зонах дополнительного контроля.

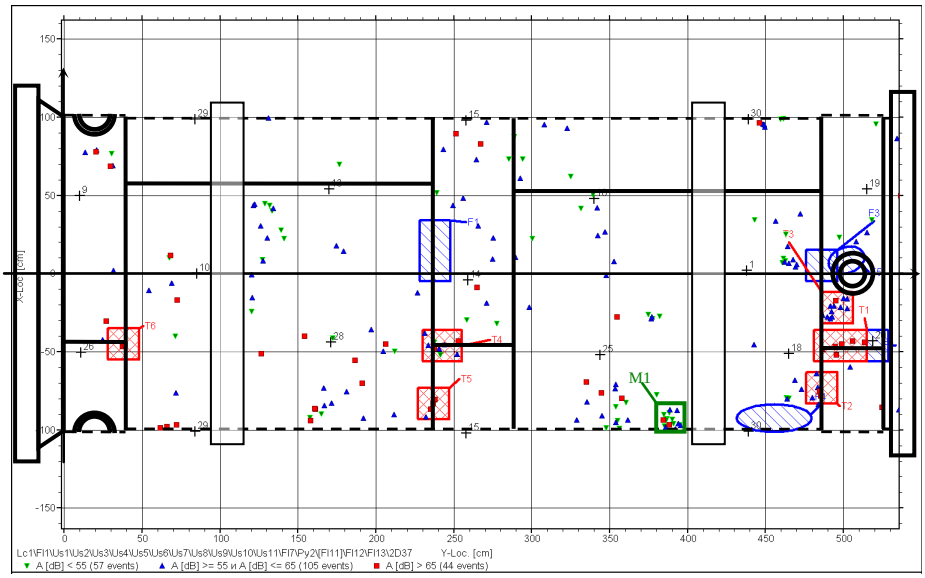


Рис. 3. Результаты локации после фильтрации данных от основного массива ложных событий и положение 6 участков для арбитражного контроля (с буквой «T» в обозначении)

На участках T2, T3, T4, T5 при проверке методом УЗК зарегистрированы дефекты в швах с размерами, допустимые согласно РДИ 38.18.016-94. На участке T1 выявлен дефект сплошности в корне шва на глубине 14-21 мм, являющийся недопустимым. Выявленный дефект был устранен, позднее была произведена замена этого теплообменника. Была также проведена контрольная проверка в зонах F2 и F3 (использовалась их близость к зонам группы «T»). Однако, как и ожидалось, дефектов в них обнаружено не было.

Предварительно зоны потенциального дополнительного контроля оценивались по критерию *P(R)*. Результаты представлены в таблице (зона M1 – участок основного металла).

Из данных таблицы следует, что результаты дополнительного контроля хорошо согласуются с оценкой зон АЭ активности по критерию *P(R)*.

Пример 2. АЭ контроль корпуса сырьевого холодильника установки гидроочистки бензина. Технические характеристики. Обечайка: длина – 8040 мм; внутренний диаметр – 1200 мм, толщина стенки – 30 мм, матери-

ал корпуса – сталь 16ГС. Трубный пучок: количество трубок – 408 шт., внутренний диаметр – 25 мм, толщина – 2 мм, материал – сталь 08Х22Н6Т.

Таблица

Обозначение участка	Кол-во АЭ событий	Среднее значение			P_{Graf}	$P(R)$
		Амплитуда	Счет(Counts)	*ASD*		
T1	6	78,2	246	0,13	0,5	0,94
T2	6	63,2	142	0,08	0,5	0,89
T3	12	61,0	107	0,06	0,5	0,86
T4	9	57,4	69	0,07	0,5	0,85
T5	4	66,2	134	0,10	0,5	0,90
T6	2	67,7	158	0,06	0,5	0,89
M1	17	55,4	61	0,07	0,1	0,38

Данный пример иллюстрирует применения программы идентификации сигналов АЭ, генерируемых различными элементами конструкции. В результате ее работы удалось разделить источники, расположенные на корпусе и относящиеся к внутренним устройствам. На схеме развертки корпуса (рис. 4) Зона 1 классифицирована как зона истинных АЭ событий относительно корпуса.

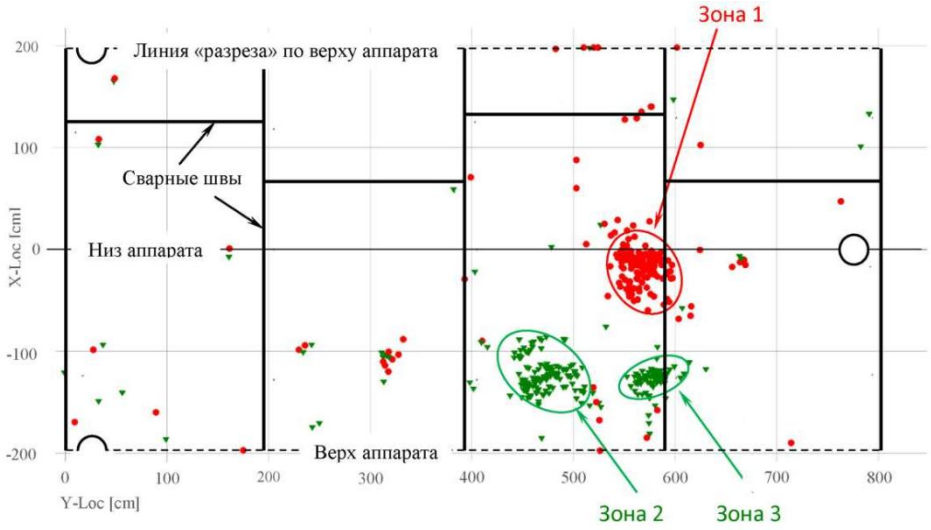


Рис. 4. Схема развертки корпуса холодильника гидроочистки с результатами обработки данных программой, координирующей действие различных локационных алгоритмов. Зона 1 связана с регистрацией АЭ источников, расположенных на корпусе; образование Зоны 2 и Зоны 3 связано с регистрацией АЭ активности в элементах трубного пучка.

Она соответствует расположению участка значительного коррозионного повреждения и язвенной коррозии корпуса с внутренней стороны.

Зоны 2 и 3 относительно корпуса являются участками кластеризации локационных артефактов, однако являются «проекциями» на корпус реальных АЭ событий, генерируемых во внутреннем устройстве аппарата. На рис. 5 показана локализация этих событий в пучке при трехмерной локации.

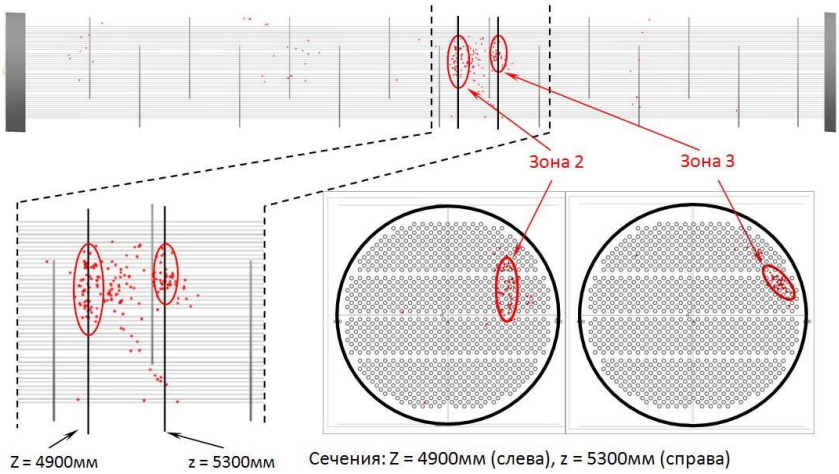


Рис. 5. Схема расположения зон АЭ активности в области трубного пучка сырьевого холодильника, связанных с коррозионным повреждением групп близкорасположенных трубок

На момент проведения АЭ контроля здесь находились участки коррозионного повреждения нескольких соседних трубок, но без образования сквозного дефекта. В дальнейшем, в результате развития дефектов под действием эксплуатационных факторов, произошла перфорация нескольких трубок, пучок был заменен.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что существует принципиальная возможность одновременно с традиционной АЭ диагностикой корпуса теплообменника регистрировать наличие дефектов в элементах его трубного пучка.

Выводы

Предложенные методические приемы анализа данных, предназначенные для разделения источников АЭ по их расположению в технологических аппаратах, содержащих внутренние устройства, и для градации зон АЭ активности позволяют:

1. Повысить достоверность АЭ контроля корпусов т/о оборудования (достоверность НК – показатель, связанный с вероятностью принятия безошибочных решений о наличии или отсутствии дефектов), и, следовательно,

2. Сократить количество участков дополнительного контроля по ре-

зультатам АЭ и, соответственно, временные и материальные затраты на подготовку и проведение этих работ.

3. Рассмотреть перспективы применения АЭ метода для локализации и ранней диагностики дефектов элементов трубного пучка теплообменного оборудования по результатам одновременного комплексного АЭ контроля аппаратов.

Предложенный подход к анализу данных АЭ тестирования теплообменников можно распространить на другие виды технологических аппаратов, содержащих внутренние устройства (колонны с тарелками, электродегидраторы и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая Эмиссия Издательство Стандартов. М., 1976, 272 с.
2. Правила применения метода акустической эмиссии при проведении контроля котлов, сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов. ПБ 03-593-03. М. 2003.
3. В.И. Иванов, И.Э. Белов. Метод акустической эмиссии. Справочник в 7т. Под общ. Ред. В.В. Клюева., т. 7б, М.: Машиностроение, 2005, - 825с.: ил.
4. Связь размеров микротрещин с параметрами акустической эмиссии и структурой деформированной роторной стали / Нефедьев Е.Ю. [и др.] // Дефектоскопия – 1986. – N 3. – С. 41-44.
5. Контроль роста усталостной трещины в литой стали методом акустической эмиссии / Нефедьев Е.Ю.[и др.]/ / Проблемы прочности. – 1987. – N 1.– С.41-44.
6. Ковалев Д.Н., Нефедьев Е.Ю., Ткачев В.Г. Акустико-эмиссионный контроль испытаний стальной гофрированной трубы при циклическом и статическом нагружении // 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. 382-390.
7. Нефедьев Е.Ю. Использование метода акустической эмиссии с применением спектрального анализа сигналов для определения параметров течи в трубопроводах ИТЕР // 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. 347-355.
8. V.P. Gomera, V.L. Sokolov and V.P. Fedorov, Implementation of Acoustic Emission Method to the Conventional NDT Structure in Oil Refinery In: Journal of Acoustic Emission (Acoustic Emission Group, Ehcino, CA, USA) - Vol.26 (2008), p.279-289.

9. Кабанов Б.С., Соколов В.Л., Гомера В.П., Федоров В.П. – Опыт применения акустико-эмиссионного метода для контроля сосудов давления – «Химическая техника» - № 4/2011 - стр. 12-15.
10. J.Catty, “Acoustic Emission Testing - Defining a new standard of acoustic emission testing for pressure vessels. Part 1: Quantitative and comparative performance analysis of zonal location and triangulation methods”, Journal of Acoustic Emission, 27(2009), pp.299-313

E. Nefedyev[1], A. Smirnov[1], V.Gomera[2]

DEVELOPMENT OF METHODS TO INCREASE EFFICIENCY AE CONTROL OF HEAT EXCHANGERS

[1]St. Petersburg, Central Boiler and Turbine Institute (CKTI), Russia,
[2]Kirishi, Leningrad region LLC, Ltd «KINEF», Russia

Abstract

There are considered the methods of estimation of AE data control, which allow to increase reliability of testing by combining different location algorithms and evaluation of the results of their application. Interpretation of results AE control of large-sized vessels and devices, as a rule, is no trivial task. Its complexity is the higher, the more complex the design of the control object. In this respect, shell-and-tube heat exchangers are one of the most complicated objects. The suggested approach implements the detection of defects in design, as in the case material, and in the tube bundle.

Key words: acoustic emission, heat exchanger, planar and three-dimensional location

REFERENCES

[1] Greshnikov V.A., Drobot J.B. Acoustic Emission. Standards Publishing House. M., 1976, 272 p. (rus.)
[2] Rules of the method of acoustic emission application during inspection of boilers, vessels, apparatus and process piping. ПБ 03-593-03. M. 2003. (rus.)
[3] V.I. Ivanov, IE Belov. The method of acoustic emission. Reference . Ed. by V.V. Klyuev , v. 7, M: machine-building, 2005, 825 p. (rus.)
[4] Connection sizes of microcracks with the acoustic emission parameters and structure of deformed steel rotor / Nefedyev E.J. [and other]/ / Defectoscopy - 1986. - N 3. - p. 41-44. (rus.)

[5] The control of the fatigue cracks growth in cast steel method of acoustic emission / Nefedyev E.J. [and other]/ / Problems of strength. - 1987. - N 1.- P.41-44. (rus.)
[6] Kovalev D.N., The Nefedyev E.J., V.G. Tkachev Acoustic emission control testing of steel corrugated pipes of circular and static loading // Modern engineering. Science and education: Materials of the 2nd international. nauch.-practical use. conference. / Ed. by M.M. of Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb.: Publishing house Politechn. 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 pipeline ITER // Modern engineering. Science and education: Materials of the 3rd international. nauch.-practical use. conference. / Ed. by M.M. of Radkevich and A.N. Evgrafova. - SPb.: Publishing house Politechn. University, 2013. - P. 347-355. (rus.)
[8] V.P. Gomera, V.L. Sokolov and V.P. Fedorov, Implementation of Acoustic Emission Method to the Conventional NDT Structure in Oil Refinery In: Journal of Acoustic Emission (Acoustic Emission Group, Ehcino, CA, USA) - Vol.26 (2008), p.279-289.
[9] The Experience of application of acoustic emission technique for the inspection of pressure vessels /Kabanov VS, Sokolov V.L., Homer VP, V.P. Fedorov //- "Chemical engineering" - № 4/2011 - pp. 12-15. (rus.)
[10] J.Catty, “Acoustic Emission Testing - Defining a new standard of acoustic emission testing for pressure vessels. Part 1: Quantitative and comparative performance analysis of zonal location and triangulation methods”, Journal of Acoustic Emission, 27(2009), pp.299-313

УДК 62-333.2

В. А. Пискунов

О ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЛИНЕМЕТА

Владимир Александрович Пискунов, бакалавр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)-585-20-57, E-mail: vildan.05@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрена конструкция и принцип действия пневматического линеметательного устройства (линемета), а также общая механика движения частей линемета и удар колпака о направляющую быстродействующего клапана. Это необходимо для обеспечения прочности устройства.

Ключевые слова: пневматическое линеметательное устройство, линемет, быстродействующий пневматический клапан, запорный колпак, уравнения Лагранжа, волновое уравнение.

Объектом исследования данной статьи послужило пневматическое линеметательное устройство (линемет) для заброса спасательного конца в необходимые зоны. К линемету как профессиональной спасательной технике предъявляются повышенные требования по надежности и безопасности.

Чаще используются пороховые линеметы как более простые и дешевые. Но они менее безопасны и не способны совершить много выстрелов – в отличие от пневматических. Однако стоит отметить, что пневматические приборы достаточно дорогие [1], и производством таких изделий занимаются лишь 3-4 фирмы в мире. Рассматриваемый прибор «Иста-240» является профессиональным морским спасательным линеметом, единственным продуктом производства РФ в данной области.

При постановке и решении задач динамики и прочности в данной работе используется механика Лагранжа и теория упругости [2,3], а также методы математической физики [4].

Общий вид линемета представлен на рис. 1.

Для описания динамики движущихся частей представим расчетную схему данного прибора на рис. 2.

Сжатый воздух давлением 60Атм подается из баллона через редукционный клапан по каналу 1 под колпак. В следствие избыточного

давления P_2 колпак садится на резиновое седло. Далее через кольцевой зазор (40 мкм) между колпаком и направляющей сжатый воздух поступает в камеру высокого давления(V_1) пускового устройства (M_2). Давления P_1 и P_2 статически уравновешивают друг друга. Шток, жестко связанный с гильзой, в этот момент находится в крайнем правом положении.

Рис. 1. Общий вид линемета

После нажатия на спусковой крючок, открывается золотник, сжатый воздух из-под колпака сбрасывается через канал 2.

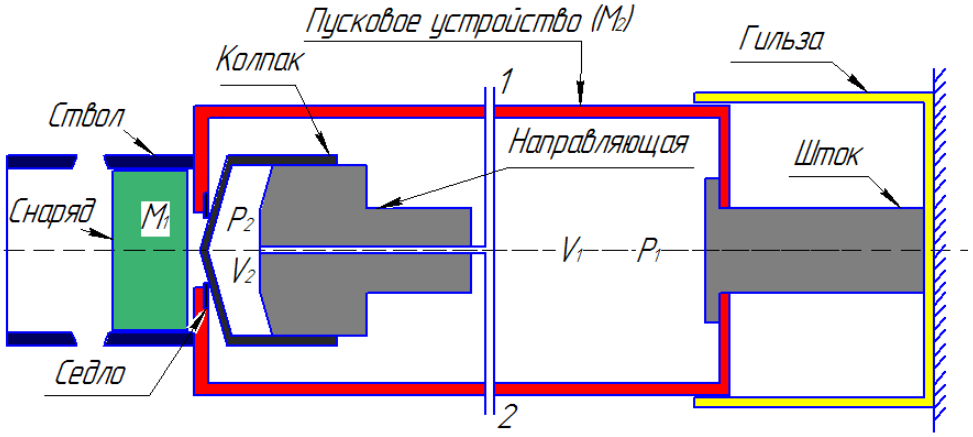


Рис. 2. Расчетная схема линемета

Давление в рабочей камере P_1 начинает действовать на кольцевую коническую поверхность колпака и заставляет колпак двигаться в осевом направлении по направляющей. Сжатый воздух разгоняет снаряд (M_1) в стволе. Одновременно с этим начинает двигаться пусковое устройство, и малая часть сжатого воздуха сбрасывается в атмосферу через кольцевой зазор между гильзой и пусковым устройством, тем самым создавая воздушную пружину, растягивая отдачу по времени. В конце своего движения колпак ударяется о направляющую. В следствии малого диаметра отверстия в направляющей сбрасываемый воздух в объеме V_2 создает воздушную пружину между колпаком и направляющей.

Далее обратимся к расчету общей динамики системы.

Имеем три тела: снаряд (масса m_1), пусковое устройство (ПУ, m_2) и колпак (m_3). Движение тел поступательное (рис. 2). Координатами являются абсолютные перемещения: снаряда (x_1, налево), ПУ (x_2, направо) и колпака (x_3, направо).

Для описания движения системы составим уравнение Лагранжа 2-го рода:

$$(\frac{\partial K}{\partial \dot{x}_i})^{\cdot} - \frac{\partial K}{\partial x_i} = Q_i - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i}. \quad (1)$$

Здесь левые части определяются кинетической энергией

$$K = \frac{1}{2}(m_1\dot{x}_1^2 + m_2\dot{x}_2^2 + m_3\dot{x}_3^2). \quad (2)$$

В правых частях – обобщенные силы с выделенными потенциальными слагаемыми.

Рассматривая движение под действием только давления сжатого газа, будем иметь $Q_i = 0, \Pi = \Pi(V)$ – функция от объема газа. Потенциальную энергию можно определить из следующих соотношений:

$$V = V_0 + S_1(x_1 + x_2) + S_3(x_3 - x_2), \quad (3)$$

$$p = -\frac{\partial \Pi}{\partial V}, \quad pV^{\gamma} = p_0V_0^{\gamma}. \quad (4)$$

В геометрическое соотношение (3) входят начальный объем V_0, площадь сечения ствола S_1 и площадь под колпаком S_3. Формулы (4) содержат давление p и соответствуют адиабатическому процессу. Проинтегрировав (1.4) получаем:

$$\Pi = -\frac{p_0V_0^{\gamma}}{1-\gamma}V^{1-\gamma}. \quad (5)$$

В правую часть следует подставить (3).

Подставляя выражения (2, 5) в уравнения Лагранжа (1), приходим к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 = p(V)S_1, \ p(V) = p_0(V_0/V)^{\gamma}, \ V(x_i) \leftarrow (3), \\ m_2\ddot{x}_2 = p(V)(S_1 - S_3), \\ m_3\ddot{x}_3 = p(V)S_3. \end{cases} \quad (6)$$

Но эту систему можно упростить, поскольку

$$m_1\ddot{x}_1 - m_3\ddot{x}_3 = m_2\ddot{x}_2, \ \frac{m_1}{S_1}\ddot{x}_1 = \frac{m_3}{S_3}\ddot{x}_3 \quad (7)$$

При нулевых начальных условиях здесь можно перейти к скоростям и координатам. Тогда

$$x_3 = \frac{m_1S_3}{m_3S_1}x_1, \ x_2 = (1 - \frac{S_3}{S_1})\frac{m_1}{m_2}x_1. \quad (8)$$

В итоге получаем единственное ОДУ:

$$m_1\ddot{x}_1 = S_1 p_0 V_0^{\gamma}(V_0 + ax_1)^{-\gamma},\ a = S_1 + \frac{m_1}{S_1}\left(\frac{(S_1 - S_3)^2}{m_2} + \frac{S_3^2}{m_3}\right). \quad (9)$$

Это уравнение решается аналитически, но проще – численно.

Заметим: пусковое устройство должно двигаться направо. Но так будет лишь при $S_1 > S_3$.

Соударению колпака с направляющей соответствует условие

$$x_3 - x_2 = \Delta\ - \quad (10)$$

заданный начальный зазор.

Рассмотрев вопрос с общей динамикой системы, перейдем к более сложному вопросу с ударом колпака о направляющую.

Рассмотрим простую расчетную схему двух стержней с деформацией растяжения-сжатия (рис. 3).

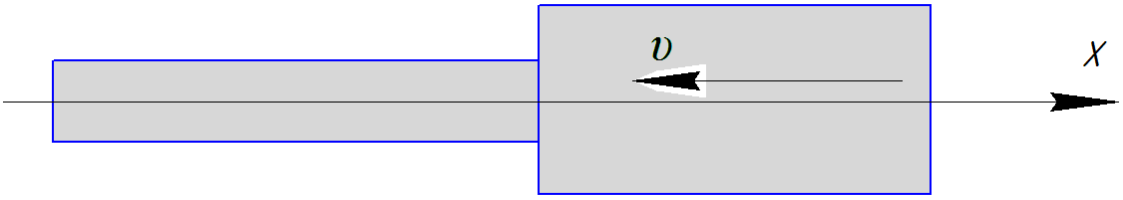


Рис. 3. Расчетная схема соударения двух стержней

Левый стержень ($x < 0$) – это направляющая. Правый ($x > 0$) – колпак, в предельно упрощенном виде.

Для перемещения $u(x,t)$ в обоих стержнях при отсутствии объемных сил имеем одно и то же волновое уравнение:

$$c^2 u'' = \ddot{u},\ c = \sqrt{E/\rho}. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$t = 0:\ u = 0,\ \dot{u} = \begin{cases} 0, x < 0 \\ -v, x > 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Граничные условия:

$$\begin{array}{l} x = 0: u,\ Su' \text{ непрерывны}; \\ x = -l_1,\ x = l_2 : u' = 0 \end{array}. \quad (12)$$

Здесь S – площадь сечения: S_1 слева и S_2 справа. Длины l_1, l_2.

Однако из курсов математической физики [4] известно, что можно рассматривать полубесконечный стержень, пока волна не дошла до конца ($t < l/c$). Для расчета начальной стадии процесса достаточно условий ограниченности при $x \to \pm\infty$.

Применяя операционный метод, введем изображение – преобразование Лапласа:

$$\bar{u}(x,p) = \int_0^{\infty} u(x,t)e^{-pt}dt;\ \bar{\dot{u}} = p\bar{u} - u(x,0).$$

Преобразуя уравнение (10) и учитывая начальные условия (11), получим

$$c^2\bar{u}'' = \begin{cases} p^2\bar{u}, x<0 \\ p^2\bar{u}+v, x>0 \end{cases}. \quad (13)$$

Решая ОДУ, константы найдем из граничных условий. Используем условия при $x=0$:

$$A = B - v/p^2,\ S_1 A\frac{p}{c} = -S_2 B\frac{p}{c} \Rightarrow B(1+\frac{S_2}{S_1}) = \frac{v}{p^2},\ A = -B\frac{S_2}{S_1}. \quad (14)$$

Таким образом, для перемещений «в колпаке» имеем

$$\bar{u} = \frac{v}{p^2}(-1+\frac{S_1}{S_1+S_2}e^{-px/c}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u(x,t) = -vt + \frac{vS_1}{S_1+S_2}\begin{cases} 0, t < x/c \\ t - x/c, t > x/c \end{cases}. \quad (15)$$

Использовали теорему запаздывания.

Условное выражение в (15) перепишем с функцией Хэвисайда:

$$u(x,t) = -vt + \frac{vS_1}{S_1+S_2}(t-x/c)h(t-x/c). \quad (16)$$

В таком виде удобно дифференцировать, определяя деформацию $\varepsilon = u'$. Появляется дельта-функция ($h'(x)=\delta(x)$), а у нее есть свойство: $f(x)\delta(x-a) = f(a)\delta(x-a)$ (если f непрерывна). Поэтому

$$u' = \frac{-vS_1}{(S_1+S_2)c}[h(t-x/c)+(t-x/c)\delta(t-x/c)] = \frac{-vS_1}{(S_1+S_2)c}h(t-x/c). \quad (17)$$

Тогда напряжение

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{-vS_1\sqrt{E\rho}}{S_1+S_2}h(t-x/c). \quad (18)$$

Приходим к полезной простой формуле для силы удара по колпаку

$$F = v\frac{S_1S_2}{S_1+S_2}\sqrt{E\rho}. \quad (19)$$

Итак, в статье описаны устройство и работа линемета и решены две задачи динамики его элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимов В.Н. Пневматическое оружие. Справочник. М.: ДАИРС, 2006. 175 с.
2. Елисеев В.В. Механика упругих тел. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 336 с.
3. Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. М.: Наука, 1985. 304 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.

V.A. Piskunov

ABOUT THE STRENGTH OF PNEUMATIC LINE-THROWER CONSTRUCTIVE ELEMENTS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article considers the construction and the operation principle of the pneumatic line-throwing device (line-thrower) as well as the general mechanics of the line-thrower parts movement and the cap impact against the fast-acting valve guideway. This is necessary to assure the appliance strength.

Key words: pneumatic line-throwing device, line-thrower, fast-acting pneumatic valve, locking cap, Lagrange's equations, wave equations.

REFERENCES

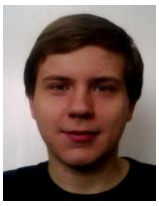
[1] Trofimov.V.N. Pnevmaticheskoe orugie. Directory. M.: DAIRS, 2006. 175 p. (rus.)
[2] Eliseev V.V. Mekhanika uprugih tel. – SPb.: SPbGPU, 2003,336 p. (rus.)
[3] Kravchuk A.S., Mayboroda V.P., Urzhumcev Y.S. Mekhanika polimernyh i kompozicionnyh materialov. M.: Nayka, 1985. 304 p. (rus.)
[4] Tihonov A.N., Samarskyi A.A. Uravneniy matematicheskoy fiziki. M.: Nayka, 1972. 735 p. (rus.)

УДК.621.81

С.К.Руднев, А.С. Иванов, М.М. Ермолаев

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

(Работа выполнена по гранту РФФИ 12-08-01-047а)



Сергей Кириллович Руднев, студент МГТУ им Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (916)258-63-79 E-mail: serezharudnev@yandex.ru

Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (917)501-50-88, E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

Михаил Михайлович Ермолаев, аспирант
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (916)579-78-62, E-mail: mmermolaev@gmail.com

Аннотация

В работе предложены расчёты частот собственных нормальных и качательных колебаний резьбовых соединений, обусловленных податливостью контактного слоя. Приведены результаты эксперимента, подтвердившего справедливость расчётов.

Ключевые слова: собственные частоты, контактная податливость

При создании точных [9, 11] или малошумных [1,4] машин требуется знать собственные частоты колебаний конструкции. Из-за шероховатости поверхностей стыка деталей, стягиваемых винтами, возникают колебания, собственная частота которых обусловлена упругими деформациями микронеровностей. В данной работе приводится расчет этих собственных частот колебаний, основанный на ранее проведенных исследованиях контактной податливости плоских стыков [3, 5, 6, 7, 12] и резьбовых соединений [5], описано экспериментальное исследование, цель которого – проверка правильности этого расчета, даны некоторые результаты вычислений и сформулированы рекомендации по конструированию резьбовых соединений, вытекающие из анализа результатов расчетов.

Как известно, собственные частоты продольных колебаний ν_a, Гц, и качания ν_θ, Гц, деформируемой системы (рис. 1) зависят [1, 4, 6, 10] от продольной j_a, Н/мм, и угловой j_θ, Н·мм/рад, жесткостей системы, а также от колеблющейся массы m, кг, и ее момента инерции I_m, кг·мм^2, относительно нейтральной оси стыка:

$$\nu_a = (j_a/m)^{0,5}/(2\pi); \quad (1)$$

$$\nu_\theta = (1000\, j_\theta/I_m)^{0,5}/(2\pi). \quad (2)$$

При упругих деформациях микронеровностей поверхностей стыка деталей, стягиваемых винтами, продольную и угловую жесткости резьбового соединения, входящие в выражения (1), (2), можно оценить, используя формулы

$$j_a = A/[(k_p\varepsilon + \lambda_д A)(1 - \chi_F)]; \quad (3)$$

$$j_\theta = I/[(k_p\varepsilon + \lambda_д A)(1 - \chi_M)], \quad (4)$$

где A и I – площадь и момент инерции стыка; k_p – коэффициент контактной податливости стыка; ε – коэффициент влияния масштаба, зависящий от наибольшего размера l контактных поверхностей и чистоты их обработки: при $l < 50$ мм $\varepsilon = l/50$; при $l = 50$ мм $\varepsilon = 1$; при $l > 50$ мм $\varepsilon > 1$ и определяется по формулам работ [3, 4, 8]; $\lambda_д$ – податливость стягиваемых деталей; χ_F – коэффициент основной нагрузки при растяжении; χ_M – коэффициент основной нагрузки от опрокидывающего момента.

Согласно работе [5], коэффициент контактной податливости в формулах (3) и (4)

$$k_p = 0,5Rac_0/(E\sigma_{зат})^{0,5},$$

где $Ra = (Ra_1^2 + Ra_2^2)^{0,5}$ – средняя арифметическая высота микронеровностей контактирующих поверхностей; c_0 – параметр, учитывающий вид обработки контактной поверхности [6], в большинстве случаев равный [5] 355 при повторных нагружениях и приблизительно 1400 при первичном нагружении; E – приведенный модуль упругости материала фланцев; $\sigma_{зат} = zF_{зат}/A$ – давление в стыке от силы $F_{зат}$ затяжки винтов (z – число винтов).

Податливость стягиваемых деталей толщиной соответственно h_1 и h_2 составляет $\lambda_д = (h_1 + h_2)/(EA)$. Выражения для коэффициентов основной нагрузки при растяжении и от опрокидывающего момента имеют вид [7]:

$$\chi_F = (\lambda_{ст} + \lambda_д)/(\lambda_{ст} + \lambda_д + \lambda_в/z);$$

$$\chi_M = (\lambda_{ст} + \lambda_д)/\{\lambda_{ст} + \lambda_д + \lambda_в I/[A\cdot\Sigma(z_i x_i^2)]\},$$

где $\lambda_{ст} = k_p\varepsilon/A$ и $\lambda_в = [(0,5d_в + l_0)/(\pi d_в^2) + (0,5d_в + l_1)/(\pi d_3^2)]4/E_в$ –

податливости стыка и винта, $E_в$ – модуль упругости винта; $d_в$, d_3 – наружный и внутренний диаметры его резьбы (причем $d_3 = d_в - 1{,}227P$, где P – шаг резьбы); l_0, l_1 – длины гладкой и нарезной деформируемых его частей.

Момент завинчивания вычисляется по формуле

$$T_{зав} = F_{зат}\,[\mathrm{tg}(\varphi'+\psi)d_2/2 + f_т d_т/2],$$

где $\varphi' = \mathrm{arctg}\,(f_р/\cos\gamma)$ – приведенный угол трения (здесь $f_р$ – коэффициент трения в резьбе, $\gamma = 30^o$ – угол наклона рабочей грани профиля резьбы); $\psi = \mathrm{arctg}\,[P/(\pi d_2)]$ – угол наклона винтовой линии по среднему диаметру резьбы $d_2 = d - 0{,}5P$; $f_т$ – коэффициент трения на торце гайки; $d_т = 1{,}2d$ – средний диаметр торца гайки.

Нами проведено исследование, связанное с определением собственной частоты продольных колебаний резьбового соединения. Для этого были изготовлены две модели соединения. Первая модель (рис. 1, *а*) состояла из двух втулок высотой $h_1 = h_2 = 25$ мм диаметрами: наружным $D_0 = 35$ мм,внутренним $d_0 = 13$ мм, со средней арифметической высотой микронеровностей торцевых поверхностей $Ra_1 = Ra_2 = 2{,}5$ мкм. Модель стягивали болтом М12. Вторая модель (рис. 1, *б*) отличалась от первой наличием между торцами втулок шайбы толщиной 3 мм с такой же средней арифметической высотой микронеровностей торцевых поверхностей, как и у втулок. Масса соединения составила в обоих случаях $m = 0{,}45$ кг. Эксперимент проводился на затянутом резьбовом соединении (затяжкой гайки осуществлялось первичное нагружение) при моментах завинчивания 8,8 и 17,6 Н·м, что соответствовало силам затяжки 5 и 10кН.

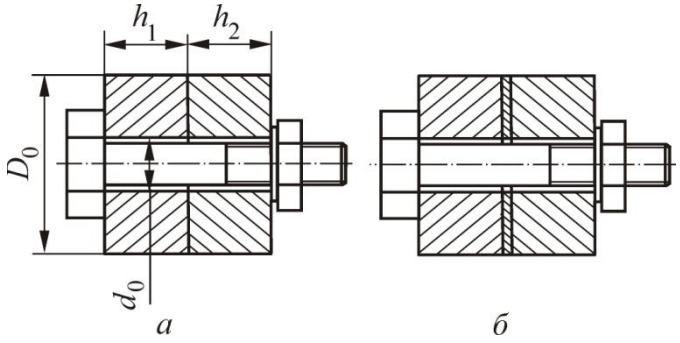


Рис. 1. Модели, предназначенные для экспериментального исследования частоты продольных колебаний резьбового соединения

В осевом направлении по одному из торцов втулки наносили удар, а на противоположном торце пьезоэлектрическим акселерометром фирмы

«Брюль и Къер» (рис. 2) измеряли частоту ν_a колебаний системы (рис. 3).

Рис. 2. Эксперимент

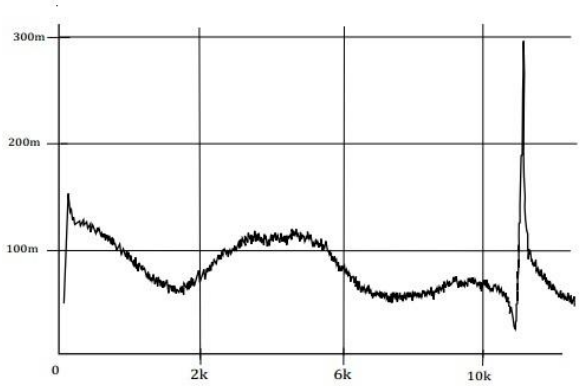


Рис. 3. Пример полученной осциллограммы при $Ra_1 = Ra_2 = 2{,}5$ мкм и $F_{зат} = 10$ кН

$$\nu_{ap} = (4j_a/m)^{0,5}/(2\pi). \quad (5)$$

Экспериментально измеренную собственную частоту колебаний сопоставляли с расчетной ν_{ap}, а также с основной частотой $\nu_{aст}$ продольных колебаний стержня, концы которого свободны [1], и длина $L = h_1 + h_2$:

$$\nu_{aст} = 10^6(E/\rho)^{0,5}/(2L), \quad (6)$$

где ρ – плотность материала втулок.

Для $F_{зат} = 5$ и 10 кН соответственно получили: при испытаниях первой модели $\nu_a = 10{,}7$ и 11,47 кГц; $\nu_a = 9{,}58$ и 11,07 кГц. При расчете по формуле (5) соответствующие значения составили $\nu_{ap} = 13{,}66$ и 14,99 кГц для первой модели и 11,56 и 12,51 кГц для второй модели. При вычислении по формуле (6) получили $\nu_{aст} = 52$ кГц. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных (рис. 4) показывает, что значения ν_{ap} и ν_a близки друг другу, а$\nu_{aст}$ и ν_a резко различаются, что подтверждает необходимость учета при расчете резьбовых соединений контактной жесткости стыка, вычисляемой по формулам (3), (4).

Приведем некоторые примеры резьбовых соединений и результаты расчетов их собственных частот колебаний.

На рис. 5, *а* схематично представлена шпиндельная головка. Расчетная схема резьбового соединения этой головки с корпусом изображена на рис. 5, *б*. Шпиндельная головка имела наружный и внутренний диаметры фланца $D_1 = 222$ и $D_2 = 171$ мм, диаметр расположения винтов $D_в = 196$ мм. Фланец был притянут к основанию шестью винтами М10. Резьба была

смазана ($f_р = f_т = 0,1$). Толщины фланца и основания:$h_1 = 21$ мм, $h_2 = 10$ мм. Масса шпиндельной головки 100 кг. Расстояние центра масс шпиндельной головки от плоскости стыка $L_0 = 10$ мм. Экспериментальным путем выявлено наличие резонансной частоты шпиндельной головки, равной 0,63 кГц.

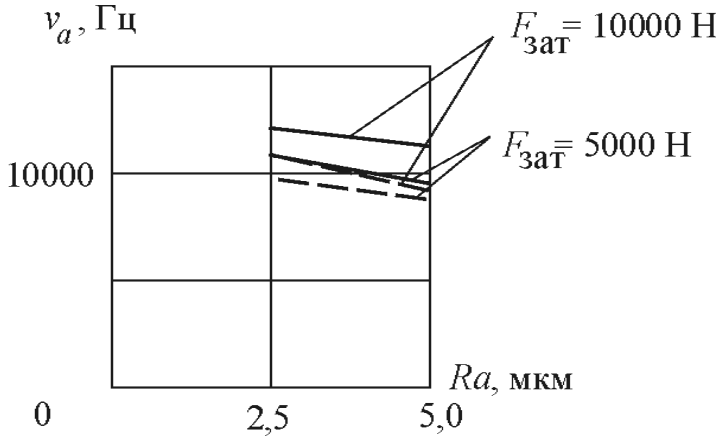


Рис. 4. Зависимость частоты продольных колебаний модели от средней арифметической высоты микронеровностей стыка. Сплошные линии – эксперимент, пунктир – результаты расчета

На рис. 5, *в* представлен пьезоэлектрический акселерометр 8305 фирмы «Брюль и Къер» [2]. Его масса – 0,04 кг. Корпус датчика стальной. Диаметр опорной поверхности датчика $D_1 = 15,5$ мм; средняя арифметическая высота ее микронеровностей 0,25÷1,6 мкм. Датчик закрепляют на исследуемом изделии с помощью шпильки М4 (точнее, шпилькой с американской мелкой резьбой 10–32 NF), прикладывая момент завинчивания 1,6 Н·м. В паспортных данных указана резонансная частота датчика, по-видимому, полученная экспериментально, равная 30 кГц.

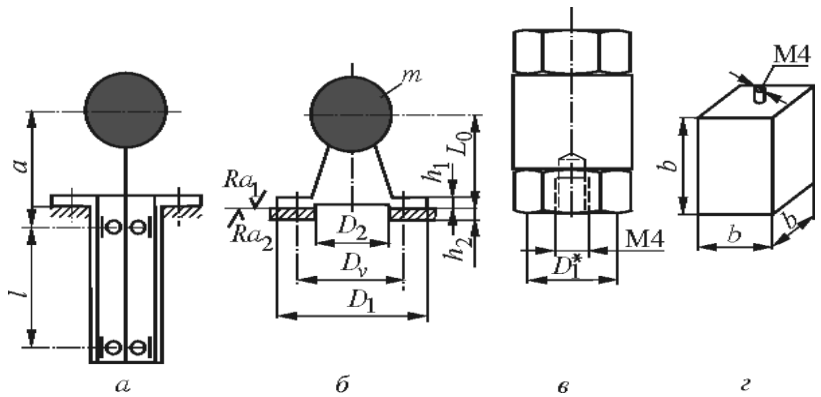


Рис. 5. Резьбовые соединения: *а* – схема шпиндельной головки; *б* – расчетная схема ее резьбового соединения;
в – пьезоэлектрический акселерометр; *г* – переходник

На рис. 5, *г* изображен переходник, предназначенный для соединения пьезоэлектрических акселерометров с исследуемым изделием. Он имеет форму куба со стороной b = 25 мм, изготовлен из стали, имеет массу 0,12 кг и соединяется с изделием шпилькой М4. Средняя арифметическая высота микронеровностей 0,25÷1,6 мкм. Экспериментальным путем выявлено наличие резонансной частоты переходника, равной 20 кГц.

Результаты расчетов собственной частоты угловых колебаний резьбового соединения шпиндельной головки с корпусом и собственной частоты продольных колебаний резьбовых соединений пьезоэлектрического акселерометра, а также переходника при закреплении их на изделии представлены соответственно на рис. 6, *а*, *б*, *в*. Графики отражают зависимость собственных частот колебаний от средней арифметической высоты *Ra* микронеровностей стыка и момента $T_{зав}$ завинчивания. Видно, что расчетные значения частот близки полученным экспериментально.

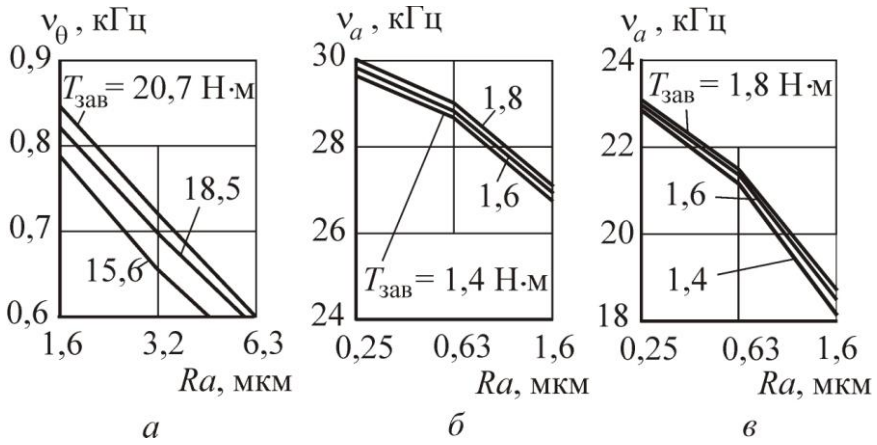


Рис. 6. Частоты свободных колебаний: *а* – угловая шпиндельной головки; *б* – продольная пьезоэлектрического акселерометра; *в* – продольная переходника

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бидерман В.Л.* Прикладная теория механических колебаний: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1972. – 416 с.
2. *Брюль и Къер*. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям.1978. – 111 с.
3. *Буданов Б.В., Кудинов В.А., Толстой Д.М.* Взаимосвязь трения и колебаний // Трение и износ. – 1980. №1. – С. 79 – 89.

4. *Ден-Гартог Дж. П.* Теория колебаний.– М.-Л.: Гостехиздат, 1942. – 464 с.
5. *Иванов А.С., Измайлов В.В.* Расчет контактной деформации при конструировании машин //Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. №8. – С. 3 − 10.
6. *Иванов А.С.* Нормальная, угловая и касательные контактные жесткости плоского стыка. // Вестник машиностроения.–2007. №7. – С. 34 – 37.
7. *Иванов А.С.* Контактная жесткость неподвижных соединений деталей машин. Автореферат диссертации доктора техн. наук. М.:МГТУ им Н.Э.Баумана, 2006.–32с.
8. *Иванов А.С., Ермолаев М.М.* Влияние волнистости шероховатых поверхностей на их контактную жесткость. // Известия ВУЗов: Машиностроение. – 2012. Спец.выпуск. – С. 8 – 16.
9. *Левина З.М. Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин. – М: Машиностроение, 1971. – 264 с.
10. *Решетов Д.*Н. Детали машин: Учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1972.– 416 с.
11. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков.– М.: Машиностроение, 1986.– 336 с.
12. *Толстой Д.М., Борисова Г.А., Григорьева С.Р.* Роль собственных контактных колебаний нормального направления при трении. // Сборник “О природе трения твердых тел”, Минск: Наука,1971. – С. 116 − 126.

S.K.Rudnev, A.S. Ivanov ,M.M. Ermolaev

THERESEARCHANDCALCULATIONOFOWNVIBRATIONFREQUENCIESOFTHREADEDCONNECTIONS

Bauman Moscow State Technical University

Abstract

The proposed forms of determination of the frequencies of normal and swinging fluctuationsthreaded connections caused by the flexibility of the contact layer. The results of the experiment shows the justice of theoretical methods.

Key words: natural frequency, contact compliance

REFERENCES

[1] Biderman V.L. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebaniy: Ucheb. Posobie dlya vuzov.– M.: Mashinostroenie, 1972. – 416 p.

[2] Bryul' i K"er. Spravochnik po p'ezoelektricheskim akselerometram i predusilitelyam.1978. – 111 p.

[3] Budanov B.V., Kudinov V.A., Tolstoy D.M. Vzaimosvyaz' treniya i kolebaniy //Trenieiiznos. – 1980. №1. – P. 79 – 89.

[4] Den-Gartog Dzh. P. Teoriya kolebaniy. – M.-L.: Gostekhizdat, 1942. – 464 p.

[5] Ivanov A.S., Izmaylov V.V. Raschet kontaktnoy deformatsii pri konstruirovanii mashin // Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. –2006.№8. – P.3 −10.

[6] Ivanov A.S. Normal'naya, uglovaya i kasatel'nye kontaktnye zhestkostiploskogo styka. // Vestnikmashinostroeniya. –2007. №7. – P.34 – 37.

[7] Ivanov A.S. Kontaktnaya zhestkost' nepodvizhnykh soedineniy detaley mashin. Avtoreferat dissertatsii doktora tekhn. nauk. M.: MGTU im N.E. Baumana, 2006. – 32 p.

[8] Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Vliyanie volnistosti sherokhovatykh poverkhnostey na ikh kontaktnuyu zhestkost'. // Izvestiya VUZov: Mashinostroenie. – 2012. Spets.vypusk. – P.8 – 16.

[9] Levina Z.M. Reshetov D.N. Kontaktnaya zhestkost' mashin. – M: Mashinostroenie, 1971. – 264 p.

[10] Reshetov D.N. Detali mashin: Ucheb. dlya vuzov. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 416 p.

[11] Reshetov D.N., Portman V.T. Tochnost' metallorezhushchikh stankov. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 336 p.

[12] Tolstoy D.M. Borisova G.A. Grigor'eva S.R. Rol' sobstvennykh kontaktnykh kolebaniy normal'nogo napravleniya pri trenii. // Sbornik “O prirode treniya tverdykh tel”, Minsk: Nauka,1971. –P.116 −126.

УДК 669:621.01

M.A. Skotnikova, A.A. Lanina, N.A. Krylov, G.V. Tsvetkova, N.V. Bezenkin

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATION IN MATERIAL OF STEAM TURBINES BLADES AFTER HIGH-SPEED MECHANICAL EFFECT

Скотникова Маргарита Александровна, д.т.н., профессор
Ланина Александра Александровна, к.т.н., вед. инженер
Крылов Николай Александрович, к.т.н., доцент
Цветкова Галина Викторовна, к.т.н., доцент
Безенкин Николай Валентинович, аспирант

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-64-29, E-mail: Skotnikova@mail.ru

Abstract

By methods optical and electronic microscopy, tests for microhardness investigate substructure changes and the mechanisms of destruction occurring in materials of blanks - samples from titanium alloys PT-3V, OT4, VT6, VT-23, tested at speeds of deformation $10^5 \ldots 10^6$ s^{-1}. It is shown, that the compressing shock wave modulates a material structure, breaking it on mezo-volumes by the size 100…400 microns, under which boundaries the unloading wave, connecting rotational (rotary) modes, makes located adiabatic shears.

Keywords: steam turbines, titanium alloy, structural and phase transformation, electron microscopy.

1 Introduction

The high-speed deformation is a modern high-efficiency way of metal materials treatment. In various fields of the industry with success energy of explosion and other methods of reception of shock waves for are ductile, press forming and cutting treatment of materials is used. However, today in the field of mechanical engineering have remained not solved a series of problems on high-speed interaction of solid bodies, for example, on "erosion" of steam blades in result effect of blows by pair drops, intensive wear of cutting edge of instrument at increase of speed of cutting treatment over the certain level. It is possible to believe, what is it occurs because of localization of plastic deformation in blank metal in a zone of contact to the instrument. In practice most difficultly treated the titanium alloys, especially, two-phase of martensite class, that is caused by their low heat conduction, high contact temperatures,

high propensity to structural and phase transformations at deformation are considered.

2 Experiment

By methods of an optical metallography, transmission and scanning electronic microscopy, test for microhardness investigate substructural changes of samples occurring in a material from titanium alloys PT-3V, OT4, VT6, VT-23 tested at speeds of deformation $10^5 \ldots 10^6$ s^{-1}. Tests have been executed with use of plane blanks - samples processed by a shock wave with the help of a pneumatic gun, explosion and the cutting tool.

2.1 Cutting Treatment of Titanium Alloys

The treatment of titanium alloys PT-3V and VT-23 was carried out by a hard- alloy cutter T15K6 without lubrication with a feed speed S = 0,26 mm/revolutions and cutting depth t = 3mm, in a range of cutting speeds 2…120 m / mines. The geometrical parameters of a cutter made corners: $\varphi = 45°$; $\varphi_1 = 15°$; $\alpha = 6°$; $\gamma = 12°$.

2.1.1 Morphology of Chip

As it is visible from Fig. 1a, at increase of speed of cutting treatment blank from titanium alloy VT-23, the linear wear of the tool was much higher, in comparison with treatment of steel HVG or aluminum alloy AMz. Thus it was

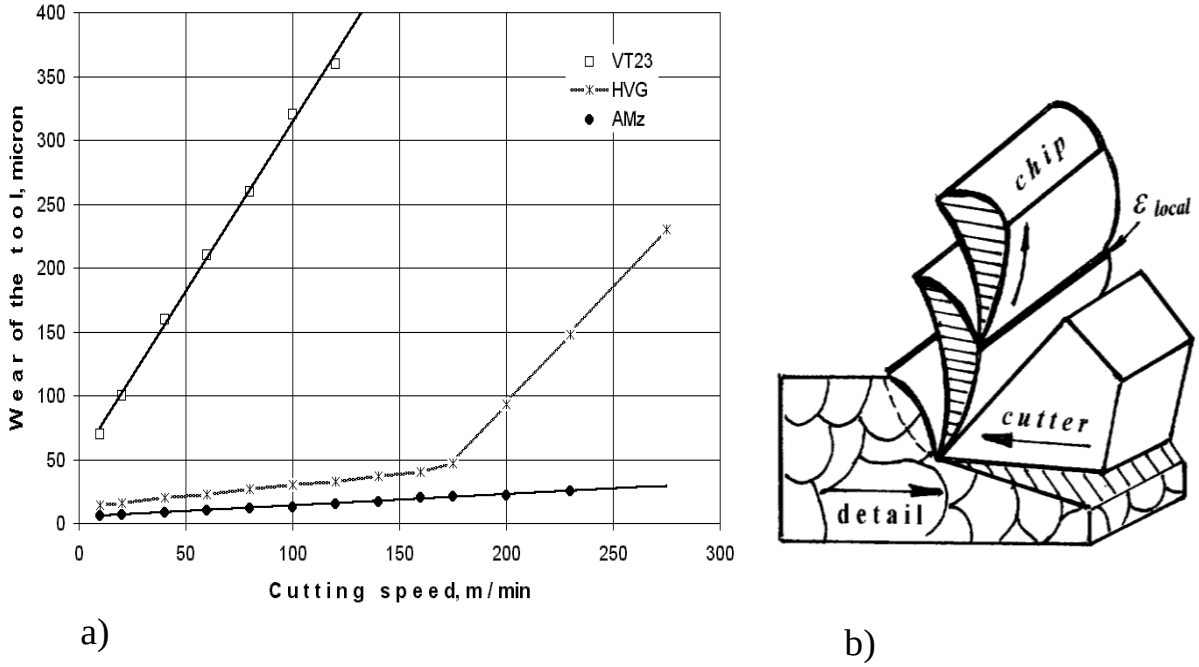


Fig. 1. Wear of tool with increase of speed cutting treatment of alloys VT-23 (1), HVG (2), AMz (3), (a). The scheme of «adiabatic shift» chip formation (strong localization of plastic deformation) (b).

formed chip local (adiabatic) shear with traces of localization of plastic deformation (ε_{local}), Fig. 1b. The period of localization (width of chip segments) on the average 300…400 microns.

2.1.2 Structure of Chip Metal

The structure of blank from titanium alloy VT-23 in an initial state represented colonies of parallel plates of α- phase, disjointed interlayers of β-phase, Fig. 2c. At cutting treatment, beginning already from speed 2 m / mines, the inhomogeneous plastic deformation, its strong localization in narrow iterating with a period 300…400 microns volumes of metal on the mechanism of formation of a superfine structure, Fig. 2d, took place.

As have shown results of scanning electronic microscopy, free surfaces of chips from alloys VT-23 (Fig. 2b) and PT-3V (Fig. 2a) were formed on the rotational mechanism with attributes of destruction in conditions local adiabatic shear.

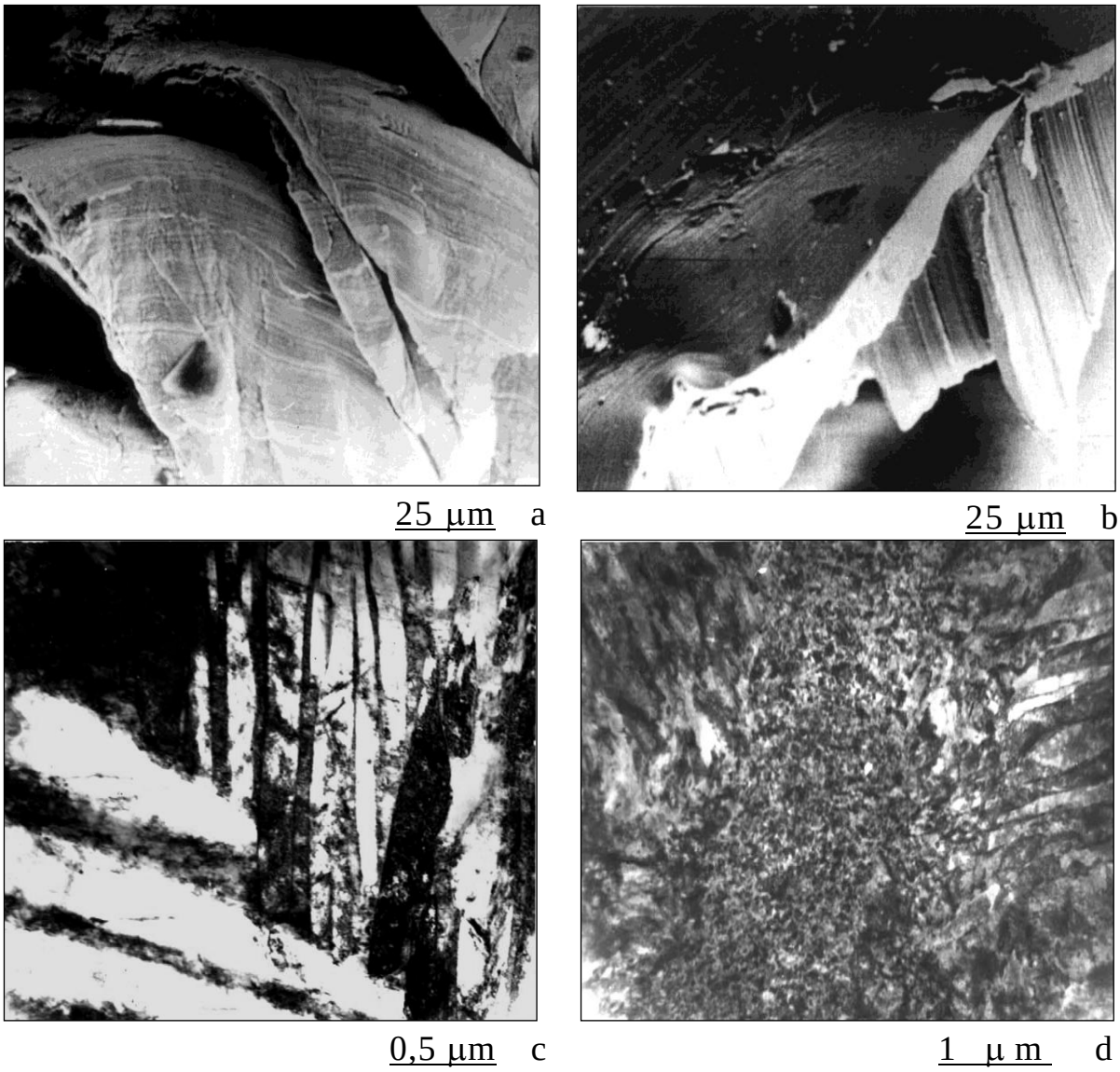


Fig. 2**.** Reference photos of chips surface from alloy VT-23 (b) and PT-3V (a). Structure of chip from alloy VT-23 before (c) and after (d) cutting treatment with speed 120 m/min.

2.1.3 Estimate of Chip Microhardness

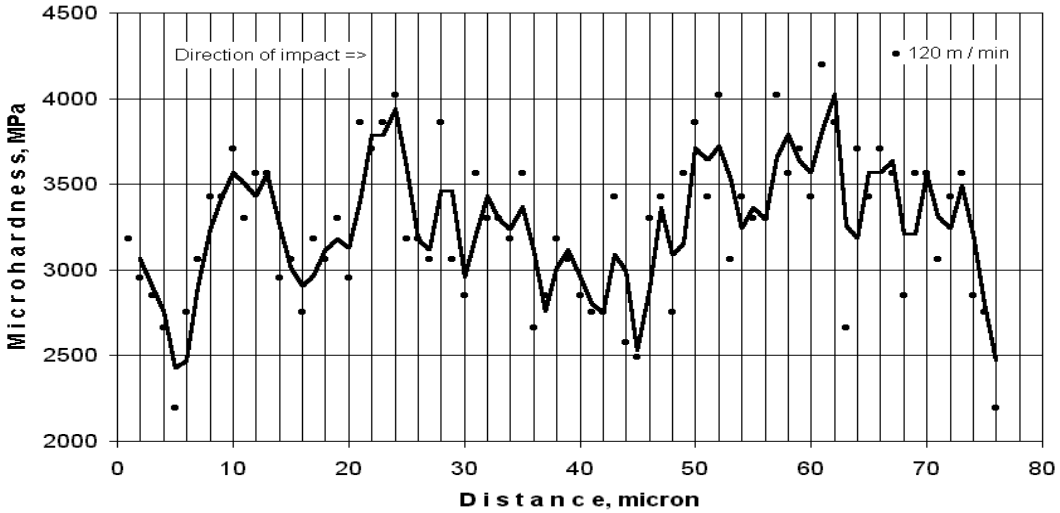


Fig. 3. Distribution of microhardness in chip metal from alloy VT23 along a direction of movement of cutter in with speed 120 m/minutes.

The microhardness testings were made in chip metal from alloy VT23 along a direction of movement of cutter in with speed 120 m/min, with an interval 20 microns at loading of 20 grams. Results of microhardness testing of chips had wavy character, is especial close their free edge, Fig. 3. The maximal values of microhardness had on places of an articulation of segments of chips, in which with the help of transmission electronic microscopy the localization of plastic deformation on the mechanism of formation of narrow zones has been earlier found out by a superfine structure. Here absolute values of microhardness for alloys VT-23 reached 4381 MPa at average hardness of chips and metal in an initial condition, accordingly 3761 and 3903 MPa.

It is necessary to note, that the specified changes of structure, Fig. 2d and modulation of microhardness, Fig. 3, near to free edge of chip were more essential, than in at cutter zone that testified to passage there more intensive relaxation processes.

Thus, the cutter at the movement along treated blank material forms a wave of compression which modulates material structure, dissecting it on mezo-volumes by the size 300…400 microns. Having reflected from a surface of blank material, the unloading wave of the plastic deformation providing connection of rotational (rotary) modes of plastic deformation and making located adiabatic shears along the boundaries educated mezo- volumes is formed. Dissipative modulation of structure and microhardness in titanium alloys could be the reason of decrease of tool wearproofity.

2.2 Shock Stressing of Titanium Alloys

The treatment by a shock wave was carried out in a material of plane blanks - samples from two-phase ($\alpha+\beta$) titanium alloys OT4, VT6 and VT-23, tested by anvil block, or blast wave [1-4]. Thus blanks have been finished with full destruction with education of two free surfaces or cavities.

2.2.1 Morphology of Destruction of Blanks Material after Shock Stressing

On Fig. 4 the photo and the scheme of destruction of blank - sample from alloy VT6, by the treated shock wave with speed 568 m/s are submitted. It is visible, that formed turnpike the crack was parallel to a free surface of a target and had the step form. It is possible to allocate three stages (3 zones) destructions.

Zone 1 - "epicenter" of shock wave in diameter no more than 15 mm, in which characteristic viscous "tunnels" focused along a direction of impact were formed. *A zone 2* – ring-shaped "periphery" of a shock wave. Probably, in this zone was transversal spreading of wave of compression to loss of speed and energy. *A zone 3* - "final destruction".

There were, that the surfaces of breaks having at a macro-level antisymmetric character, at micro- level did not coincide. Took place disposal of material, it is especial in a zone 2, Fig. 4. After termination of testing, the surface "destroyed" parts appeared straightened, (the internal stresses were removed), and the "basic" part of the blank saved a strong camber.

On Fig. 5 (a-f) electron microscope photos of breaks and cross-section "destroyed" and "basic" of parts of the blank in zones 1 and 2 are submitted. It is visible, that in a break of the destroyed blank on mezo- level were formed components of a breaking-off round forms by the size 100…200 microns (Fig. 5, a, d) and 300…400 microns (Fig. 5, f), accordingly, in a zone 1 and in a zone 2. Such mezo-volumes have been internally broken on more shallow micro components too round forms 10…40 microns (Fig. 5, c, e). Such viscous sites of metal of the destroyed blank could be generated as a result of the rotational mechanism of plastic deformation along narrow micro channels, which direction coincided with a direction of operation of the maximal stress. Along the boundaries of such channels the superfine, structural single-phase condition was

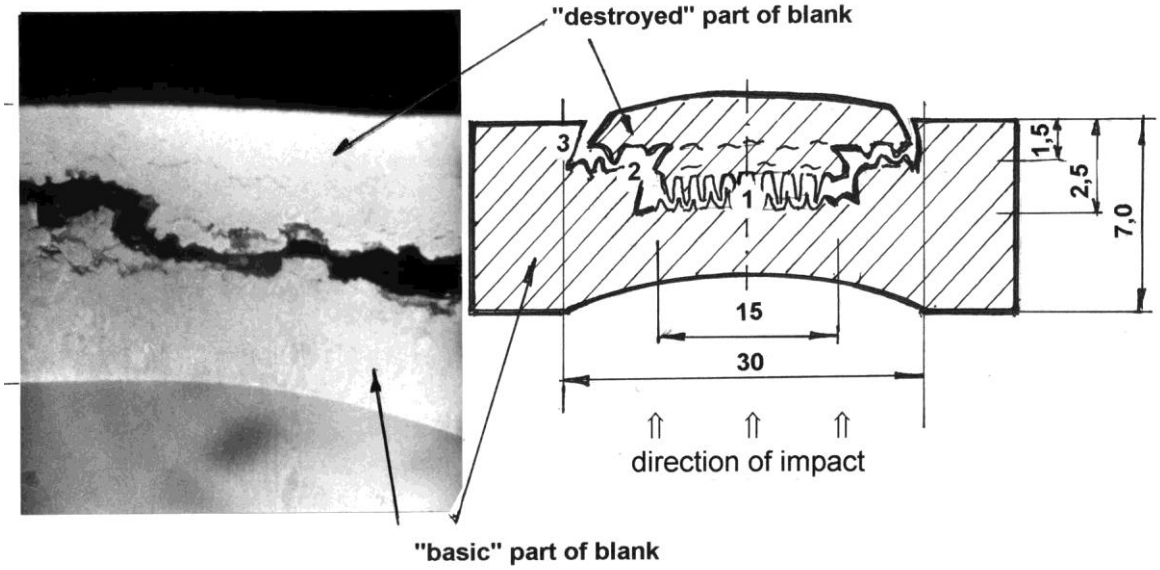


Fig. 4. A photo of share section "destroyed" and "basic" of parts of the blank.
The scheme of destruction of plane metal blank at shock stressing with a speed 568 m/s.
Sizes are specified in mm.

formed (in an initial condition of a two-phase alloy), as etching of fracture surface in such sites, presence of the second β- phase component has not revealed, (Fig. 5 b).

It is possible to believe, that at the high-speed treatment, the compressing shock wave modulates a structure of blank material, breaking it on mezo-volumes by the size 100…400 microns, (Fig. 5 d, f) under which boundaries the unloading wave, connecting rotational (rotary) modes, makes located adiabatic shears (Fig. 5, b) and destruction.

2.2.2 Estimation of Microhardness of Blank Metal after Shock Stressing

On Fig. 6 results of microhardness testing with an interval 20 microns are submitted at loading of 20 grams, in blank metal from alloy VT6 after treatment by a shock wave with speed 568 m/s. Measurements have been executed starting from edge of "basic" blank part on a trace of movement of wave in the central and peripheral field on distance of 4 mm from the center, in both cases at level of zone 1. Absolute values of microhardness in the center and on periphery reached on the average 4413 and 3996 MPa, accordingly, at average hardness of sample metal in an initial condition 2416 MPa.

Apparently from Fig. 6, results of measurement of microhardness after shock stressing had wavy character with the size of a half wave 100…200 microns. In comparison with central, the peripheral wave on distance of 4 mm from the center was in an antiphase and thus, they were self-consistent in mezo-volume 100…200 microns (zone 1).

Similar comparative results have been received and at level of zone 2. Peripheral wave on distance of 11 mm from the center, was self-consistent with central less often, but the size of such volumes increased up to 300…600 microns.

2.2.3 A Structure of Blank Metal after Shock Stressing

Structure of blanks metal from alloys OT4, VT6 and VT-23, tested anvil block and a blast wave investigated with the help of transmission electronic microscopy, Fig. 7. Results have shown, that with increase of speed of shock wave, took place localization of plastic deformation, to which decomposition of enriched solid solutions always preceded. In all investigated materials in boundary layers generated mezo-volumes, interlayers of β- solid solution under operation of shock wave, were exposed to fractional or decomposition (dissolution) in result $\beta \rightarrow \alpha$- transformation. In such places the structure from fine grains of different orientation which had the heightened microhardness was formed and yielded in condition of microdiffraction "ring" electronogrames, Fig. 7a, origin of micro-cracks here was observed.

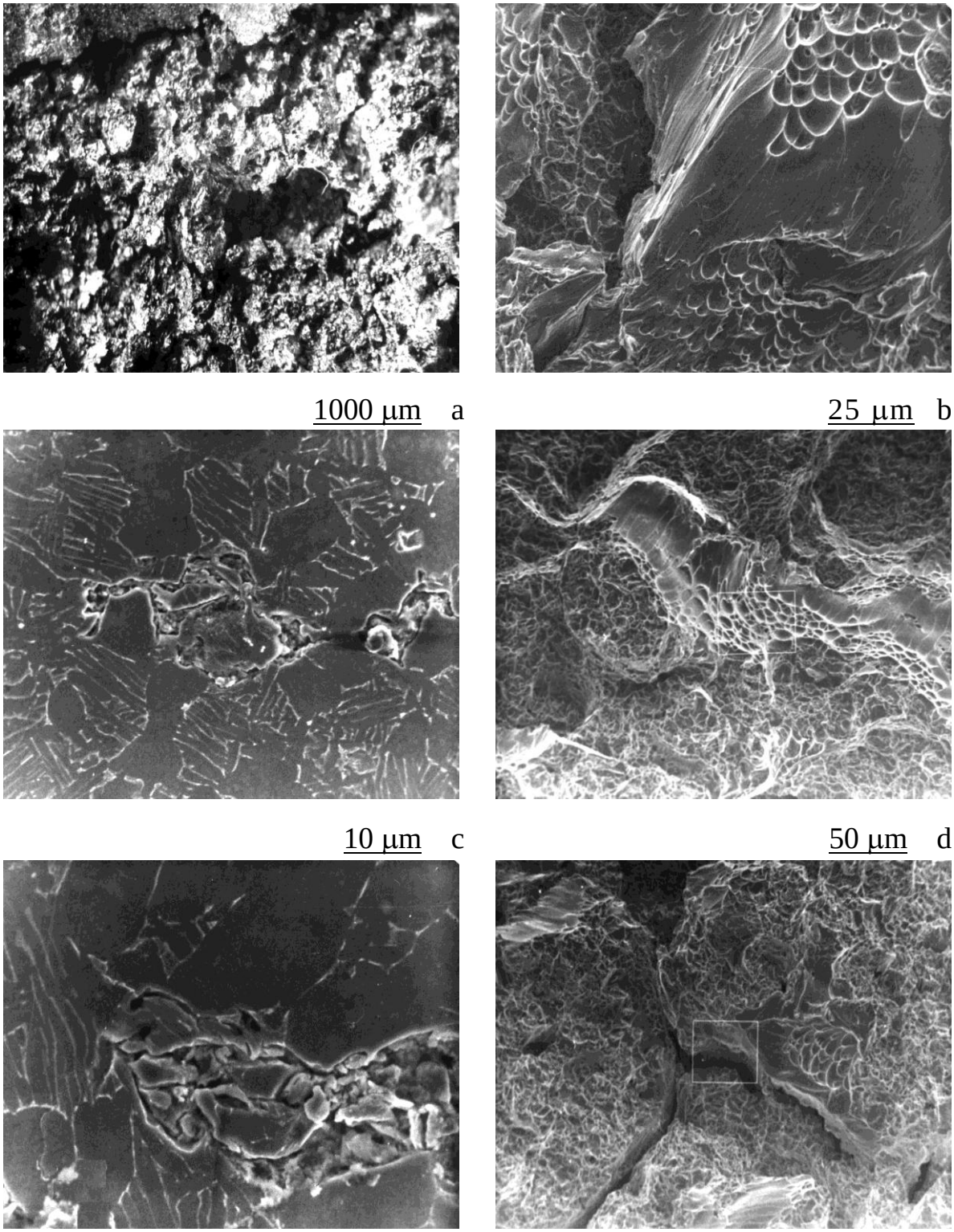


Fig. 5. Microstructures in cross-section and fracture surfaces "basic" (a) and "destroyed" (b-f) parts of a target in a zone 1 (b-d) and in a zone 2 (e-f), up to (a, d, f) and after (b, c, e) the etchings.

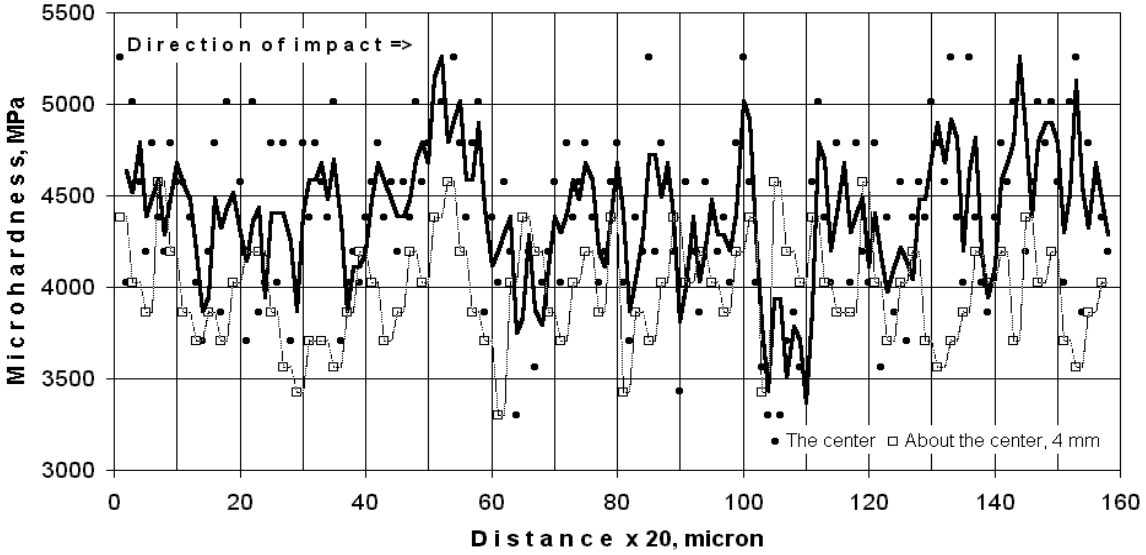
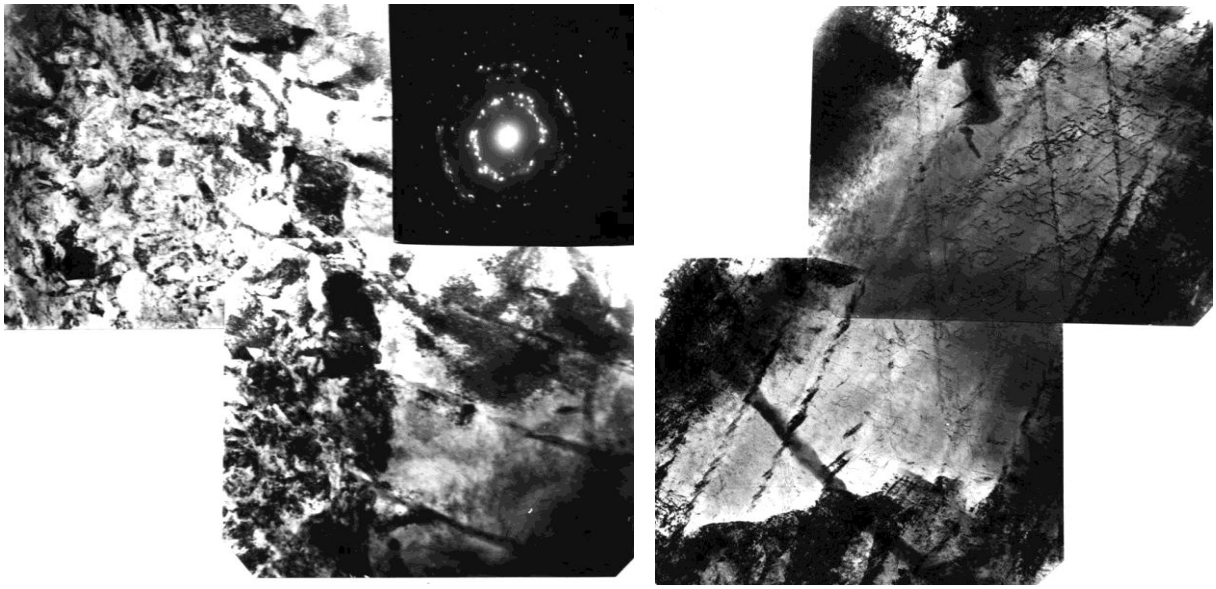


Fig. 6. Distribution of microhardness in blank metal from alloy VT6 along a direction of movement of shock wave in a zone 1 with speed 568 m/s.

As it has been shown in earlier works [5-8], with increase of coefficient of β- stabilization of titanium alloys, decomposition of layers of β- solid solutions, with a composition appropriate to them, develops in temperature-time intervals corresponding to them, that at lower temperatures and for longer time, than they



0,5 μm a 0,5 μm b

Fig. **7:** Electron microscope structures after treatment by blast wave of blank metal from alloy OT4 (a) and VT-23 (b).

are more enriched with same β- stabilizing alloying elements. Therefore with increase of speed and reduction time of shock stressing, β- interlayer of more alloyed alloys VT23 and VT6 appeared are steadier against decomposition in

comparison with alloys PT3V and OT4. As it is visible from Fig. 7, at identical stressing by blast wave, in blank from alloy OT4 (Fig. 7, a) the localization of plastic deformation was observed, while in alloy BT23 the decomposition of β-interlayer, (Fig. 7, b) took place only, previous to it.

3 Conclusion

It is possible to believe, that at the high-speed machining, the compressing shock wave modulates material structure, breaking it on mezo-volumes by the size 100…400 microns. Inside formed mezo-volumes the phases of waves are opposite on the sign, that results in a relative relaxation in them of stresses.

As a result of self-organizing of system, the unloading wave of plastic deformation and destruction, depending on relaxation ability of a material (structural and concentration [3,5,8], energies of defect of packing, ability of transformation of mechanical energy in thermal, realization of phase transformations) is formed.

At micro- level the wave of plastic deformation forming, making multiple copies and self-organizing defects of crystal structure, calls a strain hardening micro- volumes of blank metal. For saving stability of deformable material, the speed of strain hardening should predominate above speed of dynamic structural and concentration relaxation. At falloff of material ability to strain hardening on micro- level, in plastic deformation metal volumes on mezo- level are involved.

At increase of speed machining of blanks from titanium alloys, having a low heat conduction, the speed of strain hardening at the expense of transmitting modes of plastic deformation on micro- level quickly decreases (is braked) and it appears commensurable with speed of relaxation disstrengthening. Surplus of thermal energy results in its redistribution (localization) and to development of plastic deformation in which volumes of metal on mezo- level are involved. Thus the rotational modes of plastic deformation, its resulting in localization and destruction are connected. In titanium alloys of martensite class in which, as is known, plastic deformation accelerates decomposition enriched β- solid solution with formation α''-phases [4]. Its subsequent ageing at temperatures 450…500°C results to phase $\alpha'' \rightarrow \alpha' + (\beta)$ - transformation and in significant hardening alloys BT6 and BT23 [9-10]. Connection of new modes of plastic deformation on the mechanism of phase transformations, considerably complicates achievement of exhaustion of the plasticity necessary for destruction of material at shock stressing.

REFERENCES

[1] Y. Mescheryakov, A. Divakov in The Pre-print, RAS, St. Petersburg, Russia, 1989, p. 36.

[2] M.A. Skotnikova, T.A. Chizhik, A.S. Lisyansky, O.N. Simin, I.N. Tsybulina, A.A. Lanina Research of working shovels of turbines of

big power taking into account structural and phase transformations in metal of stampings from a titanic alloy of VT6 // Metalloobrabotka. – 2009, V.54. – №6. – P. 12-21.
[3] M. Skotnikova, S. Ushkov in Proceedings Conference Titanium-99, St. Petersburg, Russia, 1999, Vol. 1, p. 414.
[4] M. A. Skotnikova, V. V. Vinogradov, N. A. Krylov. The accounting of the wave theory of plastic deformation at high-speed machining of surfaces of preparations. Metal working, SPb, 2005, № 11 p. 12-15.
[5] M. Skotnikova in Proceedings Conference MORINTECH-97, St. Petersburg, Russia, 1997, Vol. 4, p. 251.
[6] V. Gridnev, O. Ivasishin, S. Oshkaderov in The Book, Kiev, Ukraine, 1986, p. 256.
[7] M. Yermolov, O. Solonina, PMM, Moscow, Russia, 1967, Vol. 23, N. 1, p. 63.
[8] Skotnikova M.A., Zubarev Y.M., Chizhik T.A., Tsybulina I.N. Structural-Phase Transformation In Metal of Blades of Steam Turbines From Alloy BT6 After Technological Treatment // Proceeding of the «10th World Conference On Titanium» 13-18 Jules 2003, Hamburg, Germany, 2004, v. 5, p. 2991-2999.
[9] Margarita A. Skotnikova, Nikolay A. Krylov, Jury I. Mescheryakov, Michael M. Radkevich, Evgenie K. Ivanov, EkaterinaV. Mironova Formation of Rotation in Titanium Alloys at Shock Loading // 12- th World Conference on Titanium – 2011. Proceedings of the Conference of the Nonferrous Metals Society of China, held in Beijing, China, June 19-24, 2011, p. 540-543.
[10] M.A. Skotnikova, E.V. Mironova, A.A. Lanina, N.A. Krylov, E.V. Homchenko. Structural and Phase Transformation in material of Blades of Steam Turbines from titanium Alloy after Technological Treatment // Modern mechanical engineering. Science and education: Materials of the International scientifically practical conference. – SPb.: Publishing house Polytechnical university, 2013. – p. 256 – 264.

УДК 621.81

В.М. Третьяков

ПРИМЕНЕНИЕ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ

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, что «узел сопряжения» составной части - базовое элементарное конструкторское понятие, которое используется на всех этапах разработки конструкции изделия. Его применение позволяет использовать теорию паттернов при моделировании изделий и раскрыть содержание процесса конструирования изделий и их семейств. Приведен пример решения задачи определения координат узлов сопряжения звеньев механизма.

Ключевые слова: узлы сопряжения, моделирование, паттерновые сети, проектирование изделий, семейство изделий.

В теории машиностроения сформировались и используются понятия, отражающие различные совокупности геометрических элементов объектов проектирования и производства. В теории механизмов и машин применяются понятия, обозначаемые терминами *профиль звена, элемент кинематической пары* или его синонимом *элемент звена*. В системе модульного машиностроения используется понятие *модуль поверхностей*. В теории базирования – *конструкторская и технологическая база*. В зарубежной технической литературе широко применяется термин *интерфейс*. Перечисленные термины определяют фрагменты уже сформированного изделия. Но в начале процесса проектирования этих фрагментов нет, так как нет конструкции самого разрабатываемого изделия. С первых шагов проектирования определяются те фрагменты конструкции изделия, через которые оно обменивается потоками энергии, вещества и сигналов с другими объектами. Для обозначения этих фрагментов изделия автор использует термин «узел сопряжения» [1]. Отличия данного понятия от перечисленных рассмотрены в [2, 3].

Потребителя интересуют положения внешних узлов сопряжения изделия. С ними он стыкует свои объекты. Для проведения расчетов так же нужно знать положения узлов, а не просто координаты звеньев. Поэтому,

по мнению автора, решение проектных задач, связанных с формированием и размещением узлов сопряжения составных частей, является существенной составляющей процесса разработки.

В машиностроении *узел сопряжения – это совокупность поверхностей (или их фрагментов, линий, точек) составной части, через которые она обменивается потоками энергии, вещества и сигналов с другим объектом* [4]. В него входят только те участки поверхностей, которые в данный момент времени непосредственно участвуют в обмене потоками. Для реализации этого обмена узлы соединены друг с другом. Возможно только попарное соединение узлов.

Узел сопряжения составной части – это базовое элементарное конструкторское понятие. Оно является обобщением таких широко применяемых в технике понятий, как установочные и присоединительные места, посадочное отверстие, привалочная плоскость и т.п. Введение его позволяет использовать структурные модели, построенные на основе теории паттернов, для описания строения любого технического устройства, состоящего из частей. Составным частям соответствуют образующие, сложным конструкциям – паттерновые сети [5].

Множество признаков узла сопряжения включает описание входящих в него поверхностей, например, формы и взаимного расположения, размеров, отклонения формы и расположения, чистоты обработки поверхностей, свойств используемого материала. Совокупность признаков определяет *исполнение узла*. Узлы сопряжения, отличающиеся признаками, имеют разное исполнение.

В своих работах начиная с [1] автор использует графы для изображения структурных моделей, отражающих узлы сопряжения изделий. Вершина графа соответствует узлу сопряжения. Ребро (связка) показывает соединение двух узлов. Вершины графа, изображающие узлы, принадлежащие одной образующей, заключены в оболочку. Оболочка показывает, что узлы - неотъемлемая часть образующей, и облегчает «чтение» модели.

На рис. 1 показана модель клинового механизма. Здесь I - входной, а O - выходной потоки механической энергии. Образующие e_1, e_2 и e_0 соответствуют клиньям 1, 2 и стойке 0. Фрагменты поверхностей звеньев, входящие в обозначенные узлы сопряжения, выделены цветом. Первый индекс в обозначении узла a_{ij} указывает номер составной части, которой он принадлежит, второй – номер узла в структуре ее узлов. Узлы сопряжения звеньев (фрагменты поверхностей) и соответствующие им узлы образующих (вершины графа на структурных моделях) обозначены одинаково. В правой части рисунка показаны составные части механизма, остовы звеньев, представленные поверхностями, входящими в узлы сопряжения, и структурные модели звеньев.

В машиностроении используются разные соединения составных частей

(резьбовые, сварные и т.п.). Они отличаются типом, видом и параметрами. Для идентификации соединений составных частей в изделиях и соответствующих им связок в структурных моделях удобно использовать числа. В изделии имеем соединение под номером K, в паттерновой сети ему соответствует связка K (рис. 1).

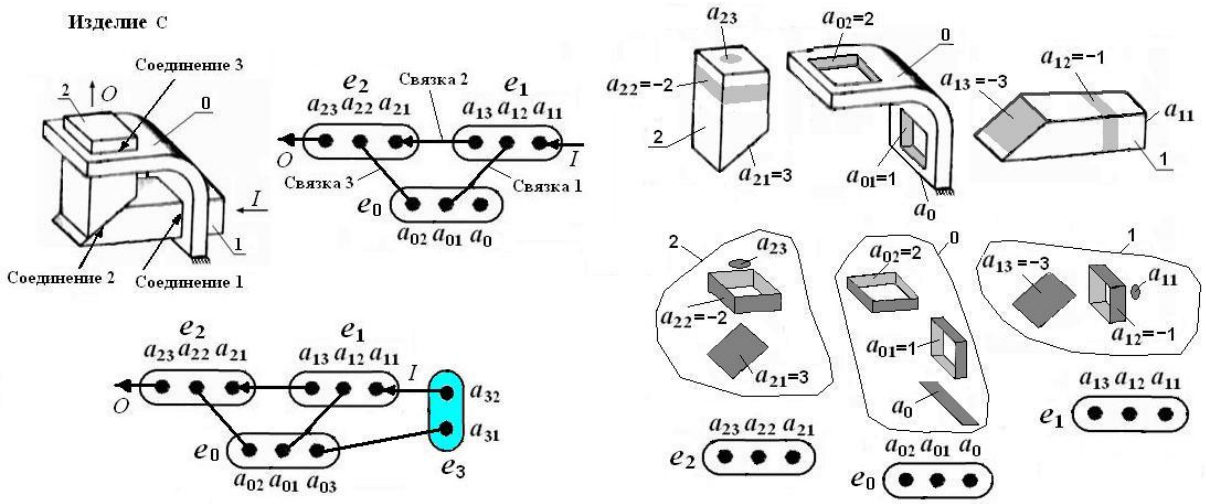


Рис. 1. Изделие, составные части, остовы составных частей и структурные модели, отражающие узлы сопряжения

Исполнения двух соединенных узлов составных частей могут быть разделены на охватывающее a_{01} и охватываемое a_{12}. Номер K, обозначающий соединение, можно использовать как показатель исполнений создающих его узлов сопряжения. Охватывающее и охватываемое исполнения узла будем различать присваивая принятому показателю знаки плюс или минус. Для узла, имеющего охватывающее исполнение, используется знак «+» ($a_{01}=1$), а для узла с охватываемым исполнением – знак «-» ($a_{12}=-1$). Узлы сопряжения, показатели которых имеют одинаковое обозначение (номер и знак совпадают), имеют одинаковые исполнения. Узлы, показатели которых отличаются только знаком, образуют соединения.

Введенные показатели позволяют единообразно записывать условие соединения узлов. Для этого используются алгебраические уравнения вида $a_{ij}+a_{kl}=0$ (уравнения сборки [6]), где a_{ij} и a_{kl} - обозначения узлов сопряжения, образующих связку. Например, для связок на рис. 1 уравнения сборки будут иметь вид $a_{12}+a_{01}=0$; $a_{13}+a_{21}=0$; $a_{22}+a_{02}=0$. Введение показателей позволяет решать некоторые задачи проектирования не учитывая все множество признаков узлов.

С помощью паттерновых сетей можно с разной степенью подробности описывать строение составных частей изделий вплоть до учета всех их поверхностей [4]. Структурные модели, построенные на основе теории паттернов, использовались при конструировании семейств изделий

машиностроения и решении задачи уменьшения номенклатуры составных частей [3, 7]. Значения показателей, определяющих исполнения узлов сопряжения составных частей, получаются решением системы уравнений, включающей: уравнения сборки; уравнения эквивалентности узлов образующих $a_{mn} = a_{pq}$; уравнения, определяющие требуемые исполнения узлов $a_{vg} = b$, где b – условное обозначение показателя.

Узел сопряжения не только обеспечивает соединение образующих, но и передает потоки. К признакам, описывающим передаваемые потоки, относятся вид потока (механическая энергия, тепловая, электрическая) и его параметры: перемещение и скорость (потенциальные или продольные переменные), а также сила и момент силы (потоковые или поперечные переменные).

Характер соединения составных частей в изделии описывается уравнениями связей, которые формируются в следующем виде [8, 9]:

1) сумма (алгебраическая, векторная) поперечных переменных для любой образующей равна нулю;

2) сумма (алгебраическая, векторная) продольных переменных для любого замкнутого контура, полученного соединением образующих равна нулю.

Число независимых уравнений для продольных переменных на единицу больше разности числа связок и числа образующих паттерновой сети изделия.

Для идентификации положения узлов на составной части e_i (или относительно другого объекта) введено понятие координат узла [10]. Координаты узла сопряжения a_{ip} задаются в виде пары $(M_{ip}, \vec{r}_{ip})$, определяющей положение привязочной системы координат узла (в ней задается его геометрия) относительно принятой базовой системы координат, которая связана с самой составной частью или с другим объектом. Здесь M_{ip} - матрица косинусов углов между осями привязочной и базовой систем координат составной части e_i; $\vec{r}_{ip}$ - радиус-вектор, определяющий положение привязочной точки привязочной системы координат в базовой системе.

Направление осей базовой системы координат составной части может быть задано только в том случае если известна (задана) привязочная система координат хотя бы одного его узла. При наличии относительного перемещения звеньев, можно задать привязочную систему координат только для одного из взаимодействующих узлов, образоваших соединение.

Введение узлов сопряжения позволяет выявить общее в конструировании изделий:

1. Определение узлов сопряжения составных частей и передаваемых потоков энергии вещества и сигналов на основе принципа действия проектируемого изделия и известных узлов сопряжения взаимодействующих с ним

объектов [3]. Построение остова изделия является первым шагом в создании конструкции.

2. Распределение исполнений (охватываемое, охватывающее) узлов сопряжения по составным частям [11] с целью уменьшения их разнообразия.

3. Уточнение (определение) положений узлов на составных частях.

4. Уточнение (определение) характеристик потоков, передаваемых узлами.

5. Определение параметров узлов сопряжения по параметрам передаваемых потоков.

6. Формирование конструкций составных частей с учетом перемещений, совершаемых в процессе функционирования и при сборке [3, 4, 12].

Продолжая пример с клиновым механизмом, дополним его

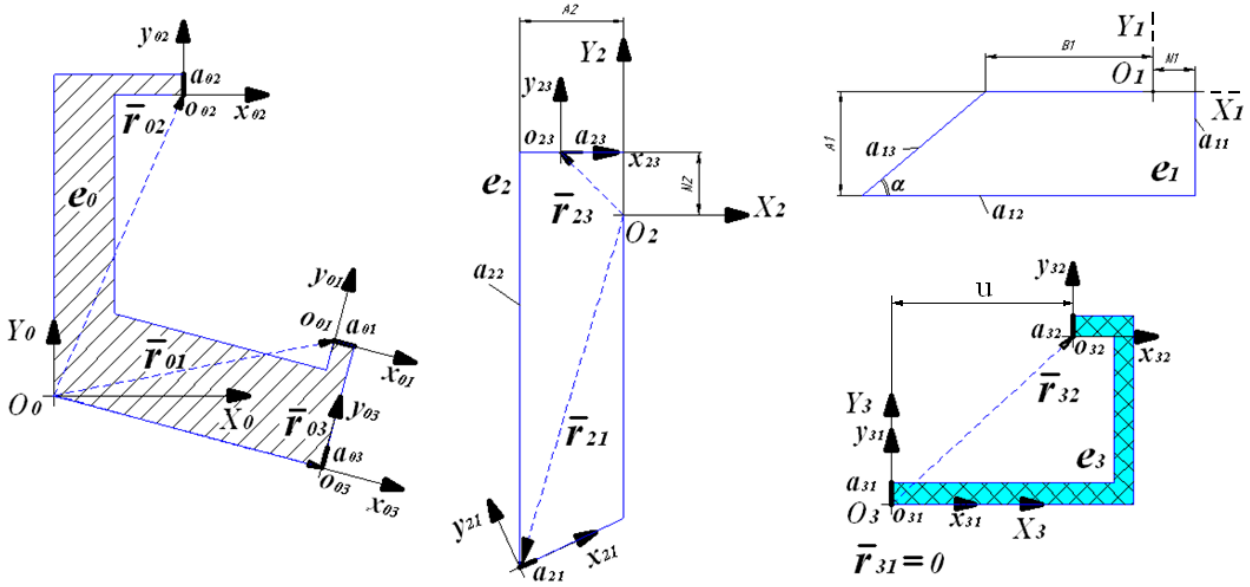


Рис. 2. Составные части клинового механизма с указанием узлов сопряжения

источником движения e_3 (рис. 1 и рис. 2). Двигатель e_3 одновременно создает и силу, действующую на узел входного звена. На стойке добавлен узел a_{03}, служащий для соединения с двигателем (узел a_0 не показан). На рис. 2 узлы сопряжения представлены отрезками основной толщины и обозначены, например, a_{01}, a_{02} и т.д. Для некоторых узлов указаны привязочные системы координат и радиус-векторы, определяющие их привязочные точки. Например, положение узла a_{01} звена e_0 определяется привязочной системой координат $o_{01}x_{01}y_{01}z_{01}$ и радиус-вектором $\vec{r}_{01}$, которые заданы в базовой системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ стойки. Описание координат узлов сопряжения приведены в таблице. Для составных частей механизма показаны базовые системы координат. Для узлов звена e_1 и узла a_{22} звена e_2 привязочные системы координат не заданы, как не заданы и положения самих узлов. Ячейки, соответствующие этим узлам, в таблице выделены фоном. Для узлов без привязочных систем координат отмечены

поверхности (элементы звена), на которых они будут располагаться. Для звена e_1 задано только положение привязочной точки O_1 его базовой системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$. Ее положение определяется размерами $A1$, $B1$ и $N1$, заданными от элементов звена, на которых будут располагаться узлы. Направления осей будет выбрано в процессе определения положений узлов сопряжения.

Изменять положения узлов двигателя можно изменяя координаты одного из них. В случае клинового механизма переменным параметром двигателя e_3 будет радиус-вектор, определяющий положение привязочной системы координат узла сопряжения a_{32}, связанного с узлом сопряжения a_{11} входного звена e_1. Переменной является проекция этого радиус-ветора на ось O_3X_3. Она обозначается переменной u (см. таблицу и рис. 2).

Силовой параметр передаваемого потока (поперечная переменная) может быть представлен силами давления на узел a_{ip} в проекциях их главного вектора и главного момента на оси привязочной системы координат узла: $F_{ip} = \begin{vmatrix} Fx_{ip} & mx_{ip} \\ Fy_{ip} & my_{ip} \\ Fz_{ip} & mz_{ip} \end{vmatrix}$.

Соединяя стойку e_0 и двигатель e_3 узлами сопряжения a_{03} и a_{31}, получаем сборочную единицу c_1 (рис. 3). Ее узлы сопряжения приведены в таблице. Базовой системой координат для полученной сборки является $O_0X_0Y_0Z_0$. Координаты узла a_{32} определяются по формуле [10]: $M_{32}^{c1} = M_{03}M_{31}^{-1}M_{32}$ и $\vec{r}_{32}^{c1} = M_{03}M_{31}^{-1}(\vec{r}_{32} - \vec{r}_{31}) + \vec{r}_{03}$.

К узлам a_{01} и a_{32} сборки c_1 присоединяем звено e_1 и получаем сборочную единицу c_2 (рис. 3). Определяем координаты узлов сопряжения a_{11}, a_{12} звена e_1 по координатам узлов сборки. Исполнения появившихся узлов сопряжения клина 1 определяются соотношениями: $a_{11} = -a_{32}$ и $a_{12} = -a_{01}$. Привязочные системы координат узлов a_{32} и a_{01} становятся привязочными системами координат узлов a_{11}, a_{12}. Первые заданы в базовой системе координат стойки, вторые должны быть получены в базовой системе координат звена e_1. Для этого необходимо определить направления ее осей.

Направления осей привязочных систем координат узлов a_{32} и a_{01} сопадают ($M_{32}^{c1} = M_{01}^{c1}$). Поэтому принимаем такие же направления для осей базовой системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ звена e_1. В этом случае матрицы косинусов углов привязочных систем координат узлов a_{11}, a_{12} в выбранной базовой системе координат являются единичными (см. таблицу). Ориентация осей базовой системы $O_1X_1Y_1Z_1$ относительно системы $O_0X_0Y_0Z_0$ совпадает с ориентацией привязачных систем координат узлов a_{32} и a_{01}.

Таблица

Координаты узлов сопряжения изделий

Изделие и его базовая система координат	Узлы сопряжения и их привязочные системы координат. Координаты узлов сопряжения в базовой системе координат изделия при $u = 87{,}2$.		
e_0 - стойка, $O_0X_0Y_0Z_0$	a_{01}, $o_{01}x_{01}y_{01}z_{01}$	a_{02}, $o_{02}x_{02}y_{02}z_{02}$	a_{03}, $o_{03}x_{03}y_{03}z_{03}$
	$M_{01} = \begin{vmatrix} 0{,}966 & 0{,}259 & 0 \\ -0{,}259 & 0{,}966 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{01} = \begin{vmatrix} 135{,}2 \\ 26{,}14 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{02} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{02} = \begin{vmatrix} 62{,}6 \\ 144{,}28 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{03} = \begin{vmatrix} 0{,}966 & 0{,}259 & 0 \\ -0{,}259 & 0{,}966 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{03} = \begin{vmatrix} 129 \\ -34{,}6 \\ 0 \end{vmatrix}$
e_1 - клин, $O_1X_1Y_1Z_1$	a_{11}, $o_{11}x_{11}y_{11}z_{11}$	a_{12}, $o_{12}x_{12}y_{12}z_{12}$	a_{13}, $o_{13}x_{13}y_{13}z_{13}$
	$M_{11} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{11} = \begin{vmatrix} 20 \\ -30{,}1 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{12} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{12} = \begin{vmatrix} -76{,}94 \\ -50 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{13} = \begin{vmatrix} 0{,}765 & -0{,}643 & 0 \\ 0{,}643 & 0{,}765 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{13} = \begin{vmatrix} -149.9 \\ -58.3 \\ 0 \end{vmatrix}$
e_2 - клин, $O_2X_2Y_2Z_2$	a_{21}, $o_{21}x_{21}y_{21}z_{21}$	a_{22}, $o_{22}x_{22}y_{22}z_{22}$	a_{23}, $o_{23}x_{23}y_{23}z_{23}$
	$M_{21} = \begin{vmatrix} 0{,}906 & -0{,}423 & 0 \\ 0{,}423 & 0{,}906 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{21} = \begin{vmatrix} -50 \\ -169 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{22} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{22} = \begin{vmatrix} -50 \\ -61.7 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{23} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{23} = \begin{vmatrix} -30{,}5 \\ 30 \\ 0 \end{vmatrix}$
e_3 - двигатель, $O_3X_3Y_3Z_3$	a_{31}, $o_{31}x_{31}y_{31}z_{31}$	a_{32}, $o_{32}x_{32}y_{32}z_{32}$	
	$M_{31} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{31} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{32} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{32} = \begin{vmatrix} u \\ 80.247 \\ 0 \end{vmatrix}$	
c_1 - сборка, $O_0X_0Y_0Z_0$	a_{01}, $o_{01}x_{01}y_{01}z_{01}$	a_{02}, $o_{02}x_{02}y_{02}z_{02}$	a_{32}, $o_{32}x_{32}y_{32}z_{32}$
	$M_{01}^{c1} = \begin{vmatrix} 0{,}966 & 0{,}259 & 0 \\ -0{,}259 & 0{,}966 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{01}^{c1} = \begin{vmatrix} 135{,}2 \\ 26{,}14 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{02}^{c1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{02}^{c1} = \begin{vmatrix} 62{,}6 \\ 144{,}28 \\ 0 \end{vmatrix}$	$M_{32}^{c1} = \begin{vmatrix} 0{,}966 & 0{,}259 & 0 \\ -0{,}259 & 0{,}966 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{32}^{c1} = \begin{vmatrix} 234{,}04 \\ 20{,}29 \\ 0 \end{vmatrix}$
c_3 - сборка, $O_0X_0Y_0Z_0$	a_{23}, $o_{23}x_{23}y_{23}z_{23}$		
	$M_{23}^{c3} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$, $\vec{r}_{23}^{c3} = \begin{vmatrix} 82{,}1 \\ 236 \\ 0 \end{vmatrix}$		

Матрица косинусов системы $O_1X_1Y_1Z_1$ имеет вид:

$$M1 = M_{01} = \begin{vmatrix} 0{,}966 & 0{,}259 & 0 \\ -0{,}259 & 0{,}966 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot$$

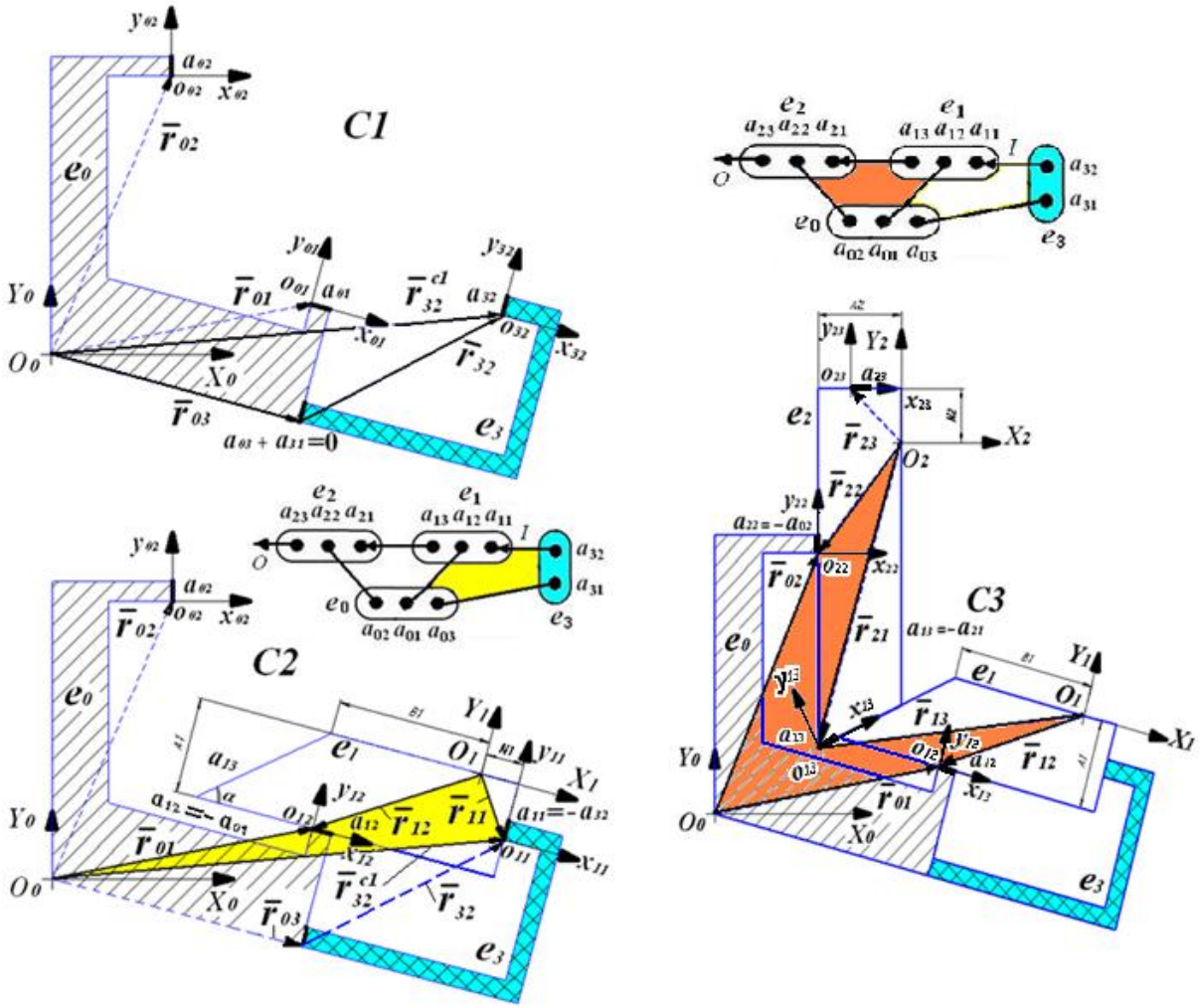


Рис. 3. Определение положений узлов сопряжения сборочных единиц

Для определения кординат узлов сопряжения a_{11}, a_{12} будем использовать уравнение в виде равенства нулю суммы радиус-векторов, входящих в замкнутый контур, соответствующий замкнутому контуру, образованному образующими e_0, e_1 и e_3 (на рис. 3 выделены заливкой).

Все радиус-векторы, входящие в уравнение, должны быть заданы в одной и той же системе координат. Поскольку речь идет о узлах звена e_1, то радиус-векторы уравнения должны привязываться к принятой базовой системе координат этого звена $O_1X_1Y_1Z_1$. Уравнение имеет вид: $M1^{-1} \cdot \vec{r}_{32}^{c1} + \vec{r}_{12} = M1^{-1} \cdot \vec{r}_{01}^{c1} + \vec{r}_{11}$. Из уравнения можно найти координаты радиус-векторов $\vec{r}_{11}$ и $\vec{r}_{12}$ учитывая, что проекция $\vec{r}_{12}$ на ось O_1Y_1 равна $A1$, а проекция $\vec{r}_{11}$ O_1X_1 равна $N1$. Полученный результат приведен в таблице. Аналогично

поступаем и при определении координат узлов сопряжения a_{13} и a_{22} (рис. 3 и таблица). Координаты узла a_{23} в составе сборочной единицы c_3 определены относительно ее базовой системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$.

По известным координатам узлов сопряжения звеньев и задавшись значением силы давления, действующей со стороны двигателя на узел a_{11} звена e_1, находим силы давления на узлы звеньев. Для этого используются уравнения потоковых переменных. Решение задачи определения сил давления на узлы звена e_1 показывает, что если при перемещении звеньев положение узла a_{21} на звене e_2 не меняется, то сумма моментов этих сил не равна нулю. В этом случае на узел a_{12} кроме главного вектора действует и главный момент, величина которого зависит от положений звеньев.

Автор считает, что в используемые графические пакеты должна быть встроена функция выделения (создания) на составных частях фрагментов, являющихся их узлами сопряжения. Они должны быть такими же компонентами геометрии, как и прочие графические объекты. Для составных частей, содержащихся в базах данных, целесообразно создавать таблицы соединений узлов сопряжения [3]. Это позволит находить множество готовых составных частей нужного назначения, которые будут соединяться с уже имеющимися в создаваемой сборке деталями. В результате упростится сборка составных частей, сведенная к простому указанию на соединяемые узлы, а также облегчится проектирование новых деталей по уже имеющимся. Остов создаваемой детали будет формироваться расстановкой имеющихся в требуемых местах и отображением их узлов, в узлы конструируемой детали. В некоторых графических пакетах отдельные моменты использования узлов сопряжения встречаются.

Не знание узлов сопряжения значительно снизило эффект от использования баз данных составных частей и поисковых систем, созданных на предприятиях с целью повышения уровня унификации в 70-е 80-е годы прошлого века. И сейчас избыточное разнообразие составных частей ложится тяжелым грузом на производителя. Понимание, что такое узел сопряжения позволяет выявить основные причины избыточности номенклатуры составных частей и найти пути ее уменьшения [3].

Что бы сформировать современные типы производств (например, сборка на заказ, изготовление на заказ, ресурсосберегающее производство, производство, ориентированное на потребителя) нужно уметь создавать широкое разнообразие конечных изделий из ограниченной номенклатуры составных частей без или с минимальной доработкой. Узлы сопряжения один из ключевых факторов, определяющих возможность многократного применения одной и той же составной части в разных изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.М. Третьяков. Групповое проектирование технических устройств. Разработка элементной базы // Автоматизация и современные технологии.- 1997.- №9.- С.10-21.
2. В.М. Третьяков. О понятии «узел сопряжения» составной части изделия // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - №11. - С.57-61.
3. Третьяков В.М. Конструирование семейств изделий машиностроения. – Ч.1.: монография в 2 ч. – Ковров: Изд-во: ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2009 – 220 с.
4. В.М. Третьяков. Использование понятия «узел сопряжения» при конструировании изделий машиностроения // Вестник машиностроения. - 2010. - №12. – с.24 – 30.
5. В.М. Третьяков. Элементы теории паттернов для моделирования изделий машиностроения // Информационные технологии. – 2013. - №9. - С. 24-27.
6. В.М. Третьяков. Математические модели для определения номенклатуры компонентов элементной базы семейства машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1999. - №2. - С.8-13.
7. В.М. Третьяков. Формализация процедур определения номенклатуры составных частей изделий // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2007. - №1. – С.67-75.
8. Антонов А.С. Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и расчет. - Изд. 2-е переработ. и доп. - Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1975. -480 с.
9. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – Киев «Техніка», 1975. -768 с.
10. В.М. Третьяков. Конструирование изделий машиностроения. Определение координат узлов сопряжения // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2010. - №10. – С.11–21.
11. В.М. Третьяков. О структурном синтезе механизмов // Теория механизмов и машин. – 2006. – Т.4 - №1. – С.38-43.
12. Третьяков В.М. Конструирование семейств изделий машиностроения. – Ч.2.: монография в 2 ч. – Ковров: Изд-во: ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2009 – 188 с.

V.M. Tretyakov

APPLICATION OF JUNCTIONS FOR PRODUCT DESIGN

V. A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy, Russia.

Abstract

The paper shows that “a junction” of a component part is a fundamental el-

ementary design concept used during the entire process of product design. Its application allows using a patterns theory for product simulation and specifying the process of products and their families design. The paper also gives an example of solving a problem of position determination of junctions for pieces of mechanism.

Key words: junctions, simulation, pattern networks, product design, product family.

REFERENCES

[1] V.M. Tretyakov. Gruppovoe proektirovanie texnicheskix ustroistv. Razrabotka elementnoy bazy // Avtomatizaciy I sovremennye texnologii.- 1997.- №9.- p.10-21. (rus.)
[2] V.M. Tretyakov. O poniatii «uzel sopriagenia» sostavnoy chasti izdelia // Spravochnik. Ingenernyi gurnal. - 2008. - №11. - p.57-61. (rus.)
[3] Tretyakov V.M. Konstruirovanie semeystv izdeliy mashinostroenia. – Ch.1.: monografia v 2 ch. – Kovrov: Izd-vo: GOU VPO «KGTA im. V.A. Degtiareva», 2009 – 220 p. (rus.)
[4] V.M. Tretyakov. Ispolzovanie poniatiy «uzel sopriagenia» pri konstruirovanii izdeliy mashinostroenia // Bestnik mashinostroenia. - 2010. - №12. – p. 24 – 30. (rus.)
[5] V.M. Tretyakov. Elementy teorii patternov dlia modelirovania izdeliy mashinostroenia // Informacionnye texnologii. – 2013. - №9. - p. 24-27. (rus.)
[6] V.M. Tretyakov. Matematicheskie modeli dlia opredelenia nomenklatury komponentov elementnoi bazy semeystv mashin // Problemy mashinostroenia i nadegnosti mashin. - 1999. - №2. - p. 8-13. (rus.)
[7] V.M. Tretyakov. Formalizacia procedur opredelehiy nomenklatury sostavnyx chastey izdeliy // Problemy mashinostroenia i avtomatizacii. – 2007. - №1. – p. 67-75. (rus.)
[8] Antonov A.S. Silovye peredachi kolesnyx i gusenichnyx mashin. Teoriy I raschet. – Izd. 2-e pererabot. b dop.. - L., «Mashinostroenie» (Leningr. otd-nie), 1975. -480 p. (rus.)
[9] Sigorskii V.P. Matematicheskiy apparat ingenera. – Kiev «Texnika», 1975. -768 p. (rus.)
[10] V.M. Tretyakov. Konstruirovanie izdeliy mashinostroenia. Opredelenie koordinat uzlov sopriagenia // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. - 2010. - №10. – p. 11–21. (rus.)
[11] V.M. Tretyakov. O strukturnom sinteze mexanizmov // Teoriy mexanizmov I mashin. – 2006. – T.4 - №1. – p. 38-43. (rus.)
[12] Tretyakov V.M. Konstruirovanie semeystv izdeliy mashinostroenia. – Ch.2.: monografia v 2 ch. – Kovrov: Izd-vo: GOU VPO «KGTA im. V.A. Degtiareva», 2009 – 188 p. (rus.)

УДК 621.81 + 621.891

А.П.Тюрин[1], В.Л.Полонский[2]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

[1]Александр Петрович Тюрин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6429, E-mail: Alexander.p.tyurin@gmail.com

[2]Владимир Львович Полонский, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6429, E-mail: Vladimir.polonsky@gmail.com.

Аннотация

В работе описана методика оценки параметров технического состояния изделий с помощью физически обоснованных нелинейных математических моделей. Методика позволяет прогнозировать изменение технического состояния изделий на длительный период эксплуатации по данным кратковременного диагностического контроля.

Ключевые слова: контроль технического состояния, прогнозирование ресурса, изнашивание, нелинейная математическая модель, MatLab.

Для математического описания изменения технического состояния изделий по данным периодического контроля используется, как правило, метод линейного регрессионного анализа. Суть метода заключается в выборе линейной по коэффициентам математической модели с последующей оценкой неизвестных коэффициентов методом наименьших квадратов. Однако линейная по коэффициентам математическая модель не отвечает, например, физическому механизму процесса изнашивания пар трения. По этой причине математические модели, полученные с помощью линейного регрессионного анализа, не могут быть использованы для экстраполяции процесса изнашивания во времени.

Опыт эксплуатации и ресурсные испытания пар трения различного назначения указывают на общую закономерность процесса изнашивания во времени, которую характеризует, так называемая, кривая изнашивания [1].

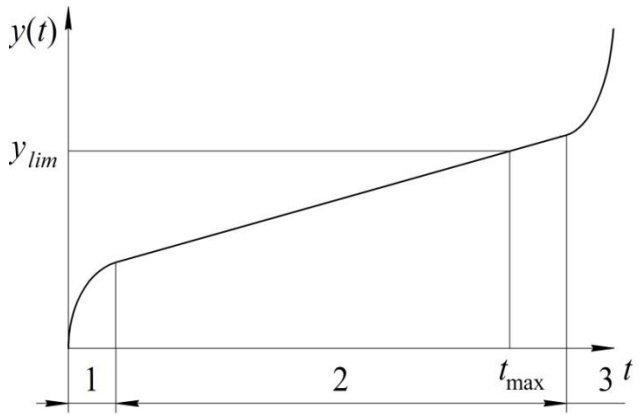


Рис. 1. Кривая изнашивания: $y(t)$ – контролируемый параметр процесса изнашивания; y_{lim} – предельное значение контролируемого параметра.

На кривой можно выделить три характерных участка: 1 – начальный период приработки; 2 – период установившегося изнашивания с примерно постоянной интенсивностью изнашивания при неизменных условиях эксплуатации; 3 – период резкого возрастания интенсивности изнашивания, соответствующий периоду катастрофического изнашивания (рис. 1).

Данные диагностического контроля при испытании зубчатых передач показывают, что процесс изнашивания, как в начальный период приработки, так и в установившийся период удовлетворительно описывается нелинейной по коэффициентам математической моделью [2].

$$\hat{y}(t) = b_1[1 - \exp(-b_2 t)] + b_3 t + b_4 . \qquad (1)$$

где $\hat{y}(t)$ – оценка величины износа;

b_j, $j = \overline{1,k}$ – коэффициенты модели ($k = 4$);

t – время наработки.

Нетрудно заметить, что в данном случае коэффициенты уравнения (1) являются физически обоснованными параметрами процесса изнашивания. Так коэффициент b_1 характеризует величину приработочного износа, коэффициент b_2 – динамику приработки. Коэффициент b_3 является оценкой интенсивности процесса в установившемся режиме. Дополнительный коэффициент (свободный член) b_4 характеризует погрешность начального измерения. Интенсивность изнашивания в начальный момент времени можно оценить с помощью выражения

$$\left(\left. \frac{d\hat{y}(t)}{dt} \right|_{t=0} \right) = b_1 b_2 + b_3 .$$

Нелинейной математической моделью может быть описан также процесс повышения температуры масла в картере червячного редуктора в работающем приводе. При этом коэффициент b_4 в зависимости (1) соответствует температуре среды, а коэффициент b_3 следует принять равным нулю.

Контролируемая характеристика $y(t)$ определяется в общем случае с некоторой ненаблюдаемой ошибкой $\varepsilon(t)$, связанной, в основном, с погрешностью измерений.

$$y(t) = \hat{y}(t) + \varepsilon(t). \qquad (2)$$

Если ошибка $\varepsilon(t)$ подчиняется нормальному закону распределения, имеет нулевое математическое ожидание и результаты измерений $y(t_i)$ в различные моменты времени $t_i, i = \overline{1,n}$ не коррелированны между собой и ошибкой $\varepsilon(t_i)$, оценка коэффициентов уравнения (2) может быть получена методами нелинейного регрессионного анализа [3].

Тогда оценками коэффициентов b_j, $j = \overline{1,k}$ будут такие, которые минимизируют целевую функцию метода наименьших квадратов

$$Q = \sum\nolimits_{i=1}^{n} \omega_i [y(t_i) - \hat{y}(t_i)]^2 , \qquad (3)$$

где $\omega_i = 1$ – для случая равноточных измерений.

В такой постановке задача нелинейного оценивания сводиться к задаче оптимизации в пространстве коэффициентов b_j, $j = \overline{1,k}$. Пространство варьирования коэффициентов модели определяется с помощью системы ограничений, накладываемых на их значения, исходя из физического содержания параметров процесса. Один из возможных вариантов системы ограничений для процесса изнашивания имеет вид:

$$0 < b_1 < y_{\lim}; \quad b_2 > 0; \quad 0 < b_3 < y_{\lim} / t_{\max}; \quad |b_4| \le 0{,}5 y_{\lim}.$$

Методы нелинейной оптимизации являются приближенными и предполагают использование математических компьютерных программ, например, MatLab. При этом на результат оценивания решающее влияние оказывает выбор начальных значений коэффициентов модели. Для исключения ошибочных решений, связанных с существованием локальных минимумов целевой функции (3) целесообразно произвести поиск начальных значений коэффициентов модели (2), близких к точке глобального минимума, то есть определить некоторую область глобального минимума целевой функции в пространстве коэффициентов b_j, $j = \overline{1,k}$. Наиболее эффективное выполнение указанной процедуры предусматривает использование методов статистического моделирования многомерного случайного вектора коэффициентов модели с помощью датчика случайных чисел, равномерно распределенных в пространстве коэффициентов (в MatLab функция R = rand(1,4)).

Для процедуры оценки коэффициентов модели (2) наиболее эффективно использовать метод Левенберга-Марквардта [4]. Особенностью метода Левенберга-Марквардта является минимизация остаточной суммы квадратов Q с использованием корректирующего параметра $\lambda \geq 0$. Расчет коэффициентов модели и соответственно остаточной суммы квадратов осуществляется при различных значениях параметра λ, конечное значение которого выбирается оптимальным на каждом шаге итераций. В работе [3] показано, что метод Левенберга-Марквардта удачно совмещает в себе, как предельные случаи, в частности, методы наискорейшего спуска и Ньютона-Гаусса. Алгоритм метода Левенберга-Марквардта заключается в следующих вычислениях [4].

$$\hat{B}_{s+1} = \hat{B}_s + (Z_s^T Z_s + \lambda I)^{-1} Z_s (Y - \hat{Y}),$$

где s – номер итерации;

$B = \{b_1, b_2, \ldots, b_k\}^T$ – вектор коэффициентов модели;

$\hat{B}$ – оценка вектора коэффициентов модели;

$z_{kls} = \left.\frac{\delta Y(B,t)}{\delta t_k}\right|_{\hat{B}_s, t_l}$ – члены матрицы Z_s;

Y – вектор аргументов (в рассматриваемом примере независимой переменной является время t);

I – диагональная матрица размерности k, в которой в качестве членов используются диагональные члены матрицы $Z_s^T Z_s$.

Погрешность определения значений коэффициентов нелинейной модели существенным образом зависит от абсолютной величины коэффициентов. С целью формирования хорошо обусловленной матрицы $Z_s^T Z_s$ следует оценивать не сами коэффициенты, а их приведенные значения. Уравнение (2) можно представить к следующему удобному для вычислений виду:

$$\bar{y}(t) = -10^{a_1} b_1 \exp(-10^{a_2} b_2 t) + 10^{a_3} b_3 t + 10^{a_4} b_4 + \varepsilon(t). \qquad (4)$$

где a_j, $j = \overline{1,k}$ – целые числа (показатели степени), определяемые опытным путем или из анализа априорной информации о процессе изнашивания.

Вычисления заканчивают, как только разность между значениями целевой функции $Q_{s-1} - Q_s$ станет меньше наперед заданного малого значения e (при расчетах с обычной точностью полагают $e = 1 \cdot 10^{-6}$).

Данный метод в сочетании с физически обоснованной математической моделью (4) позволяет довольно точно описать процесс изнашивания (рис. 2). Для определения коэффициентов b_j, $j = \overline{1,k}$ возможно использо-

вание метода Левенберга-Марквардa с программированием приведенных выше формул (пунктирная линия). Другая возможность – оценка коэффициентов с использованием программы MatLab с расширением Optimization Toolbox (функция lsqnonlin) (сплошная линия). Функция lsqnonlin по умолчанию использует также метод Левенберга-Марквардa. Результат в том и другом случае зависит от выбора начальных значений коэффициентов b_j. Поэтому перед использованием функции lsqnonlin также целесообразно произвести случайный поиск значений коэффициентов b_i.

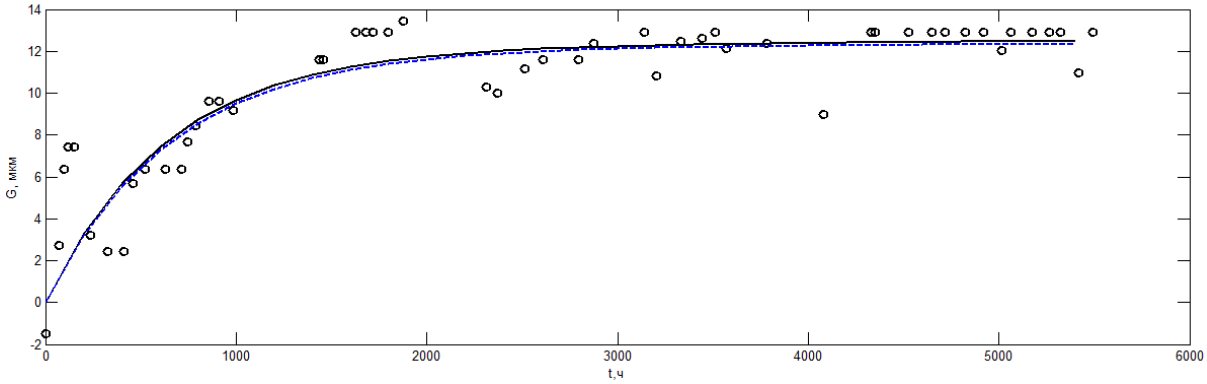


Рис. 2. Интерполяция процесса изнашивания мелкомодульной зубчатой передачи выполнена с помощью функции Isqnonlin (сплошная линия) и напрямую методом Левенберга-Марквардa (пунктирная линия) по данным, полученным с использованием оборудования для дистанционного контроля изменения бокового зазора [2] (m=0,3 мм, z_1=40, z_2=65, Сталь 25Х13Н2, смазочный материал ВНИИНП-274, n_1=500 мин$^{-1}$, T_2=0,2 Нм).

Экстраполяция процесса изнашивания во времени до достижения предельного значения износа, описываемого уравнением (4) за вычетом свободного члена, позволяет оценить среднее время безотказной работы. При этом за ресурс пары трения принимается нижняя граница рассчитанного доверительного интервала времени безотказной работы.

Обычно дисперсия, связанная с ошибкой измерения σ_0^2 диагностического параметра неизвестна. Тогда при адекватном описании контролируемого процесса моделью в качестве оценки неизвестной дисперсии принимают величину [3]

$$\sigma_0^2 \approx S_0^2 = Q_S /(n-k),$$

где Q_S – остаточная сумма квадратов, вычисленная в точке ее глобального минимума.

Дисперсионную матрицу на участке наблюдения обычно определяют приближенно методом линеаризации нелинейного уравнения модели (2) [3]

$$D_S \approx S_0^2 (Z_S^T Z_S)^{-1} \quad (5)$$

Диагональные члены дисперсионной матрицы (5) представляют собой индивидуальные оценки соответствующих коэффициентов модели. В нашем случае, например, величины приработочного износа, интенсивности изнашивания и т.д.

$$S_{bi}^2 \approx d_{iis}.$$

$$\hat{b}_i - t_{1-\alpha/2} d_{iis}^{1/2} \le M\left\{\hat{b}_i\right\} \le \hat{b}_i + t_{1-\alpha/2} d_{iis}^{1/2}, i = \overline{1,k},$$

где $t_{1-\alpha/2}$ – квантиль распределения Стьюдента при числе степеней свободы $\nu = n - k$ и односторонней доверительной вероятности $1 - \alpha/2$.

Полученная оценка дисперсионной матрицы D_S позволяет построить границы коридора ошибок процесса в виде:

$$\hat{y}(t) - t_{1-\alpha/2} S_y(t) \le M\left\{\hat{y}(t)\right\} \le \hat{y}(t) + t_{1-\alpha/2} S_y(t),$$

где $S_y(t) = S_0 (\sum_{j=1}^{k} \sum_{l=1}^{k} z_{jis} z_{lis} d_{jls})^{1/2}$.

Погрешность рассмотренного здесь приближенного способа определения границ коридора ошибок зависит от конкретного вида модели и информационной матрицы эксперимента *Z*. Для модели (2) указанная погрешность является функцией времени *t*. При экстраполяции уравнения (2) на будущий период эксплуатации величина нелинейной (экспоненциальной) части уравнения уменьшается и в пределе стремиться к нулю. По этой причине упомянутой выше погрешностью при прогнозировании можно пренебречь.

Среднее время безотказной работы (оценка математического ожидания срока службы) в рассматриваемом случае зубчатой пары t_h определяют путем совместного решения уравнения (2) и уравнения $y_{\lim}(t)$, определяющего границу области предельных значений износа. В частном случае $y_{\lim} = Const$. За величину гамма-процентного ресурса t_γ принимают нижнюю границу доверительного интервала срока службы при соответствующей доверительной вероятности $\gamma = (1 - \alpha/2) \cdot 100\%$. Вычисление гамма-процентного ресурса осуществляется численным методом, например, способом Ньютона.

Оценкой вероятности безотказной работы в текущий момент времени *t* является интеграл вероятности нормального закона распределения с параметрами $\hat{y}(t)$ и $S_y(t)$

$$P(t) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{c} e^{-x^2/2} dx, \quad (6)$$

где $c = [y_{\max}(t) - \hat{y}(t)] / S_y(t)$.

Интеграл вероятности (6) определяют по таблицам функции нормального распределения или вычисляют численно, например, с помощью квадратурной формулы Симпсона.

Физически обоснованная математическая модель (4) позволяет с достаточной точностью описывать процесс изнашивания, как в период диагностического контроля, так и экстраполировать ход процесса изменения технического состояния на отрезок времени, значительно превышающий, например, продолжительность эксперимента (рис. 3).

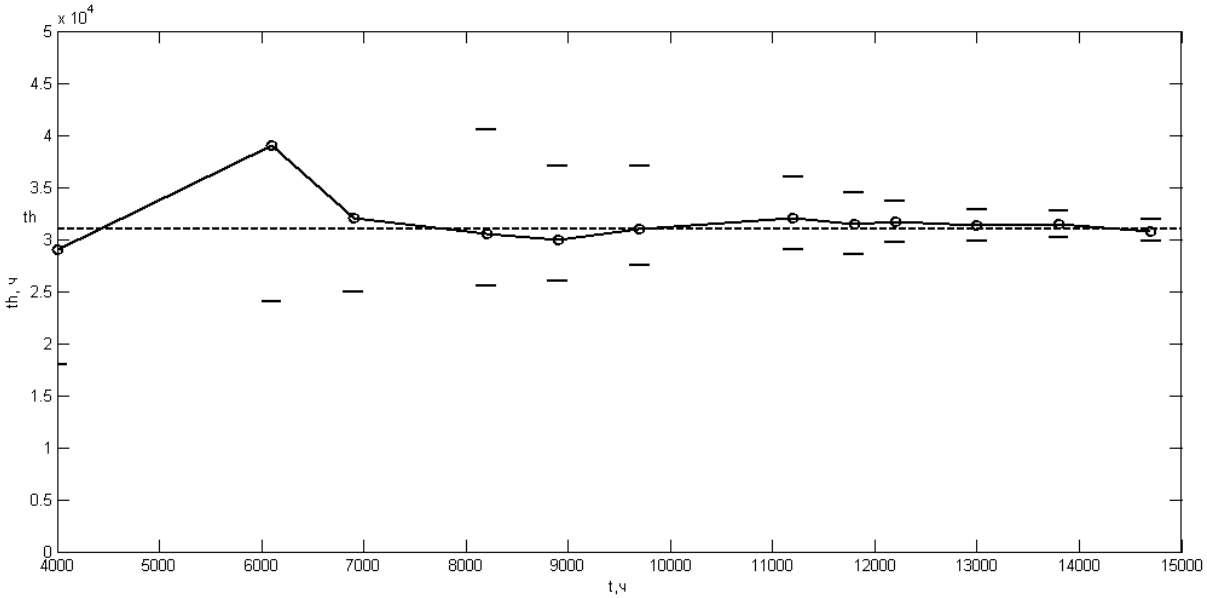


Рис. 3. Влияние продолжительности периода наблюдения за процессом изнашивания t на результаты прогнозирования ресурса t_h в часах. Коридор ошибок построен при односторонней доверительной вероятности $1-\alpha/2$ =0,8.

Точность экстраполяции зависит от продолжительности периода наблюдения и может быть оценена по данным о границах коридора ошибок (горизонтальные штрихи на рис. 3). Точки на графике указывают на расчетные значения математического ожидания ресурса работы зубчатого механизма. В рассматриваемом примере удовлетворительный результат был получен при продолжительности периода наблюдения, составляющим не более 25% от фактического срока службы изделия.

Метод Левенберга-Марквардa с предварительным случайным поиском начальных значений позволяет находить значения коэффициентов b_j, $j=\overline{1,k}$ нелинейных по коэффициентам математических моделей вида (4). При этом целесообразно использовать программу Matlab и конкретно функцию Isqnonlin. Это позволяет быстро получать хорошие результаты прогнозирования без больших затрат на программирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
2. Бесконтактный метод контроля и прогнозирования ресурса зубчатых механизмов/ Кузьмин И.С., Тюрин А.П., Ямашев Э.М. – В сб. материалов 2-го Всес. Съезда по теории машин и механизмов, 1982, с. 50-51.
3. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов/ Под ред. Э.И. Лецкого. – М.: Мир, 1977 – 552 с.
4. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. – SIAM J., 1963, Vol. 11, № 2, p. 431-441.

A.P.Tyurin, V.L.Polonsky

FORECASTING OF CHANGE OF THE TECHNICAL CONDITION OF PRODUCTS BY MEANS OF NONLINEAR MATHEMATICAL MODELS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The method of estimating the parameters of the process of change a technical condition with nonlinear mathematical models is described. The technique allows to estimate the attrition wear and wear intensity using the data of short-term check of wear of friction pairs, and also to predict change of their technical state for the long period of operation.

Key words: technical state inspection, nonlinear predication, wear, MatLab.

REFERENCES

[1] Garkunov D.N. Tribotekhnika. M.: Mashinostroenie, 1985. –424 p. (rus.).
[2] Beskontaktnyu metod kontrolya i prognozirovaniya resursa zubchatukh mekhanizmov/ Kuzmin I.S., Tyurin A.P., Yamashev E.M. – V sb. Materialov 2 Vses. Syezda po teorii mashin i mekhanizmov, 1982, p. 50-51. (rus.)
[3] Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov/ Pod red. E.I.Lezkogo – M.: Mir, 1977 – 552 p. (rus.)
[4] Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. – SIAM J., 1963, Vol. 11, №2, p. 431-441.

УДК.621.833.6

А.В. Чиркин[1], А.С. Иванов[2], М.М. Ермолаев[3]

ПЛАНЕТАРНО-ЦЕВОЧНЫЕ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ЭПИЦИКЛОИДАЛЬНОГО И ГИПОЦИКЛОИДАЛЬНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЙ

(Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки по проекту 1403)

[1]Чиркин Александр Вадимович, студент
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел. (916)959-45-85, E-mail: alexchick07@gmail.com

[2]Александр Сергеевич Иванов, д.т.н., профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (917)501-50-88, E-mail: a-s-ivanov@yandex.ru

[3]Михаил Михайлович Ермолаев, аспирант
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва
Тел: (916)579-78-62, E-mail: mmermolaev@gmail.com

Аннотация

Предложены зависимости для построения профилей эпи- и гипоциклоидальных сателлитов планетарно-цевочных передач. Предложена методика расчета контактных напряжений и упругих перемещений сателлитов под действием крутящего момента. Рассмотрены различные виды современных редукторов на базе планетарно-цевочных передач.

Ключевые слова: эпициклоидальное зацепление, гипоциклоидальное зацепление, планетарно-цевочные передачи

В настоящее время в приводах промышленных роботов, станков с ЧПУ и другого наукоемкого оборудования широко используются прецизионные редукторы с циклоидальным зацеплением (планетарно-цевочные редукторы). Они обладают высокой нагрузочной способностью, малой удельной металлоёмкостью, высоким КПД (что обуславливает их преимущества перед червячными редукторами), высокой крутильной жесткостью (что обуславливает их преимущества перед волновыми редукторами), низким люфтом, обусловленным многопарностью зацепления (в ряде конструкций люфт может быть полностью устранен), широким диапазоном передаточных чисел, технологичностью изготовления (в сравнении с волновыми редукторами). Исследованиям конструкций планетарно-цевочных

редукторов в нашей стране посвящены исследования Сигова И.В. [5], Шанникова В.М. [8], Киреева С.О. [2], по результатам которых разработаны методики проектных расчетов характеристик зацепления (определены делительные диаметры колес, эксцентриситеты и др.). Сформулированы качественные рекомендации, основанные на обобщении опыта эксплуатации зарубежных редукторов, изготовленных до 1960 г., по выбору ширины колес, коэффициентов укорочения эпициклоиды, диаметра цевок, допусков на размеры. Чтобы создавать современные планетарно-цевочные передачи, конкурентно способные на мировом рынке, необходимы уточнения существующих методик расчета и разработка новых, которые позволили бы создавать конструкции, имеющие наиболее оптимальные параметры, такие как удельная металлоемкость, КПД и др. Отсюда следует актуальность разработки методики расчета планетарно-цевочных редукторов.

В настоящее время в большей части планетарных редукторов, применяемых в машиностроении, используется эвольвентное зацепление. В основе зацепления лежит кривая, образуемая перемещением точки, расположенной на прямой при обкатывании этой прямой по окружности без скольжения.Такое зацепление технологично, так как его можно получить при помощи инструмента, подобного прямозубой рейке. Однако оно обладает рядом недостатков: в частности, при применении в планетарных редукторах, затруднительно обеспечить небольшую разницу чисел зубьев при внутреннем зацеплении из-за их интерференции. Чтобы избавиться от этого недостатка, необходимо либо применять волновое зацепление, либо использовать другую форму зубьев. Указанного недостатка лишены планетарно-цевочные передачи – в них разница чисел зубьев может составлять единицу, что позволяет получить намного большие передаточные числа в одной ступени. В основе планетарно-цевочной передачи лежит кривая, образованная перемещением точки, лежащей на окружности, которая обкатывается по другой окружности внутри (гипоциклоида), или снаружи (эпициклоида) без скольжения. Такая форма кривой обуславливает ряд преимуществ по сравнению с эвольвентной передачей: в передаче движения участвует теоретически половина зубьев профильного колеса (таким образом обеспечивается многопарность зацепления); можно получать намного более высокие передаточные числа за счет того, что разница зубьев между сателлитом и эпициклом равна единице; форма зубьев такова, что они практически не работают на изгиб, поэтому их можно не рассчитывать на изгибную выносливость.

Распространены два варианта построения планетарно-цевочной передачи:

1) Зубчатый венец профильного колеса образован эквидистантой к эпициклоиде, которая зацепляется с цевками, находящимися в обойме. Число цевок на единицу превышает количество зубьев профильного колеса.

2) Зубчатый венец профильного колеса образован эквидистантой к гипоциклоиде, которая зацепляется с цевками, находящимися в обойме. Число зубьев профильного колеса на единицу превышает количество цевок.

Существует нормальное и корригированное планетарно-цевочное зацепление [8]. В корригированном зацеплении в качестве профиля зубчатых колес используются, соответственно, эквидистанты к укороченным эпициклоиде и гипоциклоиде. Использование корригированного зацепления, во-первых, улучшает параметры зацепления, во-вторых, позволяет изменять эксцентриситет. В дальнейшем будем говорить только о корригированном планетарно-цевочном зацеплении.

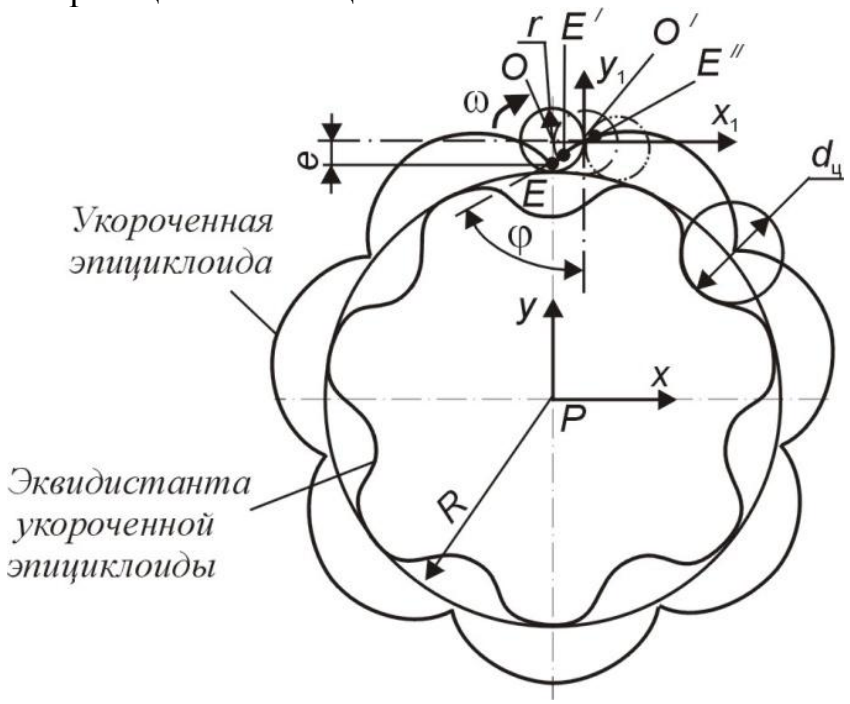


Рис. 1. Профилирование эпициклоидального колеса

Эпициклоида (эпитрохоида) получается как след точки *E*, связанной с окружностью радиуса *r* с центром в точке *O*, катящейся без проскальзывания снаружи по окружности радиуса *R* с центром в точке *P*. Точка *E*, связанная с окружностью радиуса *r*, описывает укороченную [6] (рис. 1) или удлиненную эпициклоиду в зависимости от положения этой точки внутри или снаружи окружности радиуса *r*. Обозначим расстояние от центра окружности *O* до точки *E* через *e* (т.е. *e* = *OE*), а также *z* = *R*/*r*. Для оценки степени укорочения (удлинения) вводят коэффициент укорочения эпициклоиды $\lambda = e/r$. Профилем эпициклоидального колеса является эквидистанта к эпциклоиде:

$$x = \frac{e(z+1)}{\lambda}\sin\tau - e\sin\big((z+1)\tau\big) - \frac{d_{\text{ц}}}{2}\frac{-\sin\tau + \lambda\sin\big((z+1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2-2\lambda\cos z\tau}}; \qquad (1)$$

$$y = \frac{e(z+1)}{\lambda}\cos\tau + e\cos\big((z+1)\tau\big) - \frac{d_ц}{2}\frac{\cos\tau - \lambda\cos\big((z+1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2-2\lambda\cos z\tau}},$$

где $d_ц$ – диаметр цевки.

Аналогично гипоциклоида (гипотрохоида) получается как след точки *E*, связанной с окружностью радиуса *r* с центром в точке *O*, катящейся без проскальзывания внутри по окружности радиуса *R* с центром в точке *P*. Точка *E*, связанная с окружностью радиуса *r*, описывает укороченную (рис. 2) или удлиненную гипоциклоиду в зависимости от положения этой точки внутри или снаружи окружностирадиуса *r*. Обозначим расстояние от центра окружности *O* до точки *E* через *e* (т.е. *e* = *OE*), а также *z* = *R*/*r*. Для оценки степени укорочения (удлинения) вводят коэффициент укорочения гипоциклоиды λ = *e*/*r*. Уравнения профиля гипоциклоидального колеса имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x &= \frac{e(z-1)}{\lambda}\sin\tau - e\sin\big((z-1)\tau\big) + \frac{d_ц}{2}\frac{\sin\tau + \lambda\sin\big((z-1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2-2\lambda\cos z\tau}}; \\ y &= \frac{e(z-1)}{\lambda}\cos\tau + e\cos\big((z-1)\tau\big) - \frac{d_ц}{2}\frac{\cos\tau - \lambda\cos\big((z-1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2-2\lambda\cos z\tau}}. \end{aligned} \qquad (2)$$

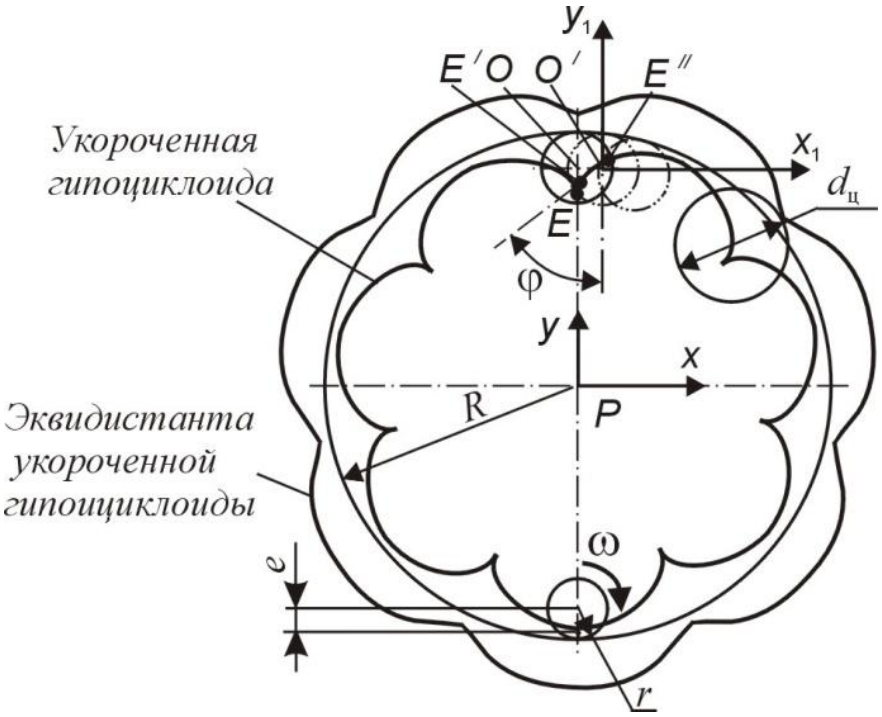


Рис. 2. Профилирование гипоциклоидального колеса

Зная параметры λ – коэффициент укорочения, $d_ц$ – диаметр цевки, *e* – эксцентриситет, *z* – число зубьев, можно построить профиль колеса и найти силы, действующие в зацеплении. Из уравнения равновесия сателлита следует, что,

$$T = \left| \sum_{i=1}^{N} \overline{F_i} \times \overline{r_i} \right|, \tag{3}$$

где T − крутящий момент, F_i – сила, действующая в точке контакта i-й цевки с профильным колесом, $\boldsymbol{r_i}$ – радиус-вектор i-й точки контакта, N–число цевок, находящихся в зацеплении (обычно это половина от общего числа цевок). Задача нахождения сил в зацеплении статически неопределима, поэтому к уравнению равновесия следует добавить условия совместности перемещений. Обозначим φ – угол, на который поворачивается сателлит при нагружении моментом T вследствие упругих контактных деформаций (деформациями самого сателлита пренебрегаем). Можно получить, что

$$\varphi = \frac{4T}{\pi E^* B} \left(\sum_{i=1}^{N} |\overline{r_i}|^2 \right)^{-1}, \tag{4}$$

где E^* − приведенный модуль упругости $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, μ_1 – коэффициент Пуассона для материала цевки, μ_2 – коэффициент Пуассона для материала колеса, E_1 – модуль упругости цевки, E_2 – модуль упругости колеса, B– ширина колеса.

Крутильную жесткость передачи можно определить как

$$j_k = \frac{T}{\varphi}, \tag{5}$$

или, подставляя (4) в (5)

$$j_k = \frac{\pi}{4} E^* B \sum_{i=1}^{N} |\overline{r_i}|^2. \tag{6}$$

Сила в i-й точке связана с φ следующим соотношением:

$$F_i = \frac{\pi}{4} E^* B \, \frac{|\overline{r_i}|^2}{\overline{N_i} \cdot \overline{r_i}} \varphi, \tag{7}$$

где $\boldsymbol{N_i}$ – вектор нормали к гипоциклоиде в i-й точке:

$$\overline{N_i} = \begin{pmatrix} \dfrac{\sin\tau + \lambda \sin\big((z-1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda\cos z\tau}} \\ \dfrac{\cos\tau - \lambda \cos\big((z-1)\tau\big)}{\sqrt{1+\lambda^2 - 2\lambda\cos z\tau}} \end{pmatrix}. \tag{8}$$

По известным силам в точках контакта можно найти контактные напряжения. Для этого необходимо знать приведенную кривизну в точке контакта. Особенностью цевочного зацепления является то, что приведенная кривизна *K* в зацеплении профильного колеса с цевкой не зависит от диаметра цевки и её можно найти по формуле:

$$K = \frac{|\ddot{x}\dot{y} + \dot{x}\ddot{y}|}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

Тогда для приведённой кривизны гипоциклоиды формула принимает вид:

$$K = \frac{\lambda}{e(z-1)} \frac{|(z-1)\lambda^2 - (z-2)\lambda\cos zt - 1|}{(1 - 2\lambda\cos zt + \lambda^2)^{3/2}}. \quad (10)$$

Формула для приведённой кривизны эпициклоиды будет аналогичной формуле (10). Её можно вычислить также по выражению для приведенного радиуса кривизны, полученному в работе [6]. Чтобы найти напряжения в точках контакта, необходимо подставить все параметры в формулу Герца для первоначального контакта по линии (приведена формула, взятая из работы К. Джонсона " Механика контактного взаимодействия "):

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{F_i E^* K}{\pi B}}. \quad (11)$$

Подставляя (7), (10) в (11) находим для гипоциклоиды:

$$\sigma_i = \sqrt{E^* \frac{|\overline{r_i}|^2}{\overline{N_i}\cdot\overline{r_i}} \frac{T}{B} \frac{\lambda}{e(z-1)} \frac{|(z-1)\lambda^2 - (z-2)\lambda\cos zt_i - 1|}{(1 - 2\lambda\cos zt_i + \lambda^2)^{3/2}} \left(\sum_{i=1}^{N} |\overline{r_i}|^2\right)^{-1}}. \quad (12)$$

Чтобы оценить работоспособность передачи, найденные напряжения следует сравнивать с допускаемыми.

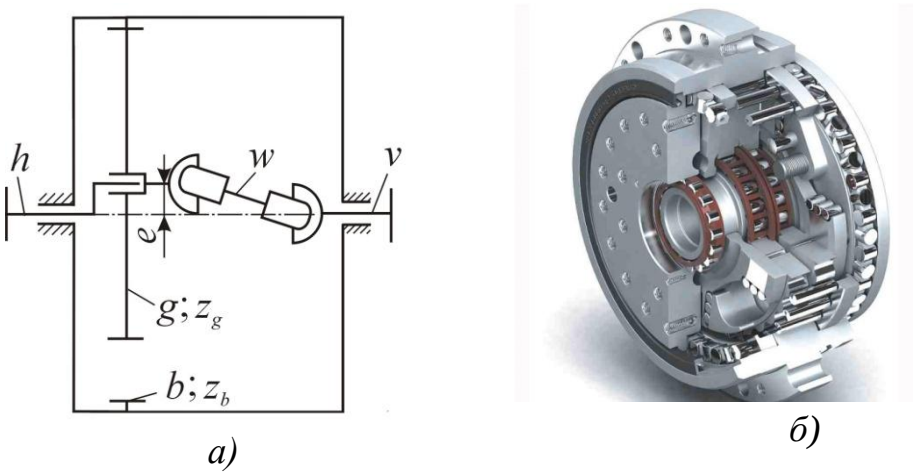
Зная распределение сил, можно найти проекции сил на оси координат, а также суммарную силу и оценить реакции в подшипниках [7].

Рассмотрим различные варианты кинематических схем планетарно-цевочных редукторов. Планетарным передачам присваивают обозначение в соответствии с обозначениями, введенными В.Н. Кудрявцевым [4], их основных звеньев. Звенья планетарной передачи, оси которых совпадают с основной осью (геометрически неподвижная ось, относительно которой вращается водило) и воспринимают внешние вращающие моменты, называют основными звеньями. Введены обозначения: *k* – центральное колесо; *h* – водило; *v* – выходной вал.

В планетарно-цевочных механизмах применяют планетарные передачи видов: *k-h-v*, *2k-v*, *2k-h* [1], [3]. Чтобы из планетарной (дифференциаль-

ной) передачи получить редуктор, необходимо зафиксировать (соединить с корпусом) или звено *k*, или звено *h*, или так называемый механизм *w*.

Передача вида *k-h-v* содержит (рис. 3, *а*) эксцентриковый входной вал (*h*), который сообщает планетарное движение находящимся на нём сателлитам. Сателлиты обкатываются по обойме с цевками (*b*). Обкатываясь, сателлит вращается вокруг собственной оси, это вращение передается с помощью специального механизма на выходной вал (*v*). Этим механизмом могут быть муфта Ольдгейма (используется в редукторах фирмы Spinea [9] (рис. 3, *б*)) или механизм параллельных кривошипов (используется в редукторах фирмы Sumitomo[10]).



а) *б)*

Рис. 3. Редуктор по схеме *k-h-v* с зафиксированным корпусом (*а*) и редуктор фирмы Spinea [9] (*б*)

Передача *2k-v* состоит (рис. 4) из двух ступеней: планетарной эвольвентной и планетарно-цевочной. На входном валу расположено солнце планетарной эвольвентной ступени (*a*), оно приводит во вращение сателлиты, расположенные на эксцентриковых валах. Вращаясь, эксцентриковый вал сообщает планетарное движение на сателлиты цевочной ступени, которые обкатываются по обойме с цевками (*b*). Вращение сателлитов передается на выходной вал (*v*).Такая передача реализована в редукторах фирмы Nabtesco [11].

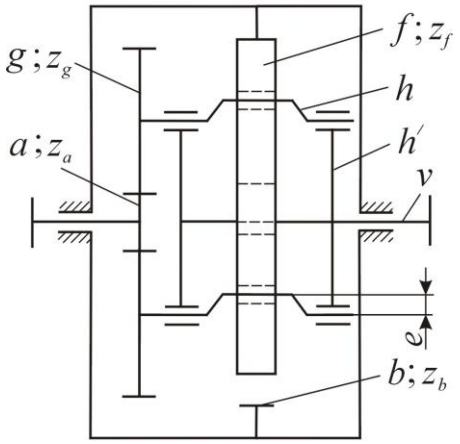


Рис. 4. Редуктор по схеме *2k-v* с зафиксированным цевочным колесом

Передача *2k-h* состоит из эксцентрикового вала (*h*), на котором расположен двухвенцовый циклоидальный сателлит. Эксцентриковый вал сообщает планетарное движение двухвенцовому сателлиту, один из венцов которого (*f*) обкатывается по неподвижной обойме с цевками (*b*), в то время как другой венец (*g*) сообщает вращение подвижной обойме с цевками (*a*).

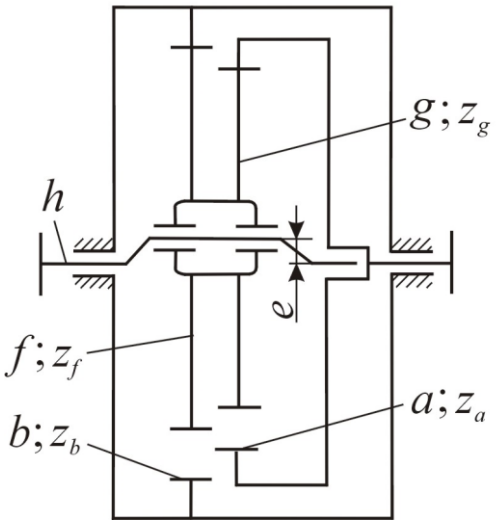


Рис. 5. Редуктор по схеме *2k-h* с зафиксированным цевочным колесом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинематический анализ планетарно-цевочных механизмов. /Иванов А.С. [и др.] //Вестник машиностроения. − 2012 г.− №8. − С.23 − 25.
2. Киреев С.О. Ковалёв В.Н. Структура, кинематика и геометрия планетарных передач с внецентроидным цевочным зацеплением. –
3. Новочеркасск: НГТУ, 1995. – 98 с.
4. Конструктивные исполнения планетарно-цевочных редукторов для

высокоточных приводов / Иванов А.С. [и др.] //Вестник машиностроения. − 2013 г. − №3. − С. 9 −12.
5. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи. − М-Л.: Машиностроение, 1966. – 308 с.
6. Сигов И.В. Исследование планетарно-цевочного редуктора // Передачи в машиностроении. − М.; Машгиз. 1951. − С. 44 −58.
7. Фомин М.В. Планетарно-цевочные передачи : учеб.пособие; МГТУ им. Н. Э. Баумана. − М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. − 62 с.
8. Фомин М.В., Иванов А.С., Ермолаев М.М. Расчет опор качения планетарно-цевочного редуктора //Справочник. Инженерный журнал с приложением. − 2014 г. − №1. С. 29 − 34.
9. Шанников В.М. Планетарные редукторы с внецетроидным зацеплением. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
10. Каталог TwinSpin. Издание 1/2009. // URL: http://www.spinea.sk/download/99_catalogue_uk.pdf (дата обращения 01.03.2012).
11. Каталог «Редуктор серии DRIVE 6000», 2007, 268 с. // URL: http://www.sumitomo-drive.ru/pdf/K-CycloDrive6000(RUS).pdf (дата обращения 01.03.2012).
12. Каталог RVSeriesGearheads // URL: http://www.nabtesco.de/fileadmin/nabtesco/downloads/kataloge/ca_rd_e.pdf (дата обращения 01.03.2012).

A.V. Chirkin, A.S. Ivanov, M.M. Ermolaev

PLANETARYGEARBOXES BASED ON EPI- AND HYPOCYCLOIDAL GEARING

Bauman Moscow State Technical University

Abstract

Theequations forformationof the shape of epi- and hypocycloidal satellites of cycloidal gearing were distributed. The method of calculation of contactstress andrigiddeflections of satellites under the torque were developed. The constructions of actual gearboxes on the base of cycloidal gearing has been obtained.

Keywords: epitrochoidal gearing, hypotrochoidal gearing, planetarylatern gearboxes.

REFERENCES

[1] Kinematicheskij analiz planetarno-cevochnyh mehanizmov./ Ivanov A.S. [and others.] //Vestnik mashinostroenija, 2012, №8. p.23-25.

[2] Kireev S.O., Kovaljov V.N. Struktura, kinematika i geometrija planetarnyh peredach s vnecentroidnym cevochnym zacepleniem. – Novocherkassk: NGTU, 1995. – 98 p. (rus.)
[3] Konstruktivnye ispolnenija planetarno-cevochnyh reduktorov dlja vysokotochnyh privodov. /Ivanov A.S. [and others] //Vestnik mashinostroenija, 2013, №3. p. 9-12. (rus.)
[4] Kudrjavcev V.N. Planetarnye peredachi. M-L.: Mashinostroenie, 1966. 308 p. (rus.)
[5] Sigov I.V. Issledovanie planetarno-cevochnogo reduktora.//Peredachi v mashinostroenii. M. Mashgiz, 1951. – 258 p. (rus.)
[6] Fomin M.V. Planetarno-cevochnye peredachi: ucheb. posobie; MGTU im. N. Je. Baumana. - M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2009. - 62 p. (rus.)
[7] Fomin M.V., Ivanov A.S., Ermolaev M.M. Raschet opor kachenija planetarno-cevochnogo reduktora. //Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem, 2014 ., №1. p. 29-34. (rus.)
[8] Shannikov V.M. Planetarnye reduktory s vnecetroidnym zacepleniem. – M.: Mashgiz, 1948. – 172 p. (rus.)
[9] TwinSpin catalogue.1/2009. // URL: http://www.spinea.sk/download/99_catalogue_uk.pdf (date ftreatment01.03.2012).
[10] Catalogue «DRIVE 6000 Series Reducers», 2007, 268 p.//URL:http://www.sumitomo-drive.ru/pdf/K-CycloDrive6000(RUS).pdf
[11] CatalogueRVSeriesGearheads // URL: http://www.nabtesco.de/fileadmin/nabtesco/downloads/kataloge/ca_rd_e.pdf (date oftreatment 01.03.2012)

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 621.313.13

А.В. Борисевич[1], Д.В. Глебко[2]

БЕЗДАТЧИКОВОЕ ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

[1]Алексей Валерьевич Борисевич, к.т.н.,
инженер-исследователь,
Samsung SDI
South Korea, Cheonan-Si
Тел.: +82 010 4892 3656, E-mail: a.borisevich@samsung.com

[2]Дмитрий Владимирович Глебко, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(950)0055267, E-mail: glebko.di@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены теоретические аспекты векторного управления шаговым двигателем. Дана модель двигателя, описан принцип векторного управления применительно к гибридному шаговому двигателю, приведены соотношения для расчета параметров регуляторов и результаты моделирования. Отдельно рассмотрен вопрос бездатчикового управления на основе оценивания положения ротора электродвигателя и момента на валу с помощью расширенного фильтра Калмана.

Ключевые слова: шаговый двигатель, векторное управление, бездатчиковое векторное управление, расширенный фильтр Калмана, моделирование

Введение

Повышенный интерес к гибридным шаговым двигателям (ШД), а так же новые требования, предъявляемые к качеству выполняемого движения, заставили пересмотреть способ его управления [7]. Так как шаговому управлению, наряду с явными достоинствами, присущ ряд недостатков, которые значительно сужают области применения ШД [8].

Основную проблему пропуска шагов наиболее эффективно можно решить за счет внедрения в привод датчика позиции и использования высокопроизводительного сигнального процессора [1]. Причем, во избежание значительного увеличения стоимости привода, возможным

решением является разработка мехатронного привода на базе ШД, представляющего собой интегрированное устройство, в состав которого входит сам двигатель, система управления и датчик позиции вала [9].

При наличии двух таких компонент как сигнальный процессор и датчик позиции в одном устройстве можно отказаться от использования шаговых методов управления и построить систему управления на основе алгоритма векторного управления. Данный метод уже давно используется в сервоприводах на базе синхронных и асинхронных двигателей.

В настоящей работе мы рассматриваем вопрос векторного управления шаговым двигателем с теоретической точки зрения. Рассматривается модель двигателя, принцип векторного управления и синтез регуляторов.

1. Математическая модель шагового двигателя

Модель гибридного шагового двигателя с двумя обмотками записывается в пространстве состояний в виде [2]:

$$\begin{aligned} \dot{i}_a &= \frac{1}{L}(u_a - Ri_a + K_m \sin(p\theta)\omega), \\ \dot{i}_b &= \frac{1}{L}(u_b - Ri_b - K_m \cos(p\theta)\omega), \\ T_e &= -K_m i_a \sin(p\theta) + K_m i_b \cos(p\theta) - T_{dm} \sin(2p\theta), \\ \dot{\omega} &= \frac{T_e - B\omega - T_m}{J}, \quad \dot{\theta} = \omega \end{aligned} \tag{1}$$

где i_a, i_b – токи в обмотках статора, u_a, u_b – напряжения питания на обмотках статора, K_m – постоянная момента, создаваемая магнитом в отдельности, p – число пар полюсов, θ – угловое положение вала двигателя, ω – скорость вращения вала двигателя, T_{dm} – тормозящий момент, T_e – создаваемый электродвигателем момент на валу, B – коэффициент вязкого трения, T_m – момент механической нагрузки на валу, R – сопротивление обмотки статора, L – индуктивность обмотки статора.

Электрические величины i_a, i_b и u_a, u_b можно измерять относительно системы координат, которая вращается со скоростью $\omega_s = p\omega$. После применения преобразования Парка к напряжениям статора получаем:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_s & \sin\theta_s \\ -\sin\theta_s & \cos\theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Тогда относительно вращающейся системы координат, система уравнений модели записывается в виде [3]:

$$\dot{i}_d = \frac{u_d - Ri_d}{L} + p\omega i_q,$$
$$\dot{i}_q = \frac{u_q - Ri_q - K_m\omega}{L} - p\omega i_d,$$
$$T_e = K_m i_q - T_{dm}\sin(2p\theta), \quad \dot{\omega} = \frac{T_e - B\omega - T_m}{J}, \tag{3}$$
$$\dot{\theta} = \omega$$

где i_d, i_q – результат применения преобразования Парка (2) к токам статора i_a, i_b.

Из модели (3) естественным образом следует векторный принцип управления шаговым электродвигателем как независимое регулирование токов i_q и i_d.

2. Векторное управление

Принцип векторного управления, применительно к модели шагового двигателя (3), формулируется в решении трех задач:

- управление током i_d с помощью изменения u_d,
- управление током i_q с помощью изменения u_q,
- управление скоростью ω с помощью изменения уставки тока i_q.

Отдельно еще формулируется задача следящего привода как управление положением θ с помощью изменения уставки скорости ω.

Рассмотрим решение каждой из вышеперечисленных задач.

2.1 Управление скоростью

положим, что задачи управления токами i_d и i_q решены. Тогда оставшаяся часть модели двигателя записывается в виде

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}\left(K_m i_q - T_{dm}\sin(2p\theta) - B\omega - T_m\right), \dot{\theta} = \omega, \tag{4}$$

где i_q подразумевается как уставка квадратурного тока.

Первоначальное решение – рассматривать слагаемое $\Delta T = -T_{dm}\sin(2p\theta) - B\omega - T_m$ как возмущение. Тогда для расчета коэффициентов ПИ-регулятора, невозмущенная система представляется в виде интегратора

$$\frac{\omega(s)}{i_q(s)} = \frac{K_m}{J}\cdot\frac{1}{s}, \tag{5}$$

где $s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Исходными параметрами для расчета является полоса пропускания по отработке скорости $\omega_{0\omega}$, и коэффициент демпфирования ζ_ω . Коэффициенты ПИ-регулятора определяются соотношениями, которые легко можно получить, рассматривая знаменатель передаточной функции системы с замкнутой обратной связью:

$$k_i^\omega = \frac{J\omega_{0\omega}^2}{K_m}, k_p^\omega = \frac{2J\zeta_\omega\omega_{0\omega}}{K_m}. \quad (6)$$

Следует заметить, что эти значения параметров получены без учета возмущающего воздействия ΔT и должны быть уточнены в процессе моделирования или более тонких методов синтеза.

2.2 Управление токами статора

Чаще всего управление токами статора осуществляется с помощью релейного регулятора, естественным образом реализующего широтно-импульсную модуляцию напряжений статора. Мы рассмотрим другой вариант, более характерный для векторного управления – использование двух ПИ-регуляторов.

Заметим, что уравнение момента T_e в модели (3) не зависит от компонента тока статора i_d . Следовательно, для минимизации мощности потерь в статоре можно положить нулю уставку этого тока: $i_d^* = 0$. Уставка компонента i_q вырабатывается регулятором скорости и определяется моментом нагрузки на валу T_m .

Решим задачу определения максимальных значений напряжений статора. Для упрощения положим $T_{dm} = 0$ и $B = 0$. Тогда можно записать условия установившегося режима, приравняв нулю производные в (3):

$$\begin{gathered}\frac{u_d - Ri_d}{L} + p\omega i_q = 0,\\ \frac{u_q - Ri_q - K_m\omega}{L} - p\omega i_d = 0,\\ T_m = K_m i_q.\end{gathered} \quad (7)$$

Отсюда сразу же следует с учетом $i_d^* = 0$:

$$\begin{gathered}i_q^{\max} = \frac{T_m}{K_m},\\ u_d^{\max} = -pL\omega i_q = -pL\omega\frac{T_m}{K_m},\\ u_q^{\max} = K_m\omega + Ri_q = K_m\omega + R\frac{T_m}{K_m},\end{gathered} \quad (8)$$

где значения T_m и ω подразумеваются как максимальные.

Для расчетов параметров ПИ-регуляторов тока, по аналогии с управлением скоростью, выделим следующие возмущающие воздействия в уравнениях модели для токов $\Delta i_d = p\omega i_q$, $\Delta i_q = -\frac{K_m\omega}{L} - p\omega i_d$. Тогда уравнения токов могут быть записаны следующим образом

$$\begin{aligned} \dot{i}_d &= \frac{u_d - Ri_d}{L} + \Delta i_d \approx \frac{u_d - Ri_d}{L}, \\ \dot{i}_q &= \frac{u_q - Ri_q}{L} + \Delta i_q \approx \frac{u_q - Ri_q}{L}. \end{aligned} \tag{9}$$

Отсюда, динамика тока – это ничто иное как две независимые системы первого порядка с аддитивным возмущениями Δi_d и Δi_q.

Игнорируя возмущения, можно записать передаточные функции от напряжения статора к току статора

$$\frac{i_d(s)}{u_d(s)} = \frac{i_q(s)}{u_q(s)} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\tau s + 1}, \tag{10}$$

где $\tau = L / R$ – постоянная времени статора, $s = d / dt$ – оператор Лапласа.

Составляя передаточную функцию системы регулирования тока вместе с ПИ-регулятором, знаменатель получившегося выражения будет соответствовать характеристическому уравнению $s^2 + 2\omega_{0s}\zeta_s s + \omega_{0s}^2$ если коэффициенты ПИ-регулятора определяются как

$$k_i^s = L\tau\omega_{0s}^2, k_p^s = 2L\tau\zeta_s\omega_{0s} - L \tag{11}$$

3. Бездатчиковое векторное управление

3.1 Расширенный фильтр Калмана

Расширенный фильтр Калмана (EKF) – это вариант широко известного фильтра Калмана для нелинейных систем, который получается линеаризацией оцениваемой системы вокруг текущего состояния [10]. Расширенный фильтр Калмана является де-факто стандартом в теории нелинейного оценивания и используется в навигационных системах, например в GPS [4,6].

В настоящей работе используется формулировка фильтра Калмана в непрерывном времени, которая может быть резюмирована следующим образом.

Пусть имеется система

$$\dot{x} = f(x,u) + w(t), y = h(x) + v(t), \tag{12}$$

где $x \in R^n$, $y,u \in R^m$, а также $w(t) \in R^n$ и $v(t) \in R^m$ – случайные

нормально распределенные вектора с нулевым математическим ожиданием и матрицами ковариации соответственно $Q(t)$ и $R(t)$: $w(t)$: $N(0;Q(t))$, $v(t)$: $N(0;R(t))$.

Определим матрицы Якоби для линеаризации системы (12)

$$F = \frac{\partial f}{\partial x} = D_x f,$$
$$H = \frac{\partial h}{\partial x} = D_x h. \tag{13}$$

В таком случае, расширенный фильтр Калмана – это применение классического фильтра Калмана к (12) с помощью линеаризации (13). Алгоритм может быть сформулирован следующим образом [5]:

$$K = P \cdot H^T \cdot R^{-1},$$
$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + K \cdot (y - h(\hat{x})), \tag{14}$$
$$\dot{P} = F \cdot P + P \cdot F^T - K \cdot H \cdot P + Q,$$

где $\hat{x}(0) = E[x(0)]$, и $P(0) = Var[x(0)]$, $P \in R^{n \times n}$ – симметричная положительно определенная ковариационная матрица.

3.2 Применение расширенного фильтра Калмана для оценки состояния шагового двигателя

Рассматривая модель двигателя (3) можно определить вектор состояний как $x = (i_d, i_q, \omega, \theta)^T$, вектор входов $y = (i_d, i_q)^T$, а также $u = (u_d, u_q)^T$. Уравнения модели двигателя могут быть переписаны в матричном виде

$$\dot{x} = f(x) + B \cdot u = \begin{pmatrix} \frac{u_d - R i_d}{L} + p\omega i_q \\ \frac{u_q - R i_q - K_m \omega}{L} - p\omega i_d \\ \frac{K_m i_q - T_{dm} \sin(2p\theta) - B\omega - T_m}{J} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \tag{15}$$

Матрицы Якоби (13) для модели (3) записываются в виде:

$$F = \begin{pmatrix} -R/L & p\omega & pi_q & 0 \\ -p\omega & -R/L & -i_d p - K_m/L & 0 \\ 0 & K_m/J & -B/J & -2pT_{dm}\cos(2p\theta)/J \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \qquad (16)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

После определения матриц F и H согласно (16) расширенный фильтр Калмана в форме (14) дает оценку углового положения θ как одного из компонент оцениваемого вектора состояния $\hat{x}$.

3.3 Совместное оценивание углового положения и момента нагрузки на валу

Предложенный в предыдущем пункте подход может быть применен только если $T_m = 0$. В противном случае, поскольку на динамику ω действует аддитивное возмущение T_m / L, то оценка состояния системы $\hat{x}$ не сходится к истинному состоянию x.

В настоящей работе рассматривается частный случай, когда момент нагрузки на валу T_m считается постоянным: $T_m = const$. Основной принцип оценки момента нагрузки на валу T_m состоит в его представлении как состояния объекта управления. Для этого дополним модель (3) еще одним уравнением состояния:

$$\dot{T}_m = 0. \qquad (17)$$

Новый расширенный вектор состояния модели определяется как $\bar{x} = (i_d, i_q, \omega, \theta, T_m)^T$. Также можно записать матрицы Якоби для расширенной системы:

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} -R/L & p\omega & pi_q & 0 & 0 \\ -p\omega & -R/L & -i_d p - K_m/L & 0 & 0 \\ 0 & K_m/J & -B/J & -2pT_{dm}\cos(2p\theta)/J & -1/J \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad (18)$$

$$\bar{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Применение фильтра Калмана вида (14) к системе с расширенным состоянием $\bar{x}$ и матрицами $\bar{F}, \bar{H}$ позволяет получить оценку углового положения θ вместе с оценкой момента нагрузки на валу T_m.

4. Результаты моделирования

Для верификации предложенного подхода было проведено моделирование в программной системе MATLAB/Simulink. В качестве параметров модели использованы значения, соответствующие малогабаритному шаговому двигателю стандарта NEMA 23, номинальным током 4А и моментом 1.3 Нм. Параметры двигателя следующие: $L = 1.4$ мГн, $R = 0.7$ Ом, шаг 1.8 градуса, $p = 50$, $T_d m = 0.002$ Н м, $J = 0.12 \cdot 10^{-6}$, $B = 10^{-4}$ кг м/с, $K_m = 0.25$ Н м / А. Расчетные параметры ПИ-регуляторов $\omega_{0\omega} = 200$ Гц, $\zeta_\omega = 10$, $\omega_{0s} = 500$ Гц, $\zeta_s = 1$. Уставка скорости выбрана $\omega^{ref} = 300$ рад/с. В момент времени $t_0 = 0.25$ момент нагрузки ступенчато изменился с 0 до 0.5 Нм. Результат моделирования показан на рис. 1.

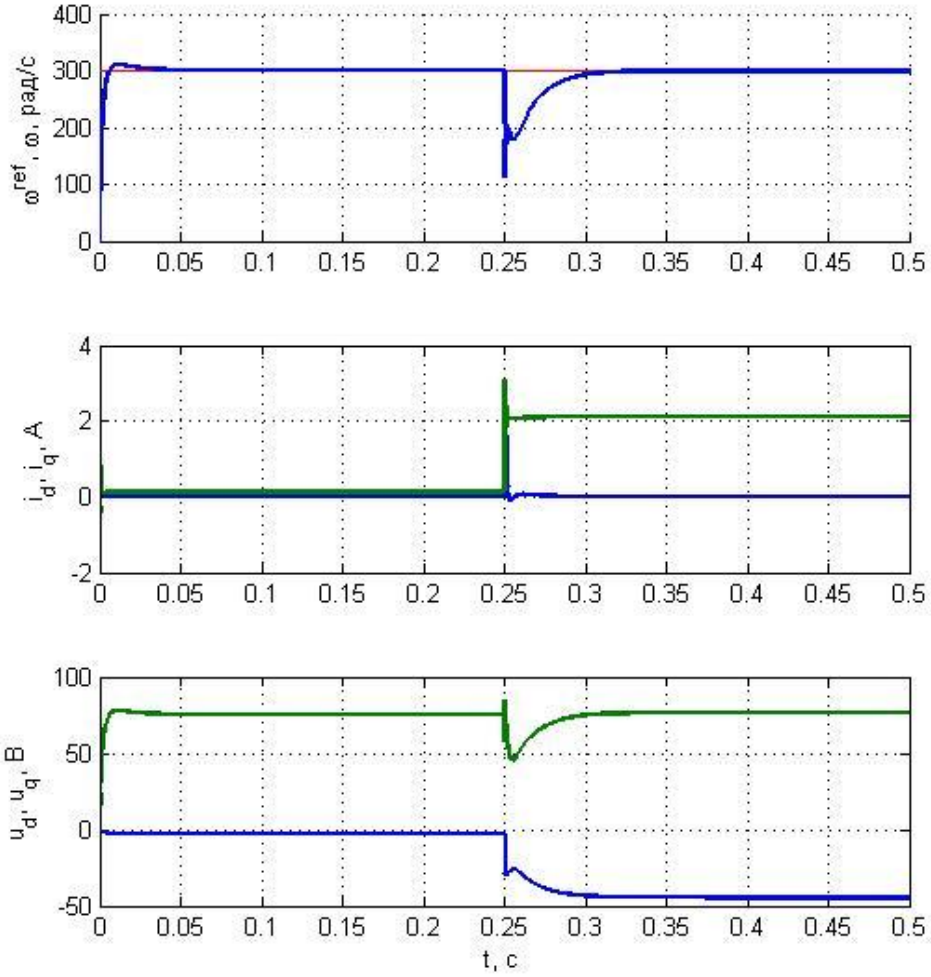


Рис. 1. Результаты моделирования векторного управления шаговым двигателем

Для демонстрации возможности расширенного фильтра Калмана по определению углового положения ротора и момента на валу было проведено моделирование бездатчикового векторного управления. Сравнивалось два алгоритма управления: с датчиком положения и без датчика, где угловое положение и скорость определялось с помощью расширенного фильтра Калмана. Рассматривалось старт двигателя под нагрузкой 0.5 Нм. В качестве матриц ковариации использовались $Q = 0.01I$, $R = 0.001I$, где I – единичная диагональная матрица соответствующей размерности.

Результаты моделирования бездатчикового управления показаны на рис. 2. Скорости обозначены следующим образом ω^{ref} – уставка скорости, ω^{EKF} – скорость при бездатчиковом управлении, ω^{sens} – скорость при векторном управлении с датчиком.

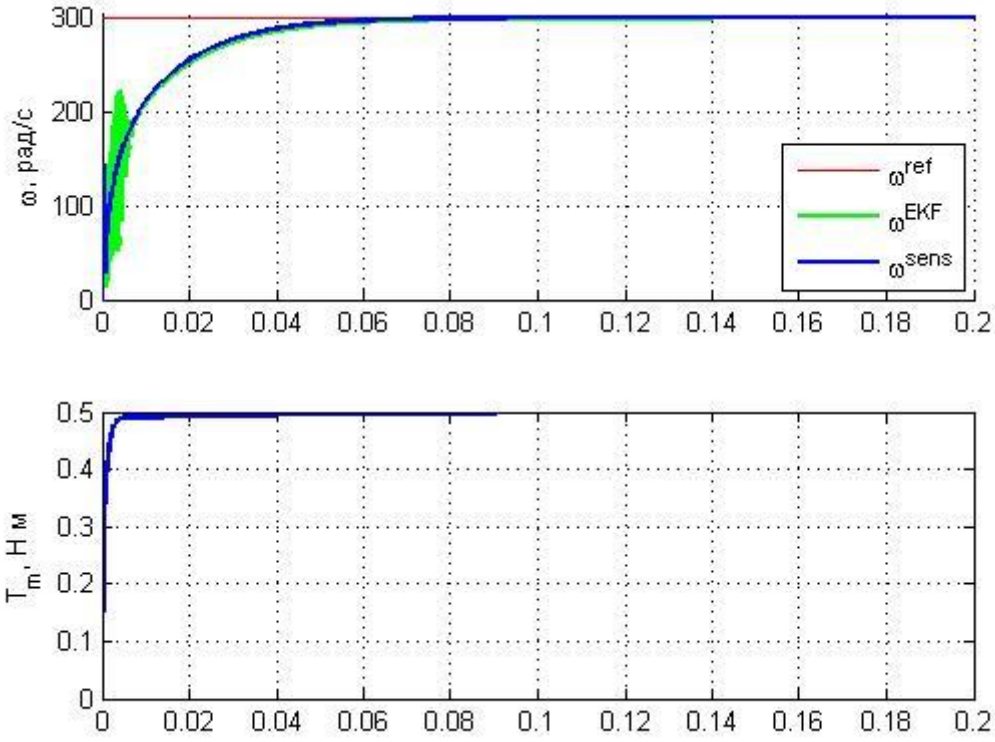


Рис. 2. Результаты моделирования векторного бездатчикового управления шаговым двигателем (отработка скорости и оценка момента)

Как видно из результатов, переходной процесс установки скорости в бездатчиковом управлении существенно не отличается от варианта с использованием датчика положения.

Заключение

В работе были рассмотрены теоретические аспекты векторного бездатчикового управления шаговым двигателем. Показано, что основной подход векторного управления может быть применен к гибридному шаговому двигателю как к многополюсной двухфазной синхронной

машине. Установлены соотношения для расчета параметров ПИ-регуляторов системы векторного управления. Исследована целесообразность использования расширенного фильтра Калмана для реализации бездатчикового векторного шагового электропривода. Доказана на основе имитационного моделирования возможность совместного оценивания положения ротора электродвигателя и момента на валу.

Дальнейшая работа будет сконцентрирована на экспериментальной аппаратной реализации предложенных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А.О., Цывинский М.М. Эволюция приводов на базе шаговых двигателей [Электронный документ] (http://www.servotechnica.ru/catalog/
2. type/article/index.pl?id=42). Проверено 11.02.2014
3. Bendjedia, M.; Ait-Amirat, Y.; Walther, B.; Berthon, A., "Sensorless control of hybrid stepper motor," Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on , vol., no., pp.1,10, 2-5 Sept. 2007 doi: 10.1109/EPE.2007.4417444
4. Bendjedia, M.; Ait-Amirat, Y.; Walther, B.; Berthon, A., "Position Control of a Sensorless Stepper Motor," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.27, no.2, pp.578,587, Feb. 2012 doi: 10.1109/TPEL.2011.2161774
5. Конаков А.С. Алгоритм адаптивного двухшагового расширенного фильтра Калмана в задаче совместной оценки навигационного вектора и смещения нулей датчика МЭМС в слабосвязанной комплексированной навигационной системе // А.С. Конаков, В.В. Шаврин, Д.О. Ноздреватых, А.А. Савин, В.И. Тисленко // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – № 4 (30), 2013. – С. 23-30
6. Einicke G. A. Smoothing, Filtering and Prediction-Estimating the past, present and future // New York: InTech. – 2012. – 276 pp.
7. Ferdinando, H.; Khoswanto, H.; Purwanto, D., "Embedded Kalman Filter for Inertial Measurement Unit (IMU) on the ATMega8535," Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2012 International Symposium on , vol., no., pp.1,5, 2-4 July 2012
8. Фатыхов Ю.А. Подход к построению системы автоматического управления рабочими органами разделочно-филетировочного оборудования (Часть II. Реализация прямого цифрового управления шаговым приводом) / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, А.В. Шлемин, О.П. Пономарев // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2007. – №34(10)
9. Ридико Л.И., "Раз шажок, два шажок..."// Журнал "Основы схемотехники" – №6-9/2001
10. Тихонов А.О., Щербаков В.Л., Универсальный сервопривод СПШ10

[Электронный документ] (http://www.servotechnica.ru/catalog/type/article/index.pl?id=39). Проверено 12.02.2014

11. А.А. Дегтярёв, Ш. Тайль, Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – М., 2003. – №26. – 35 с.

A.V. Borisevich[1],D.V. Glebko[2]

SENSORLESS VECTOR STEPPER MOTOR CONTROL BASED ON EXTENDED KALMAN FILTER

[1]Samsung SDI, South Korea, Cheonan-Si;
[2]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The paper considers theoretical aspects of vector stepper motor control. Engine model is given, the principle of vector control for a hybrid stepping motor is described, relations for calculating controller parameters and simulation results are given. Separately considered sensorless stepper control based on the estimation of the rotor position and shaft torque of the motor using the extended Kalman filter.

Key words: stepper motor, vector control, sensorless vector control, extended Kalman filter, simulation

REFERENCES

[1] Tikhonov A.O., Tsivinskiy M.M. Evolyutsiya privodov na baze shagovykh dvigateley [Electronic document] (http://www.servotechnica.ru/catalog/type/article/index.pl?id=42). Checked 11.02.2014

[2] Bendjedia, M.; Ait-Amirat, Y.; Walther, B.; Berthon, A., "Sensorless control of hybrid stepper motor," Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on , vol., no., pp.1,10, 2-5 Sept. 2007 doi: 10.1109/EPE.2007.4417444

[3] Bendjedia, M.; Ait-Amirat, Y.; Walther, B.; Berthon, A., "Position Control of a Sensorless Stepper Motor," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.27, no.2, pp.578,587, Feb. 2012 doi: 10.1109/TPEL.2011.2161774

[4] Konakov A.S. Algoritm adaptivnogo dvukhshagovogo rasshirennogo filtra Kalmana v zadache sovmestnoy otsenki navigatsionnogo vektora i smeshcheniya nuley datchika MEMS v slabosvyazannoy kompleksirovannoy navigatsionnoy sisteme : A.S. Konakov, V.V. Shavrin, D.O. Nozdrevatykh, A.A. Savin, V.I. Tislenko : Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – № 4 (30), 2013, – p. 23-30

[5] Einicke G. A. Smoothing, Filtering and Prediction-Estimating the past, present and future // New York: InTech. – 2012. – 276 pp.
[6] Ferdinando, H.; Khoswanto, H.; Purwanto, D., "Embedded Kalman Filter for Inertial Measurement Unit (IMU) on the ATMega8535," Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2012 International Symposium on , vol., no., pp.1,5, 2-4 July 2012
[7] Fatykhov Yu.A. Podkhod k postroyeniyu sistemy avtomaticheskogo upravleniya rabochimi organami razdelochno-filetirovochnogo oborudovaniya (Chast II. Realizatsiya pryamogo tsifrovogo upravleniya shagovym privodom) : Yu.A. Fatykhov, O.V. Ageyev, A.V. Shlemin, O.P. Ponomarev : Nauchny zhurnal KubGAU [Electronic resource]. – Krasnodar: KubGAU, 2007. – №34(10)
[8] Ridiko L.I., "Raz shazhok, dva shazhok..."// Magazine "Osnovy skhemotekhniki" – №6-9/2001
[9] Tikhonov A.O., Shcherbakov V.L., Universalny servoprivod SPSh10 [Electronic document] (http://www.servotechnica.ru/catalog/type/article/index.pl?id=39). Checked 12.02.2014
[10] A.A. Degtyaryov, Sh. Tayl, Elementy teorii adaptivnogo rasshirennogo filtra Kalmana : Preprint IPM im. M.V.Keldysha RAN. – M., 2003. – №26. – 35 p.

УДК 655.1

В. В. Ваганов[1], К. П. Колтышев[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ “WEB TO PRINT”

1Вячеслав Владимирович Ваганов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)294-4115, E-mail: prvaganov_spb@mail.ru

2Константин Павлович Колтышев, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(951)640-7092, E-mail: nazarinel@rocketmail.com

Аннотация

Популярность web-to-print в маркетинговых отделах компаний растет все больше и больше. С web-to-print компании сокращают расходы на создание рекламных макетов, ускоряют процессы и повышают качество готовых печатных материалов. Целью данной работы является исследование особенностей реализации технологии web-to-print. Данная статья описывает, с чем именно компании сталкиваются и какие критерии надо учитывать при выборе данной системы. Также был проведен анализ ситуации на полиграфическом рынке России в свете перспектив запуска данного сервиса. На основании результатов анализа были сделаны выводы о проблемах реализации сервиса web-to-print в России.

Ключевые слова: реализация web-to-print, w2p, сложности внедрения web-to-print, критерии выбора системы w2p.

Под технологией “Web To Print” понимаются все технологии создания электронной текстово-графической версии продукта, подлежащего полиграфическому воспроизведению на материальном носителе, с использованием коммуникационных возможностей интернета для связи заказчика и изготовителя продукта. Продукт, подлежащий полиграфическому воспроизведению на материальном носителе, может иметь стандартную форму (шаблон) с изменяемым содержанием или быть полностью оригинальным. Подготовку формы (шаблона), правил его заполнения, программных средств для приведения создаваемого изображения к виду, пригодному для полиграфического воспроизведения, осуществляет специализированная

компания-разработчик. Взаимодействие заказчика и изготовителя печатного продукта происходит в интернет-среде. [1]

Продукция, произведенная с применением процесса web-to-print включает: визитные карточки, брошюры и сувенирную продукцию, а также всевозможную печатную продукцию, полноцветную или черно-белую, отпечатанную на различных бумагах и печатных машинах. [2]

Перечислим, что же нужно для успешного внедрения технологии web-to-print? Можно сказать, что залогом успеха и получения максимального результата от использования W2P является предварительный анализ основных требований компании к системе. Ниже представлен список самых важных критериев, которые необходимо учесть при выборе системы Web2Print:

• Программное обеспечение:

Какое программное обеспечение следует использовать: стандартное или сделанное под заказ? Сможет ли модульная система удовлетворить все потребности?

• Модификация и адаптация:

Какие требуются изменения системы и насколько важна гибкость поставщика услуг? Достаточно ли небольшой модификации или же требуются серьезная адаптация системы?

• Емкость:

Насколько емким должно быть решение web-to-print относительно количества пользователей, требуемой памяти и возможности добавления дополнительных печатных материалов?

• Языки:

На каком языке/языках должна быть доступна система сейчас и в дальнейшем?

• Шаблоны:

Как будут загружаться печатные файлы? С какими типами файлов (QuarkXPress®, Adobe® InDe-sign®) будет работать система? [3]

• Удобство в использовании:

Каковы требования к удобству использования и функции предварительного просмотра? Должен ли инструмент включать в себя редактор WYSIWYG, т.е. редактор сразу отображающий все изменения в окне обзора? [4]

• Типы печатных материалов:

Какие печатные материалы должны создаваться системой на первом этапе, а какие в дальнейшем?

• Рабочие процессы:

Какие рабочие процессы должна воспроизводить система?

Чтобы увидеть реальные отличия от существующего технологического процесса и быть готовым к этим изменениям, нужно пристально взглянуть на все участки цепочки по исполнению «простого» заказа. Например,

визиток (вместо «визиток» могут быть - бланки, конверты, приглашения, флаеры и т.д.). [5]

Ручной: клиенту нужна новая визитка - клиент звонит\пишет в типографию - менеджер принимает заявку - менеджер передает ее верстальщику - верстальщик отыскивает архив с макетами клиента - верстальщик вносит правку - верстальщик генерирует pdf\jpg или распечатку для утверждения - верстальщик передает ее менеджеру - менеджер утверждает макет сам или у клиента - менеджер дает «добро на печать» - заказ ждет своей очереди. [6]

Автоматизированный (web-to-print): клиенту нужна новая визитка - он входит в «личный кабинет» на сайте - выбирает готовый шаблон и вносит нужные правки - готовый и утвержденный макет в pdf попадает сразу к печатнику в очередь.

Можно назвать две самые распространённые проблемы, которые могут возникнуть при (после) реализации Web2Print: [7]

1. Неграмотный заказчик, который вечно что-то напутает. Попытается выдать за макет, набранный и отформатированный десятью разными шрифтами в Word текст, разбавленный тщательно раскрашенными в роскошной гамме RGB диаграммами и любовно отобранными из интернета красивыми «фотками» с экранным разрешением.
2. Вторая связана с деньгами. Это просто дорого. Точнее — слишком дорого, чтобы можно было себе позволить. Цена вопроса — от десятков до сотен тысяч, и не рублей. Как заплатить столько денег за то, что нельзя потрогать? Не за сверкающую сталью печатную машину, не за другие столь милые сердцу полиграфиста «игрушки», а за софт. Сама по себе идея покупки ПО уже воспринимается спокойно, более того — считается многими дополнительной гарантией безопасности бизнеса, но платить деньги, сравнимые со стоимостью серьёзного оборудования, — это многим кажется слишком радикальным. [8]

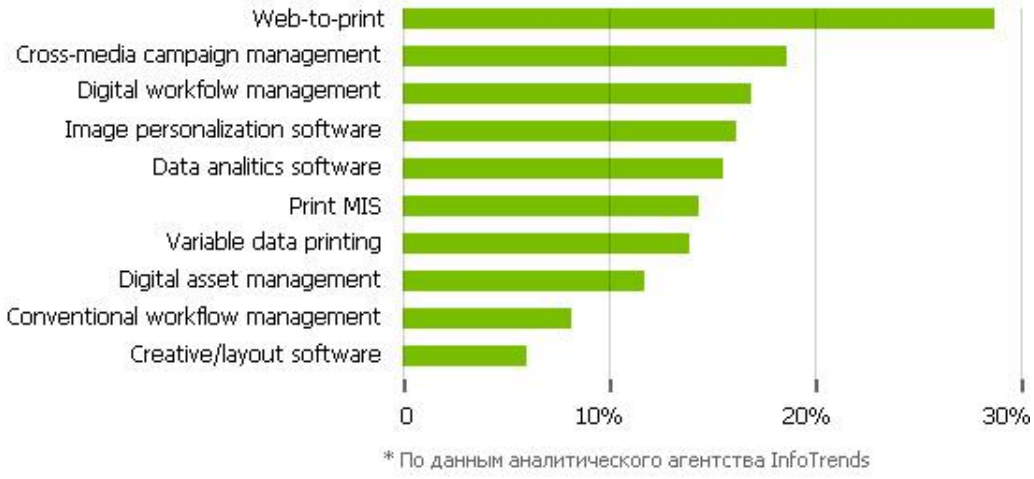


Рис. 1. Во что будут инвестировать европейские типографии в 2014 году [4]

Итак, с точки зрения возможностей, web-to-print решения выглядят весьма привлекательно, но провал проекта по их внедрению обычно происходит на стратегическом уровне, когда выяснятся, что выбран продукт, которые не подходит для работы с выбранной аудиторией, регионом и т.д. В каких случаях выгоднее использовать web-to-print:

1. Количество вариаций эскиза. Чем больше индивидуальных вариаций печатных материалов создается на основе одного шаблона, тем большей экономии можно достичь с модулем web-to-print. [9]
2. Многократное использование эскизов. Чем дольше и чаще используются эскизы, тем больше выгоды получает компания от web-to-print. Если дело касается однократной работы, т.е. индивидуальных и различающихся рекламных объявлений, то использование модуля web-to-print в данном случае не очень уместно.
3. Частота коммуникации. Чем выше частота коммуникаций, тем чаще компания выигрывает от простого и быстрого создания печатных материалов с web-to-print.
4. Для различных печатных материалов. Когда решение web-to-print установлено, есть смысл использовать его для всех печатных материалов компании, максимально увеличивая производительность системы. [10]

Тут стоит перейти к рассмотрению ситуацию с данной технологией в России. Далее, стоит уточнить, что, ввиду вполне объективных причин, имеет смысл больше говорить не о том, каким образом лучше реализовать web-to-print в России, а скорее о том, какие сложности будут стоять на пути или, даже, почему это не предоставляется возможным. Итак, давайте рассмотрим и перечислим основные преграды, встающие перед отечественными полиграфистами, пожелавшими запустить сервис W2P, и поразмышляем, каким образом их можно преодолеть. Рассмотрим web-to-print в условиях российского рынка. Особенностью отечественного рынка является то, что в доля малых полиграфических предприятий с небольшим объем переработки (до 2 млн. евро в год) продукции очень значительна, и отсюда, в свою очередь, вытекают многие проблемы и особенности, связанные с реализацией информационной технологии web-to-print в России.

Это может показаться удивительным, но многие российские предприниматели уже изучили предложения по удешевлению процесса печати и весьма успешно внедряют на своих предприятиях технологию web-to-print. Давайте обратимся к официальной статистике. Итак, по данным компании Pixlpark, более 40% российских типографий только проявляют интерес к онлайн-печати. Еще 25% начали подготовку к внедрению «облачных» технологий и даже заключили соответствующие контракты с провайдерами, и 35% компаний успели запустить сайт и начали предлагать новые услуги на российском рынке. [7]

Попытаемся проанализировать, что сдерживает внедрение W2P конкретно в отечественных типографиях.

1. Некорректная формулировка задания, в результате чего приходится так или иначе общаться с менеджером, но под w2p понимается прежде всего возможность автоматизированного, без участия менеджера типографии, приёма заказов на печать через интернет. Ключевое словосочетание здесь — «без участия менеджера». [10]
2. Макеты. Приходится работать не с тем, что нужно типографии, а с тем, что есть у клиента. Поэтому обработка, доводка макета заказчика — обычное дело.
3. В России очень мало людей, умеющих обращаться с формами заказа через интернет. Web-to-print — технология интересная, но многие считают, что клиенты до неё ещё не доросли. Им проще позвонить и передать то же самое на словах. Главный довод противников введения web-to-print состоит в том, что целевой аудитории таких сервисов просто будет несподручно разбираться с веб-интерфейсом. Среднестатистический представитель малого бизнеса просто не в состоянии самостоятельно сделать дизайн визитки, но возьму на себя смелость предположить, что навыки работы с компьютерами у нашего населения ненамного ниже, чем у других европейцев. Дело в том, что реальный процент людей, которые будут заказывать полиграфию через Интернет, куда меньший, чем процент умеющих общаться с компьютером.
4. Стереотипы - как только появляются у типографии свободные средства, тут же покупают новую печатную машину. Полиграфисты постоянно выбирают постоянно между информационными технологиями и железом.
5. Риск. Как известно, статистика знает практически все, но ей неизвестно, сколько же у нас в стране реально печатают, и, что самое главное, сколько типографии фактически берут денег за напечатанную продукцию. Следовательно, сложно сказать, какие инвестиции нужны для того, чтобы что-то изменить в отрасли. Отсюда возникает резонный вопрос: «А стоит ли рисковать?». Зачем пересматривать дорогостоящие предложения, инвестировать в будущее, которое так сложно предугадать? Ведь куда безопаснее развиваться все тем же экстенсивным путем, а то и не развиваться вообще, резонно дожидаясь наступления более благоприятного инвестиционного климата. [5]

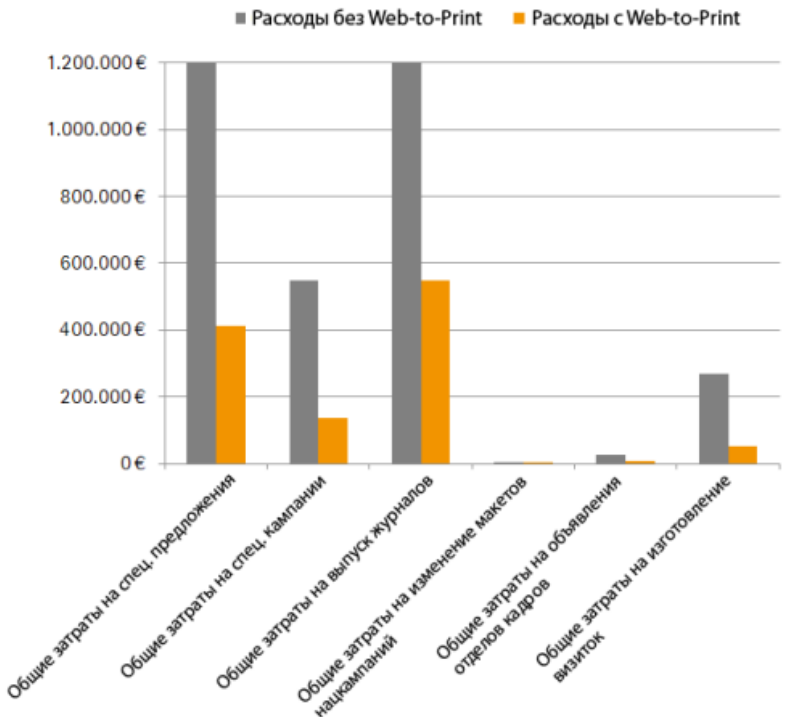


Рис. 2. Сокращение расходов с web-to-print [6]

6. Немаловажным фактором также выступает отсутствие внятных предложений дистрибуторов, и тут дело даже не в предложениях крупных корпораций, а в пиаре меньших компаний-производителей решений для web-to-print – как отечественных, так и зарубежных. [1]
7. Перед компаниями электронной коммерции, рассчитывающими на тысячи заказов и организующими централизованное массовое производство, встает вопрос доставки, который является сильным блокирующим фактором. Российские доставочные компании и почта проигрывают европейским по стоимости или срокам в разы. В цифрах это выглядит следующим образом: в Европе стоимость изготовления комплекта визиток примерно 60 рублей, стоимость доставки для крупного ритейлера: 30-40 рублей! Поэтому печатать централизовано и доставлять – выгодно. В России стоимость изготовления комплекта визиток составляет приблизительно те же 60 рублей, а вот стоимость доставки даже внутри одного города – 150-250 рублей. Доставка между городами курьерскими компаниями обходится значительно дороже: 300-400 рублей. [3]

Подумаем немного над тем, как можно избежать некоторых вещей, перечисленных выше и о том, каким отечественным компаниям можно посоветовать уже сейчас начинать внедрять технологию W2P. Стоит уточнить, что 95% проекта web-to-print – разработка программной части, вебсайта и его продвижения, и лишь 5% времени занимает привязка к конкретной аппаратуре. [4]

Это значит, что приспособить его возможно практически к любому производству, при наличии правильной стратегии. Никто не запрещает начать с малого, экспериментировать с предложениями, постепенно переводить дружественных клиентов на новую платформу, грамотно оптимизируя ее. Конечно, большинству наших компаний будет проблематично приобретать готовые решения, но постепенно наращивать функционал некой базовой платформы для электронной коммерции – вполне подъемная задача.

На наш взгляд, модель можно адаптировать для российского рынка избавившись от централизованной печати, но сохранив эффективность процессов принятия заказа. А именно, использовать Web2Print решение и опыт в электронной коммерции для привлечения клиентов и автоматизированного принятия заказов онлайн и в стандартизированной форме направлять заказ в типографию-партнер в непосредственной близости к заказчику – в его городе или даже районе. Стандартизированная форма заказа и гарантии со стороны принявшей заказ онлайн-компании (назовем ее брокером), позволят типографии-исполнителю не тратить время и ресурсы на согласование заказа, прием оплаты и ведение клиента, а значит предложить значительно лучшие цены для клиентов, пришедших по каналу Web2Print.

Сейчас, как минимум, готовится к запуску еще несколько проектов на платформе web-to-print в России. В основном, это молодые и амбициозные цифровые типографии, которые придумали немало интересных «фич» и оригинальных идей с хорошим потенциалом

В чём же всё-таки может быть залог успешного W2P сервиса в России? На основании уже запущенных проектов можно сказать, что успеха добиваются те, кто старается быть максимально ориентирован на клиента — начиная от дизайна сайта, заканчивая техподдержкой.

В данной статье были рассмотрены некоторые аспекты, связанные с реализацией технологии web-to-print в типографиях и издательствах. Особое внимание было уделено проблемам, возникающим при попытке внедрения данной системы на отечественных предприятиях.

Несмотря на то, что на российском рынке присутствуют хорошие web-to-print программные решения, обычная типография, создавшая или купившая такое решение, вряд ли сможет привлечь достаточное количество трафика через онлайн каналы, чтобы создать конкурентное преимущество в виде низкой цены и иметь сколько-нибудь ощутимую прибыль.

Значит, добиться успеха с большей вероятностью смогут компании, имеющие хороший опыт в электронной коммерции и рассчитывающие на тысячи заказов в месяц.

Конечно, выше перечислены далеко не все сложности и подводные камни, стоящие на пути новаторов, решившихся запускать сервис web-to-print в наших широтах. Заниматься этим стоит тем типографиям, которые

могут себе позволить выделить огромное количество времени на разработку и интеграцию качественного продукта, и решать большое количество проблем, появляющихся в процессе работы.

В данной статье была проведена экстраполяция идей, изложенных в «Применение информационной технологии “WEB TO PRINT” в издательствах и типографиях вузов» [11], до издательств и типографий не только вузов, а России в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наноматериалы и нанотехнологии в полиграфии / В. В. Ваганов, Г. В. Ваганов; С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2014 (Санкт-Петербург : Политехнический ун-т). - 238 с.
2. Гельмут Кипхан. Энциклопедия по печатным средствам информации. – М.:МГУП, 3003 – 1023 с.
3. Перлов В.И. Маркетинг на предприятии в отрасли печати: учеб. пособие – М.: МГУП, 2000 - 284 с.
4. Самсонов С.И., Терентьев И.П. Publish №3 [135] март 2011 – СПб.: Изд-во Открытые системы, 2011 – 71 с.
5. Виноградов Е.Л., Ваганов В.В. Цифровые технологии оперативной полиграфии: учеб. пособие – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 – 62 с.
6. Виноградов Е.Л., Ваганов В.В. Физика в полиграфии. 2-е издание: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012. – 218 с.
7. Меняев М.Ф. Цифровые системы управления техническими процессами в полиграфии: учеб. пособие– М.:МГУП, 2006 - 126 с.
8. Ванников А.В., Уарова Р.М. Процессы и технологии цифровой печати – М: МГУП, 2009 – 260 с.
9. Самарин Ю.Н., Солонец В.И. Технологические процессы и производства: Учебное пособие. - М: МГУП, 2009 – 56 с.
10. Стефанов Стефан. Полиграфия и технологии печати: учеб. пособие. – М.: Книжный дом “ЛИБРИКОМ”, 2009. – 144 с.
11. Ваганов В.В., Андреев С.Д., Мовчан А.В. Применение информационной технологии "WEB TO PRINT" в издательствах и типографиях вузов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 1094 – 1101.

V.V. Vaganov, K.P. Koltyshev

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF INFORMATION TECHNOLOGY "WEB TO PRINT"

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Popularity web-to-print in the marketing departments of companies is growing more and more. With the web-to-print companies reduce the cost of establishing advertising models, accelerate processes and improve the quality of the finished printed materials. The aim of this work is to study specific implementation technology web-to-print. This article describes what exactly companies are facing and what criteria should be considered when choosing the system. Also analyzed the situation in the Russian printing market in light of the prospects start this service. Based on the results of the analysis, conclusions were drawn about the problems of implementing the service web-to-print in Russia.

Key words: implementation of web-to-print, w2p, difficulty implementing web-to-print, selection criteria system w2p.

REFERENCES

[1] Nanomaterialy' i nanotexnologii v poligrafii / V. V. Vaganov, G. V. Vaganov; S.-Peterb. gos. politexn. un-t. - Sankt-Peterburg : Izdvo Politexnicheskogo un-ta, 2014 (Sankt-Peterburg : Politexnicheskij un-t). - 238 p. (rus.)

[2] Gel'mut Kipxan. E'nciklopediya po pechatny'm sredstvam informacii. – M.:MGUP, 3003 – 1023 p. (rus.)

[3] Perlov V.I. Marketing na predpriyatii v otrasli pechati: ucheb. posobie – M.: MGUP, 2000 - 284 p. (rus.)

[4] Samsonov S.I., Terent'ev I.P. Publish №3 [135] mart 2011 – SPb.: Izd-vo Otkry'ty'e sistemy', 2011 – 71 p. (rus.)

[5] Vinogradov E.L., Vaganov V.V. Cifrovy'e texnologii operativnoj poligrafii: ucheb. posobie – SPb.: Izd-vo Politexn. un-ta, 2013 – 62 p.

[6] Vinogradov E.L., Vaganov V.V. Fizika v poligrafii. 2-e izdanie: ucheb. posobie. – SPb.: Izd-vo Politexn. Un-ta, 2012. – 218 p. (rus.)

[7] Menyaev M.F. Cifrovy'e sistemy' upravleniya texnicheskimi processami v poligrafii: ucheb. posobie– M.:MGUP, 2006 - 126 p. (rus.)

[8] Vannikov A.V., Uarova R.M. Processy' i texnologii cifrovoj pechati – M: MGUP, 2009 – 260 p. (rus.)

[9] Samarin Yu.N., Solonec V.I. Texnologicheskie processy' i proizvodstva: Uchebnoe posobie. - M: MGUP, 2009 – 56 p. (rus.)

[10] Stefanov Stefan. Poligrafiya i texnologii pechati: ucheb. posobie. – M.: Knizhny'j dom ―LIBRIKOM, 2009. – 144 p. (rus.)

[11] Vaganov V.V., Andreev S.D., Movchan A.V. Primenenie informatsionnoy tehnologii "WEB TO PRINT" v izdatelstvah i tipografiyah vuzov // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialyi Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – P. 1094 – 1101. (rus.)

УДК 519.1: 655.1

В. В. Ваганов[1], К.А. Котов[2]

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПУТИ НА ПОЛИГРАФИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

[1]Ваганов Вячеслав Владимирович, кандидат наук, профессор, ИММи Т кафедра "Автоматы"
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)2944215, E-mail: prvaganov_spb@mail.ru.

[2]Константин Анатольевич Котов, соискатель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)352-47-46, E-mail: konstantan515@mail.ru.

Аннотация.

Одной из функций, выполняемы АСУ на полиграфическом предприятии является диспетчеризация выполнения заказов на основе плана и графиков. АСУ создает условия для равномерного выпуска продукции в соответствии с планом в короткие отрезки времени.

Ключевые слова: Процесс, система, управление, алгоритм, обеспечение, производственный цикл, задача.

Полиграфическое производство – это процесс, включающий совокупность различных технических средств, используемых для печатного размножения текстовой и изобразительной информации в виде газет, книг, журналов, репродукций и другой печатной продукции.

Наиболее прогрессивной формой полиграфического производства являются автоматизированные процессы. Они позволяют значительно повысить производительность и улучшить условия труда, уменьшить численность работающих, снизить ее себестоимость и улучшить качество продукции.

Система диспетчеризации заказов на полиграфическом предприятии может нормально функционировать только при наличии четко организованной системы информационного обеспечения в масштабе всего пред-

приятия. Такая система должна обладать высокой оперативностью по сбору и обработке информации: исключать возможность передачи избыточной информации; обеспечивать возможность обобщения полученной информации в необходимых для учета разрезах [1].

Сложные процессы управления полиграфическим производством наряду с необходимостью обеспечения полной прозрачности требуют комплексных и программных решений. В сферу ответственности информационного обеспечения АСУ заказами входят такие задачи, как сметная калькуляция, обработка заказов, позаказная калькуляция, генерирование счетов-фактур и др. В результате потоки информации, существующие в типографии, переводятся на более высокий, профессиональный уровень. АСУ потоками заказов совершенствует процесс планирования на предмет оперативного выяснения – является ли тот или иной заказ выгодным.

еобходимым условием разработки оптимизирующих алгоритмов в АСУ заказов является наличие определенным образом структурированной информации, так называемого информационного обеспечения АСУ потоками заказов. Объектное информационное обеспечение, в обобщенном виде, можно представить тремя основными частями:

текстовые фрагменты сообщений информационной системы;

текстовые описания элементов производства;

описание обрабатываемых заказов.

Для оптимизации технологической схемы, связанной с ходом выполнения графиков прохождения заказов в производстве применяются известные экономико-математические методы: симплексный, динамического программирования, теории игр и др.

В условиях функционирования АСУ управления потоками заказов полиграфического производства возможны два варианта постановки задачи оптимизации. Первая из них предусматривает достижение максимального конечного результата при заданных ресурсах, а вторая – заданного конечного результата при минимальных затратах производственных ресурсов. В задачах первого типа определяется оптимальный порядок запуска заказов в производство с целью получения минимальной длительности производственного цикла отдельных изданий. В ходе рассмотрения такой задачи решается проблема оптимальной организации производственного процесса во времени. Для решения этого типа задач используются модели объемно-календарного планирования, а в качестве оптимизационного метода – один из методов теории расписаний [3].

Критерием оптимальности, наиболее полно отражающим требование наилучшего использования производственных ресурсов (при обеспечении минимальных сроков реализации заказов) является минимум длительности совокупного производственного цикла изготовления месячного портфеля заказов. Чем меньше значение этого показателя, тем плотнее составлено расписание, а значит, лучше используются производственные мощности

предприятия, его материальные и трудовые ресурсы. В свою очередь, длительность совокупного производственного цикла в значительной мере зависит от очередности обработки заказов на отдельных операциях производственного процесса.

Последовательность решения задачи оптимального управления производством включает в себя постановку задачи; определение цели; выбор критерия оптимальности; математическую формулировку задачи; выбор эффективного экономико-математического метода; разработку алгоритма программы и расчет.

Из множества алгоритмов поиска кратчайшего пути интерес представляют алгоритмы, которые на различных этапах выбора из альтернативных звеньев маршрута выбирают дугу с наименьшей стоимостью перехода между этапами производства заданной продукции (рис. 1). Т.е. начинаем обход из заданной вершины графа (в нашем случае, заданного начального этапа) и на каждом шаге выбираем ближайший по стоимости и не противоречащий технологии производства. В настоящее время для решения такой задачи существуют математически обоснованные алгоритмы, однако сложность их решения экспоненциально зависит от сложности исходных данных (количества вершин графа в исходной модели). Поэтому все эти алгоритмы с точки зрения практики имеют лишь теоретический интерес. Для практического применения в настоящее время используются лишь приближенные алгоритмы решения задачи поиска кратчайшего пути.

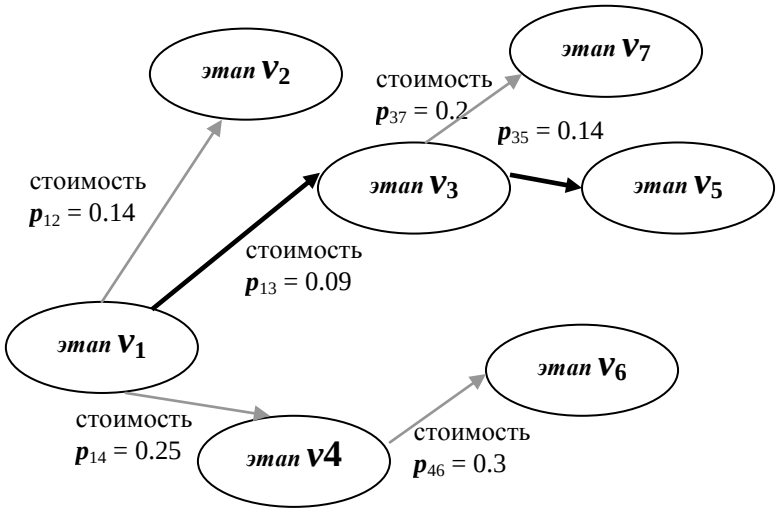


Рис. 1. Необходимое условие применимости алгоритмов поиска кратчайшего пути – выбор наименее затратной дуги на каждом шаге. Маршрут реализации продукции: этап v1 -> этап v3 -> этап v5 ->… привязан к номенклатуре и производительности единиц технологического оборудования

Формализация той или иной задачи оптимизации, в общем случае, предполагает описание всех важных факторов, влияющих на достижение цели, их взаимодействия, ограничительных условий и критерия оценки качества принимаемого решения, на основе которого можно осуществлять выбор между альтернативами. В качестве критерия оценки выступает целевая функция, аргументами которой являются количественные характеристики, описывающие состояние факторов, влияющих на достижение цели в решаемой задаче [5].

Для оптимизации технологической схемы, связанной с ходом выполнения графиков прохождения заказов в производстве предлагается следующая (рис. 2) общая схема рекурсивного комплексирования оптимизационных задач по мере поступления заказов на некотором интервале времени функционирования производства. Итоговым критерием оптимальности, наиболее полно отражающим требование наилучшего использования производственных ресурсов является минимум длительности совокупного производственного цикла изготовления портфеля заказов, на заданном интервале времени.

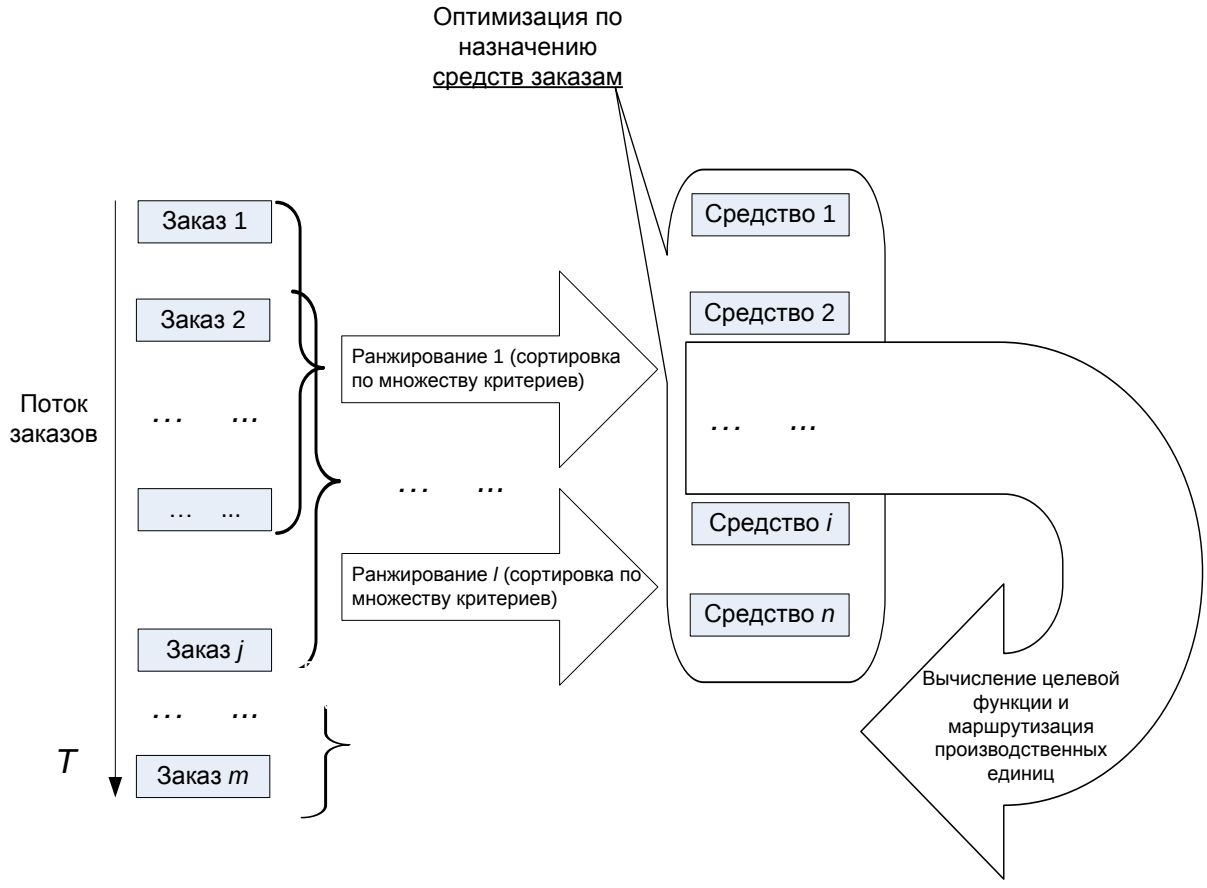


Рис. 2. Общая рекурсивная схема оптимизационных алгоритмов в системе управления потоками заказов

При этом решению, приводящему к наилучшему результату, как правило, соответствует экстремальное значение целевой функции, то есть точка её максимума или минимума. Следовательно, процесс генерации вариантов решений и выбора наилучшей из полученных альтернатив сводится к созданию всех возможных комбинаций значений характеристик, влияющих на целевую функцию, и нахождение такой комбинации, которая приводит к её экстремальному значению. Все возможные комбинации аргументов при этом образуют пространство поиска задачи, размерность которого определяется числом аргументов целевой функции. А каждая из указанных комбинаций образует точку в данном пространстве.

Следует отметить, что целевая концепция при постановке задачи выбора может находить отражение как при задании множества допустимых альтернатив, так и при формулировке требований получения эффективных, в частности, строго оптимальных решений.

Заключение

Инструментом вычисления оптимальных пропорций составляющих производственных компонент и реализуемых программно-алгоритмическим обеспечением АСУ полиграфического производства предложено осуществлять на основе решений задач комбинаторной и целочисленной оптимизации.

В силу специфики полиграфического производства и условий функционирования его АСУТП потоками заказов в число факторов эффективности функционирования полиграфических предприятий входит степень решения проблемы рационального использования производительности печатного оборудования под тот или иной заказ. При этом, в ходе решений задач управления потоками заказов, в первую очередь рассматривается ограничение по ресурсам на операции печатания.

Критерием оптимальности, наиболее полно отражающим требование наилучшего использования производственных ресурсов (при обеспечении минимальных сроков выпуска изданий), основного требования, предъявляемого при решении задач календарного планирования, является минимум длительности совокупного производственного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов В.В.,Ваганов Г.В. Наноматериалы и нанотехнологии в полиграфии. - СПб.:Изд-во Политех. ун-та, 2014. - 240 с. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие. – СПб.: «Изд. дом «Бизнесс-пресса», 2000 г. – 326 с.
2. Виноградов Е.Л., Ваганов В.В.,Иванов А.В. - Изд-во Политех. ун-та, 2012 (2-е изд, перераб.и доп.) - 218 с. Афанасьева А.Д., Сафроно-

ва Г.Б. Технология полиграфического процесса. - М.: МГОУ, 2004 – 45 с.
3. Кондрашова В.К.,Исаева О.Г. Экономика полиграфического предприятия. - М.: МГУП, 2000 – 234 с.
4. Миронова Г.В. и др. Организация полиграфического производства. – М.: Изд-во МГУП, 2002 – 352 с.
5. Романо Ф. Современные технологии издательско – полиграфической отрасли / Ф. Романо. – М.: Принт - медиа центр, 2006 – 454 с.
6. Чистов В.В., Волков А.Л. Теория принятия решений: Учебное пособие. – М.: МГУП, 2002. – 396 с.
7. Ефимов М.В. Теория автоматического управления – М.:МГУП, 2006 – 420 с.
8. http://ntv.spbstu.ru/ntv/article/N2-2.147.2012_17/ Предварительный расчет схемы управления потоками заказов на полиграфическом производстве
9. Агеев В.Н. Интегрированные системы проектирования и управления: учеб. пособие / В.Н. Агеев, П.К. Иванов, В.В. Ковалева; Моск. гос. ун-т печати. — М.: МГУП, 2008. — 248 с.
10. Раскин А.Н. и др. Технология печатных процессов. – М.: Книга, 1989 – 367 с.
11. Г.В. Миронова, А.К. Ершов, Г.И.Осипова, Н.М. Сперанская, Е.А. Кондрусь. Организация полиграфического производства. – М.: Изд-во МГУП, 2002 – 352 с.

V.V. Vaganov, K.A. Kotov

SEARCH OF THE OPTIMUM TECHNOLOGICAL WAY ON PRINTING PRODUCTION WITH USE OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

One of functions, are carried out ACS at the printing enterprise scheduling of implementation of orders on the basis of the plan and schedules is. ACS creates conditions for uniform output according to the plan in short intervals of time.

Keywords: Process, system, management, algorithm, providing, production cycle, task.

REFERENCES

[1] Vaganov V. V., Vaganov of G. V. Nanomaterialy and nanotechnologies in polygraphy. - SPb.:izd-in Polytechnic University. un-that,

2014. - 240 pages Spitsnadel V. N. Bases of the system analysis: Studies. grant. – SPb. : "Prod. the house of "Businesss-pressa", 2000 – 326 pages. (rus.)
[2] Vinogradov E.L. Vaganov V. V., Ivanov A.V. - Publishing house Polytechnic University. un-that, 2012 (the 2nd prod., processed and additional) - 218 pages of Afanasyev A.D. Safronova G. B. Tekhnologiya of printing process. - M.: MGOU, 2004 – 45 p. (rus.)
[3] Kondrashova V. K. Isayeva O. G. Ekonomika of the printing enterprise. - M.: MGUP, 2000 – 234 p. (rus.)
[4] Mironova G. V., etc. Organization of printing production. – M.: MGUP publishing house, 2002 – 352 p. (rus.)
[5] Romano F. modern technologies of izdatelskopoligrafichesky branch / F. Romano. – M.: Print - media the center, 2006 – 454 p. (rus.)
[6] Chistov V. V., Volkov A.L. Decision-making theory: Manual. – M.: MGUP, 2002. – 396 p. (rus.)
[7] Yefimov M. V. The theory of automatic control – M. : MGUP, 2006 – 420 p. (rus.)
[8] http://ntv.spbstu.ru/ntv/article/N2-2.147.2012_17/Predesign of the scheme of management by flows of orders on printing production
[9] Ageev V. N. The integrated systems of design and management: studies. grant / Century N. Ageev, P. K. Ivanov, V. V. Kovalyova; Mosk. the state. press un-t. — M.: MGUP, 2008. — 248 p. (rus.)
[10] Raskin A.N. etc. Technology of printing processes. – M.: The book, 1989 – 367 p. (rus.)
[11] G. V. Mironova, A.K. Yershov, G.I.Osipova, N. M. Speranskaya, E.A. Kondrus. Organization of printing production. – M.: MGUP publishing house, 2002 – 352 p. (rus.)

УДК 658.512

В.А.Дьяченко[1], М.И.Маленков[2], Д.В.Сидоров[3]

ПОИСКОВЫЕ ДИЗАЙН-ПРОЕКТЫ ПЛАНЕТОХОДОВ И ИНТЕРЬЕРОВ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

[1]Владимир Алексеевич Дьяченко, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)-552-9686, E-mail: dva40@inbox.ru

[2]Михаил Иванович Маленков, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Общество с ограниченной ответственностью «АКТРОН»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-921-922-2977, E-mail: m.i.malenkov@gmail.com

[3]Дмитрий Владимирович Сидоров, дизайнер
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Тел.: 8-962-683-6115, E-mail: Demetrius-Sid@yandex.ru

Аннотация

Описаны основные направления дизайн-проектирования космических аппаратов, проводившихся на кафедре «Автоматы» СПбГПУ в 2009-2013 годах по реальным запросам космонавтики. Приведены результаты некоторых поисковых инженерных и дизайнерских работ, выполненных ведущими преподавателями (конструкторами и дизайнерами) и студентами-выпускниками кафедры в области планетоходов, космических роботов и интерьеров космических станций. Изложены некоторые методологические подходы к созданию 3D моделей и визуализации технических раритетов.

Ключевые слова: космическая техника, поисковые дизайн-проекты, планетоходы, шасси, интерьеры, космическая станция, визуализация.

Несмотря на многолетнее отсутствие российских программ изучения Луны и планет с использованием планетоходов, в последние годы на кафедре «Автоматы» выполнено несколько концептуальных технических и дизайнерских проектов по луноходам и марсоходам. Это должно способствовать сохранению преемственности работ по данной тематике в стенах СПбГПУ. Ведь именно здесь, на нескольких различных кафедрах («Гусеничные машины», «Автоматы», «Электрические машины и аппараты»,

«Динамика и прочность машин» и др.), в прошлом веке были подготовлены специалисты, внесшие большой вклад в создание и отработку самоходного автоматического шасси первой в мире подвижной лунной лаборатории - «Лунохода -1» [1, 2, 3, 4].

Сегодня многих студентов интересуют исторические и технические подробности великой «лунной гонки» СССР и США в XX веке, современное состояние и перспективы развития лунных и марсианских исследований. Ниже представлены некоторые дизайнерские работы последних лет в области космической техники студентов-выпускников кафедры «Автоматы» СПбГПУ, выполненные под дизайнерским руководством проф. В.А.Дьяченко и ведущих преподавателей кафедры: Ю.Т.Хрузина, А.Г.Зубова, В.П.Орлеца.

Ряд инженерных и дизайнерских проработок планетоходов и их модулей было выполнено студентом Д.Сидоровым под техническим руководством проф. М.И.Маленкова. Наиболее универсальной частью этих работ авторы считают разработку способов воссоздания виртуальных образов сложных технических устройств, при отсутствии физического оригинала, используя только фотографии и рисунки.

Эти наработки были реализованы для построения 3D моделей «Лунохода-1» с использованием пакета трехмерной графики «3D Studio max» (3DS max). Главной особенностью этой модели стало достижение высокой точности передачи технического облика легендарного аппарата в условиях дефицита точной информации о его геометрических параметрах.

Конструкторской документацией разработчики естественно, не располагали, она является собственностью многих предприятий, главные из которых НПО имени С.А.Лавочкина (гермоотсек, и все закрепленное на нем научное и служебное оборудование) и ОАО ВНИИТрансмаш (самоходное шасси). Исходными документами для разработки модели стали опубликованные и собственные фотоматериалы музейных экспонатов, а также результаты изучения реального блока мотор - колес в экспозиции Музея ракетной техники и космонавтики Петропавловской крепости.

В общей сложности было проанализировано 94 фотографии. Применение программ твердотельного моделирования в данном случае было нецелесообразно. Такие программы не позволяют редактировать непосредственно сетку объекта, изменяя координаты отдельной вершины, грани или полигона поверхности моделируемого объекта. Поэтому была использована Autodesk «3DS max» – полнофункциональная программная система для создания и редактирования трехмерной графики и анимации, позволяющая получить на «выходе» реалистичные изображения.

Краткое изложение общего подхода и методик разработки 3D модели даны в статье [5], а ее отдельные фрагменты приведены на рис. 1 и 2.

Презентация модели в графическом виде и в виде обзорного клипа с музыкальным сопровождением, состоялась на VII международной конфе-

ренции «Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы», посвященной 40-летию начала работы «Лунохода-1» на Луне. (С. Петербург, ЛЕНЭКСПО, 28-29.09.2010).

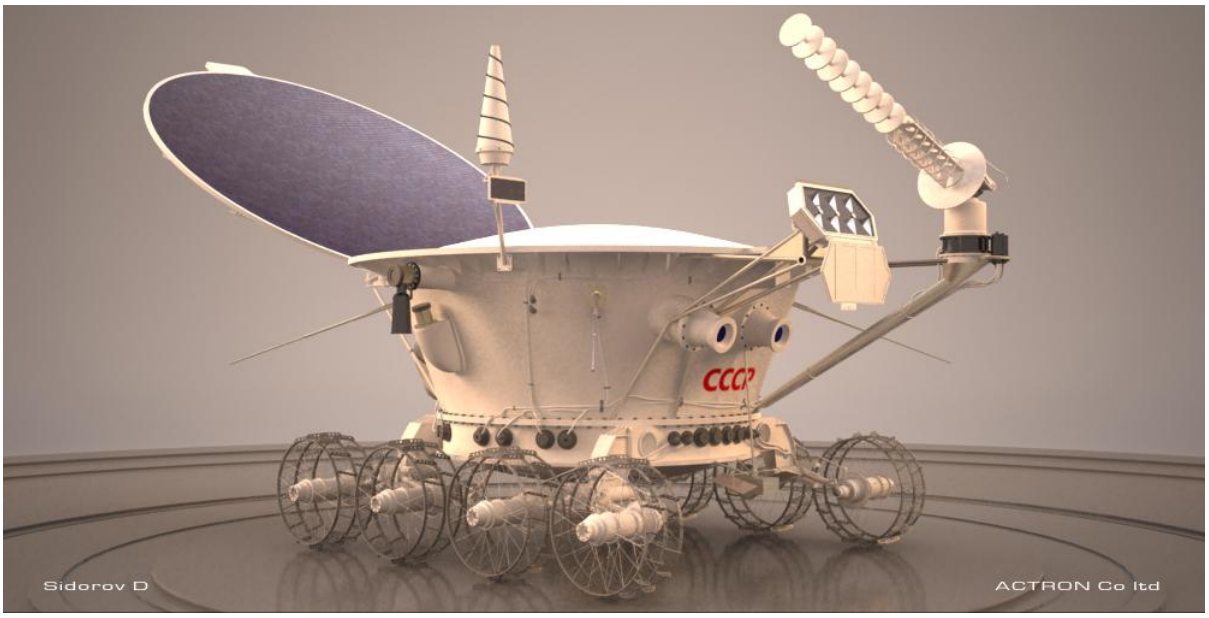


Рис. 1. Модель «Лунохода-1», вид спереди слева

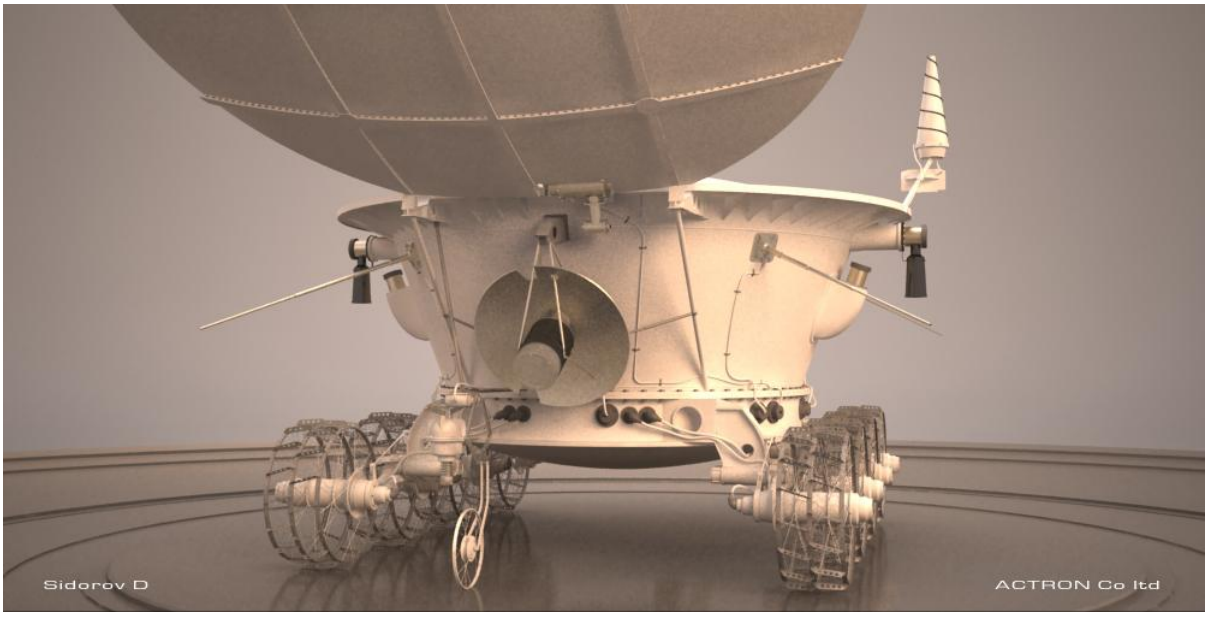


Рис. 2. Модель «Лунохода-1», вид сзади

Модель была использована редакцией популярного российского журнала для иллюстрации статьи [6]. Анализ имеющихся в Интернет – ресурсах дизайнерских материалов по советским луноходам позволяет выделить модель и подачу разработки как наиболее законченную, цельную и высоко качественную дизайнерскую работу.

На основе модели были созданы демонстрационные клипы с движением в среде. Однако при визуализации пришлось в определенной мере

пожертвовать реалистичностью, так как рендеринг анимации требует больших аппаратных мощностей. Затем задача была усложнена с тем, чтобы модели можно было бы использовать не только в демонстрационных, но и в учебных целях. Для этого в видеосюжетах учебного клипа использованы графические, видовые, звуковые и цветовые решения, раскрывающие устройство и работу объекта и поддерживающие интерес аудитории. Фрагмент такого клипа, посвященный конструкции ходовой части, приведен на рисунке 3.

Результаты этой длительной (более 2-х лет) и достаточно кропотливой работы показали правильность разработанных алгоритмов и методик моделирования сложных технических изделий в условиях дефицита информации о них и позволили выявить возможности упрощения и сокращения процесса. Эти наработки могут быть использованы при реставрации других объектов для организации виртуальных музеев и подготовки информативных учебных пособий.

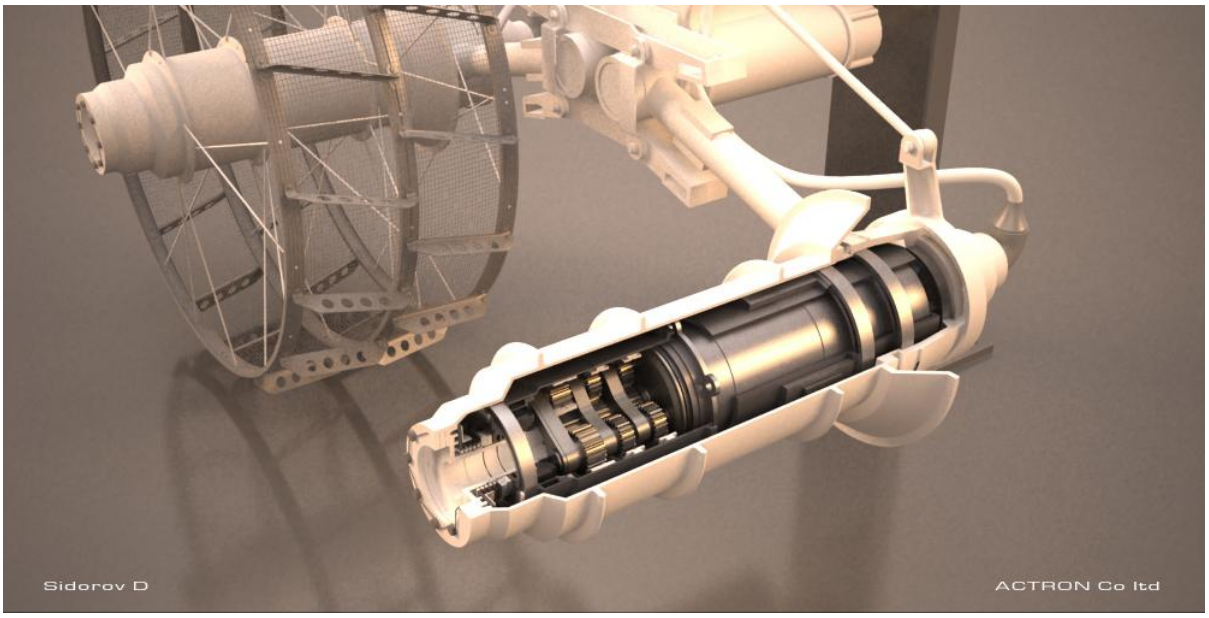


Рис. 3. Фрагмент модели натурного объекта – блока колес «Лунохода-1», переднее колесо демонтировано, мотор-редуктор вырезан на четверть

Оригинальные инженерные и дизайнерские решения были найдены в поисковом дизайн-проекте по созданию легкого лунохода-автомата на основе «зонтичной концепции» колес и трансформируемого шасси. Работа выполнена в творческом содружестве с российской командой «Селеноход», участвовавшей в конкурсе Google на реализацию лунной экспедиции частной компанией.

По условиям конкурса луноход должен проехать по поверхности Луны не менее 500 метров и передать на Землю панорамы по трассе движения. Понятно, что специальная экспедиция с такими ограниченными задачами нереальна, аппарат может быть доставлен на Луну только в качестве по-

путного груза. Следовательно, луноход должен занимать минимальный объем при транспортировке на Луну и иметь минимальную массу.

Однако миниатюрные аппараты будут беспомощны на рыхлом лунном грунте при преодолении наиболее часто встречающихся кратеров малого диаметра, соизмеримого с колесной базой лунохода. Для уверенного движения, снижения потребности маневрирования, луноход должен автоматически трансформироваться на поверхности Луны до габаритов, близких к геометрии его успешных прототипов.

В проекте найдены технические и дизайнерские решения компоновки всех механизмов шасси и минимально необходимого бортового оборудования, первые подходы к синтезу механизмов развертывания самих зонтиков (рис. 4), их ножек, раздвижения секций, геометрический анализ всех возможных конфигураций аппарата.

В проекте были решены задачи графического представления ткани зонтиков, наружные поверхности которых представляют собой «мягкие» солнечные батареи, в смятом (транспортировочном) и упругом (рабочем) состоянии. Конечно, реализация такого решения потребует разработки и освоения новых технологий.

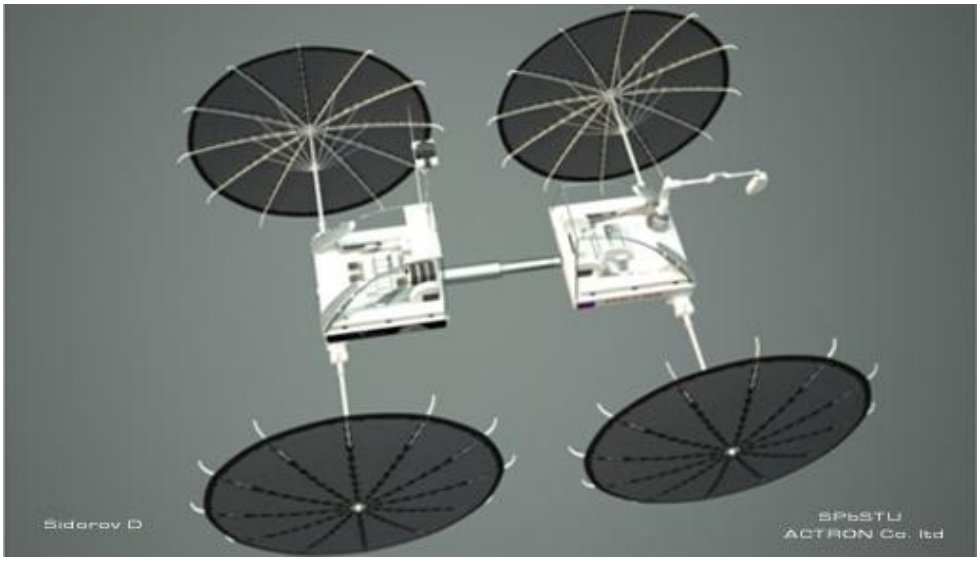


Рис. 4. Фрагмент развертывания шасси из транспортировочного в рабочее положение

После развертывания можно получить четырехколесное шасси с диаметром колес 0,7 метра, колесной базой равной колее и составляющей примерно 1,6 м. (рис. 5). При таких геометрических характеристиках, луноходу не потребуется объезжать наиболее часто встречающиеся кратеры небольшого (менее 3 м) диаметра. При надлежащей отработке конструкции колес, луноходу будет способен преодолевать без объезда и лунные кратеры большого диаметра с крутыми стенками.

Конечно, взаимодействие такого зонтика с грунтом будет существенно отличаться от качения колеса со сплошным ободом. В нем будут при-

нимать участие и какие-то участки тканевого материала, возможны неравномерности поступательного движения. Все это вполне допустимо при малых, до 0,1 км/час, скоростях движения.

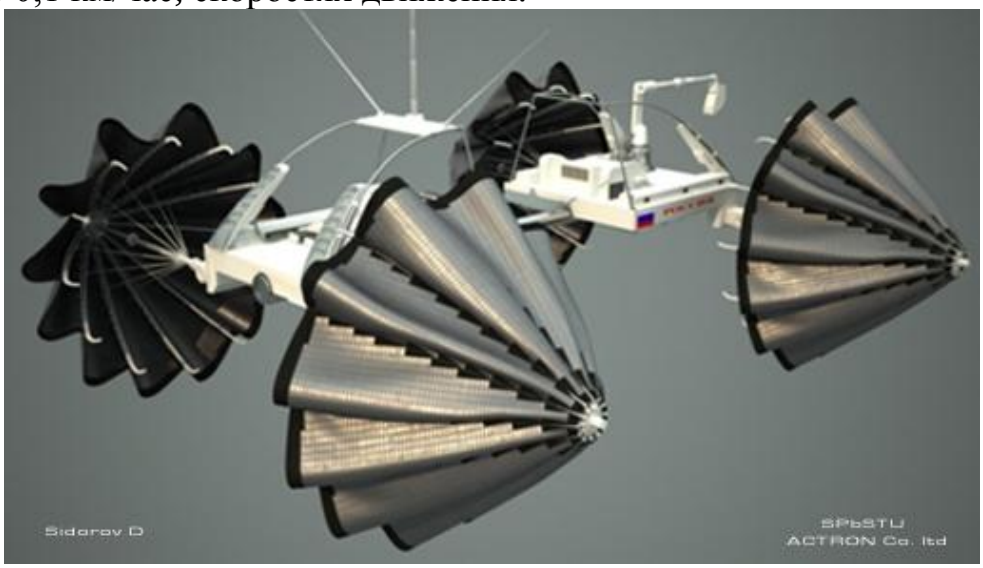


Рис. 5. Конфигурация шасси в рабочем положении

Параллельно с этой дизайнерской работой, студент К. Петров выполнил дипломный проект, посвященный разработке конструкции основных механизмов трансформируемого шасси.

В 2013 году разработан и представлен в дипломном проекте дизайн контейнера и навесного оборудования марсохода (рис. 6) с так называемой трехточечной балансирной подвеской [7]. В качестве основы разработки была выбрана новая конструкция шасси, которая позволяет автономное проектирование контейнера, механически связанного с несущей конструкцией шасси только по своему днищу. (Разработка шасси – ООО «АКТРОН» совместно с ЗАО «НТЦ РОКАД»). Новые технические решения являются альтернативой балансирной подвеске типа Rocker-Bogie, применявшейся на всех американских марсоходах, и их общей компоновке.

При выборе конфигурации контейнера и состава выносного научного оборудования разработчики ориентировались на информацию по марсоходу программы ExoMars, опубликованную в Интернете. Использовались также методические положения, изложенные в [8].

Результаты разработки представлены в демонстрационном видео фильме, отражающем все этапы экспедиции – старт носителя, перелет к Марсу, маневры на орбите его спутника, посадку с использованием аэродинамического торможения и системы быстро надуваемых баллонов.

Представлены также фрагменты развертывания марсохода в рабочее положение после отстрела баллонов, съезд на поверхность Марса, прямолинейное движение в колесном и колесно-шагающем режимах, различные способы маневрирования на сложном рельефе.

Рис. 6. Общий вид марсохода на базе шасси с трехточечной подвеской

В 2009 году студент И.Алешкин выполнил дипломный дизайн-проект марсохода с принципиально другим, шагающим движителем (рис. 7) по схеме шестиногого паука. Одной из задач проекта было сравнение шагающего космического аппарата и аппарата с колесно-шагающим движителем по критериям профильной проходимости, адаптации к рельефу и удобству работы выносного научного оборудования.

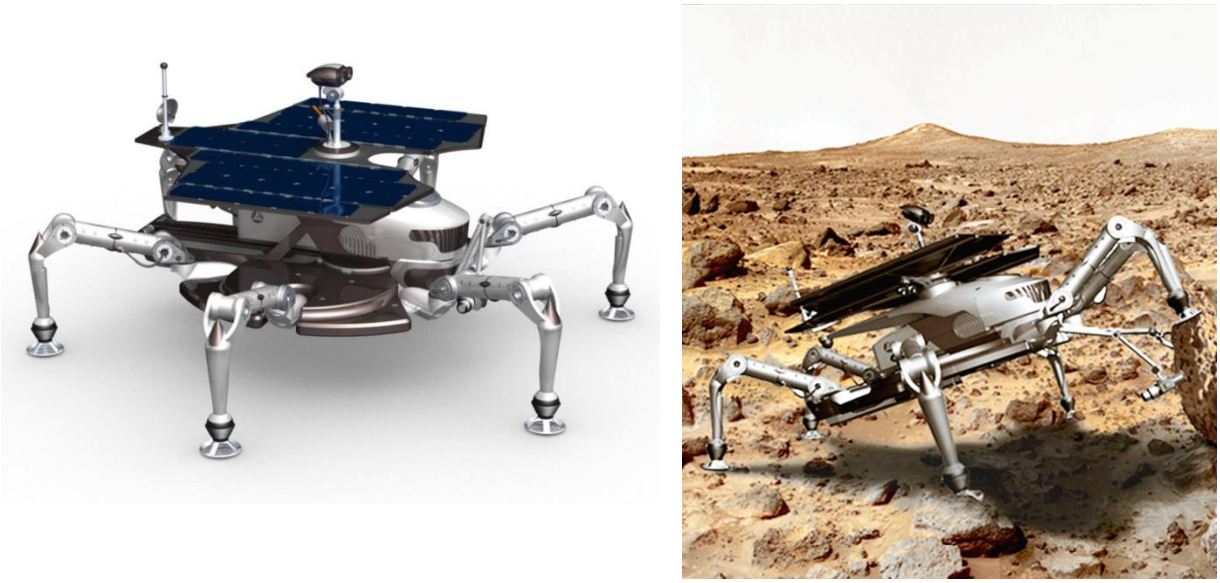


Рис. 7. Общий вид шестиногого марсохода по схеме «Паук» (слева) и фрагмент его движения по поверхности Марса

Так же как и в предыдущих проектах, в технической части были выполнены упрощенные тягово-динамические расчеты для выбора типа и характеристик электродвигателей и редукторов наиболее нагруженных шарниров. Однако на этой стадии проектирования сделать достаточно точное

численное сравнение суммарной массы приводов шагающего и шестиколесного шасси с резервной функцией колесно-шагающего движения, не представилось возможным. Были выявлены задачи более детальной проработки конструкция опоры ног с учетом ее взаимодействия со сложным рельефом и деформируемым грунтом.

Планетоходы – не единственное направление по освоению тематики подвижных аппаратов устройств космического назначения. В 2009-2012 годах на кафедре «Автоматы» в содружестве с ЦНИИ РТК по заданию Роскосмоса под руководством профессора А.Н.Тимофеева активно велись поисковые инженерные и дизайнерские проработки трансформируемых шагающих роботов для диагностики наружных поверхностей международной космической станции (студенты-дипломники А.Козлович, К.Петров, Е.Свиридова, В.Самуйлова, Р.Майстренко и др.).

В этот же период был выполнен цикл дизайнерских работ по интерьерам обитаемых космических станций. В июне 2010 были подведены итоги конкурса «Дизайн рабочей, бытовой и предметной среды пилотируемых космических аппаратов», объявленного РКК «Энергия». Высокую оценку космонавтов получили работы студентов-дипломников кафедры «Автоматы». Это проект Е.Павловой, посвященный разработке конструкции и интерьера спускаемого аппарата транспортного корабля «Союз», (рис. 8), проект Н.Поскребышевой с разработкой интерьера служебного модуля Международной космической станции (рис. 9), проект В.Веселова «Установка искусственной гравитации - бортовой спортивный тренажер в условиях длительного воздействия невесомости» (рис. 10). С.Кондрашин разработал интерьер пилотируемого корабля «Русь» [9,10].

Рис. 8. Сотовый каркас (слева) и внешний вид спускаемого аппарата транспортного корабля «Союз»

В 2012 году студентами и выпускниками кафедры во главе с Д.Мареевым был разработан проект оформления выставки космических экспонатов музея ракетной техники и космонавтики в Инженерном доме Петропавловской крепости. Эта работа была отмечена Благодарственным

письмом Северо-Западной организации Федерации Космонавтики России за подписью летчика-космонавта СССР и РФ С.К.Крикалева.

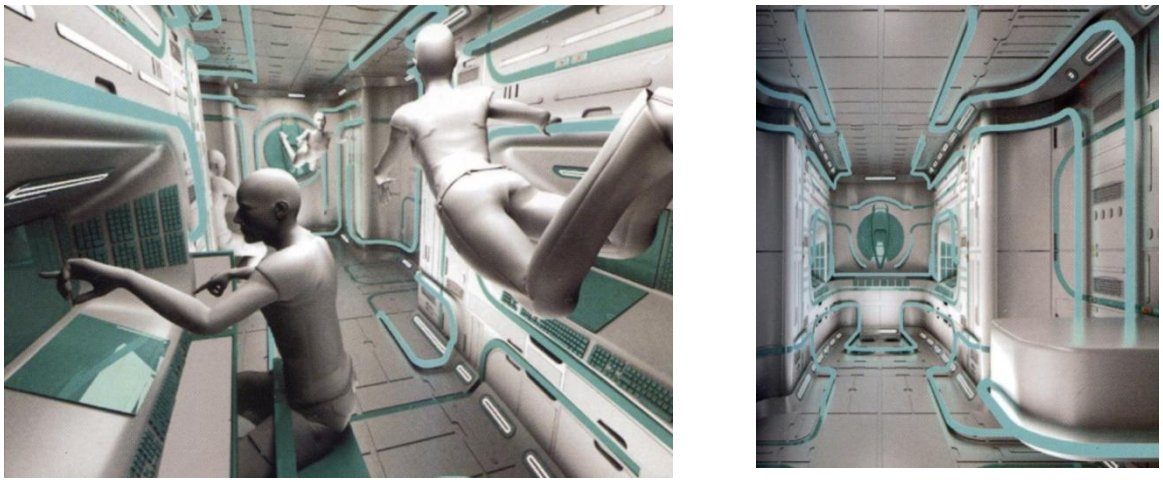


Рис. 9. Интерьер служебного модуля Международной космической станции

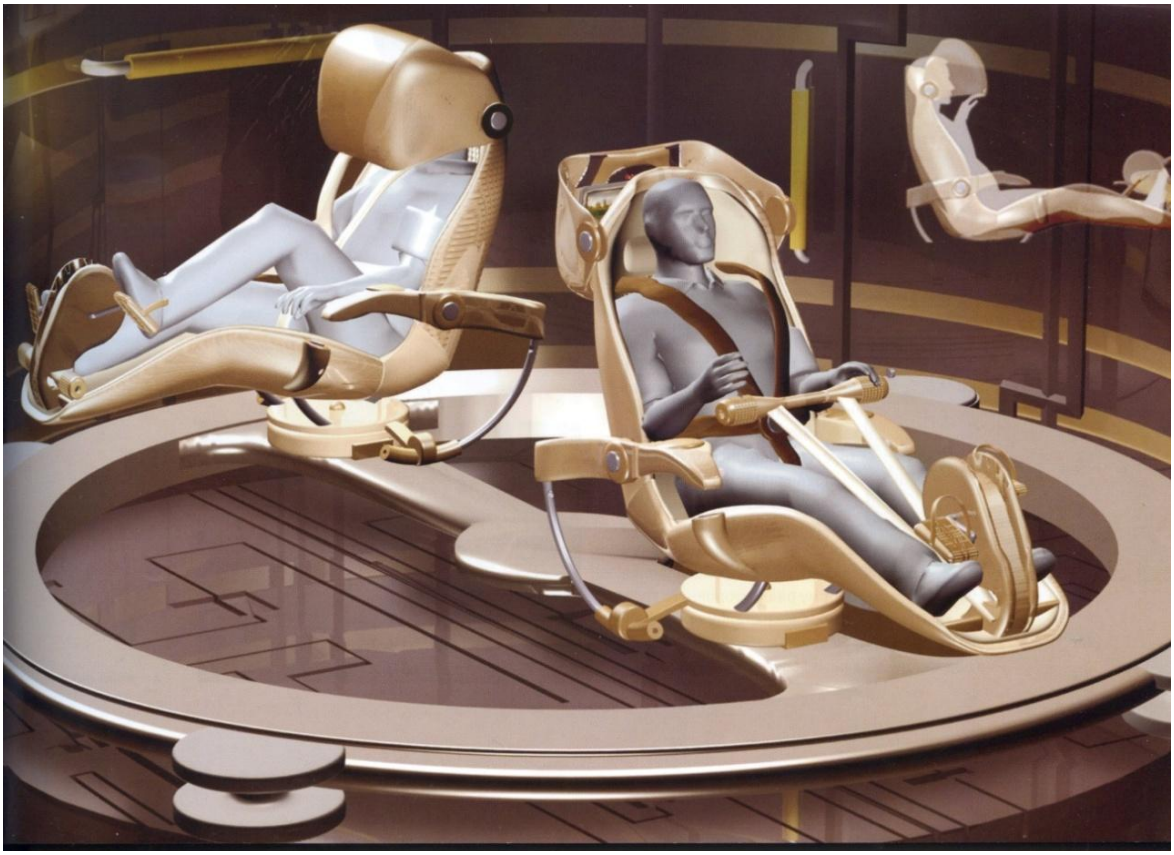


Рис. 10. Бортовой спортивный тренажер

Представленные выше работы по космической тематике и ряд других оригинальных студенческих дизайнерских работ, в том числе защищенных патентами, несомненно, свидетельствуют об успехах Политехнической школы промышленного дизайна, основанной на тесной интеграции

инженерных и дизайнерских аспектов проектирования новой техники, характерных для проектно-конструкторской деятельности кафедры «Автоматы» [11,12,13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кемурджиан А.Л. Планетоходы / А.Л. Кемурджиан, В.В. Громов, И.Ф. Кажукало и др. Под редакцией А.Л. Кемурджиана. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Машиностроение, 1993. - 397 с.
2. Маленков М.И. Экстремальная робототехника. Проектирование систем передвижения планетоходов, учебное пособие. СПб: изд. Политехнического ун-та, 2007. - 158 с.
3. Маленков М.И. Творческий вклад выпускников СПбГПУ в создание самоходного автоматического шасси «Лунохода-1». Труды Межд. научно – теоретической конференции «История СПбГПУ в контексте истории отечественной и мировой науки». СПб: изд. Политехнического ун-та, 2009. – с. 272 – 296.
4. Маленков М.И. Выпускник СПбГПУ Феликс Шпак – легенда ВНИИТрансмаш. Труды Межд. научно – теоретической конф. «История СПбГПУ в контексте истории отечественной и мировой науки». СПб: изд. Политехнического ун-та, 2009. – с. 46 – 55.
5. Сидоров Д.В., Маленков М.И. Разработка 3D модели сложных технических объектов в условиях недостатка информации о них. Моделирование по фотографии. Доклад на XLI Неделе науки в СПбГПУ, ММФ, секция «Прикладная геометрия и дизайн». СПб: изд. Политехнического ун-та, 2012. – с. 108–111.
6. Сергеев А.Г. Луноход – эпизод первый. М.: Вокруг света, №11, 2010. – с. 214 – 224.
7. Kucherenko V. Shassis Concepts for the ExoMars Rover / V. Kucherenko, A. Bogachev, M.V. Winendael. Proc. Of the 8th ESA Workshop ASTRA-2004, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2004.
8. Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Бионические основы дизайн – проектирования: учебное пособие. СПб: изд. Политехнического ун-та, 2008. – 195 с.
9. Серов М. Дизайн рабочей, бытовой и предметной среды пилотируемых космических аппаратов. Ж. «Дизайнинформ». СПб: изд. «Премиум Пресс», №14, 2010. - с. 7-19.
10. Серов М. Конкурс по космическому дизайну завершён. Ж. Новости космонавтики. М.: Изд. «Периодикс», №9, 2010. - с. 16-17.
11. Дьяченко В.А., Зубов А.Г., Свистулин Д.В. Промышленный дизайн в Политехническом. Ж. «Дизайнинформ». СПб: изд. ООО «Граф-Стиль», №12, 2008, - с. 6-14.

12. Дьяченко В.А., Радкевич М.М. Инновационные технологии подготовки дизайнеров в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете. В сб. «Современные технологии в дизайн - образовании»: материалы 4-ой Всероссийской научно-практической конференции (6-13 окт. 2007г.), часть 2. Сочи: Рио СИМБ и П, 2007. - с. 90-92.
13. Мареев Д.В., Бобинин А.И.. Учебные и внеучебные формы подготовки промышленных дизайнеров. Сборник трудов конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». СПб, изд. Политехнического ун-та, 2011. - с. 51-54

V.A. Dyachenko[1], M.I.Malenkov[1,2], D.V.Sidorov[1]

SEARCH DESIGN-PROJECTS OF THE PLANETARY ROVERS AND INTERIORS OF SPACE STATIONS

[1] St. Petersburg State Polytechnic University, Russia;
[2]ACTRON Co Ltd, St. Petersburg, Russia.

Abstract

The main directions of design designing spacecraft, held the chair of "Automatic" SPbSTU in 2009-2013, according to the real needs of astronautics. The results of some exploratory engineering and design work performed by leading teachers (designers and engineers) and their graduate faculty in the field of planetary, space robots and interiors of space stations. Presents some methodological approaches to creating 3D models and visualization of technical rarities.

Keywords: space engineering, search design projects, planetary rovers, chassis, interiors, space station, visualization.

REFERENCES

[1] Kemurdjian A.L. Planetary rovers / A.L. Kemurdjian, V.V. Gromov, I.F. Kazhukalo etc. Edited by A.L. Kemurdjian. Second Ed., revised and additions. M.: Mashinostroenie, 1993. - 397 p. (rus.)
[2] Malenkov M.I. Extreme Robotics. Designing of tse Locomotion Systems of Planetary Rovers, textbook. St. Petersburg: Ed. Polytechnic University, 2007. – 158 p. (rus.)
[3] Malenkov M.I. Creative contribution to the creation of graduates SPbSPU automatic self-propelled chassis "Lunokhod-1". Proc. of the Int. scientific - theoretical conference. "History STU in the context of national and world history of science." St. Petersburg: Ed. Polytechnic University, 2009. – p. 272 - 296. (rus.)

[4] Malenkov M.I. STU graduate Felix Shpak - legend VNIITransmash. Proc. of the Int. scientific - theoretical conference. "History STU in the context of national and world history of science." St. Petersburg: Ed. Polytechnic University, 2009. - p. 46 - 55. (rus.)
[5] Sidorov D.V., Malenkov M.I. Development of 3-D models of complex technical objects in a lack of information about them. Modeling picture. Report on 16 th week in science SPbSTU MMF, Section "Applied Geometry and Design". St. Petersburg: Ed. Polytechnic University, 2012. - p. 108 – 111. (rus.)
[6] Sergeev A.G. Lunokhod - the first episode. M.: Vocrug Sveta, № 11, 2010. - p. 214-224. (rus.)
[7] Kucherenko V. Shassis Concepts for the ExoMars Rover / V. Kucherenko, A. Bogachev, M.V. Winendael. Proc. Of the 8th ESA Workshop ASTRA-2004, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2004.
[8] Dyachenko V.A., SmirnovA.B. Bionichesky bases design – designing, textbook SPb: Ed. Polytechnic University, 2008. – p. 195. (rus.)
[9] Serov M. Design work, home and the objective environment of manned spacecraft. M. "Dizayninform". St. Petersburg: Ed. "Premium Press", № 14, 2010. - p. 7 - 10. (rus.).
[10] Serov M. Competition for space design completed. M.: Novosti Cosmonavtiki. Ed. "Periodiks", № 9, 2010. - p. 16 - 17. (rus.).
[11] Dyachenko V.A., Zubov A.G., Svistulin D.V. Industrial Design at the Polytechnic. M. "Dizayninform". St. Petersburg: Ed. LLC "GrafStil", № 12, 2008. - p. 6 - 14. (rus.).
[12] Dyachenko V.A., Radkevych M.M. Innovative technology training designers in St. Petersburg Polytechnic University. In comp. "Modern technologies in design education": Proc. of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference (6 - 13 October. 2007.), Part 2. Sochi: RIO SIMBiP, 2007. - p. 90 - 92. (rus.).
[13] Mareev D.V., Bobinin A.I. Educational and extracurricular forms of training and industrial designers. Proc. of the Conference «Modern Engineering: Science and Education». St. Petersburg: Ed. Polytechnic University, 2011. - p. 51-54. (rus.)

УДК 621.01

В.Л.Жавнер[1], О.Н.Мацко[2]

РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ПРИВОДЫ ДЛЯ ЦИКЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ

[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@inbox.ru

[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

В работе рассмотрены вопросы уменьшения энергозатрат в рекуперативных приводах технологического оборудования путем применения пружинных аккумуляторов с пневматическими компенсаторами диссипативных сил. Приведено сравнение характеристик линейного и нелинейного пружинных аккумуляторов.

Ключевые слова: рекуперативный привод, линейный пружинный аккумулятор, нелинейный пружинный аккумулятор, компенсация диссипативных потерь

Работы, посвященные разработке рекуперативных приводов для цикловых перемещений, были инициированы необходимостью уменьшить динамические нагрузки в цикловых роботах, при одновременном уменьшении энергозатрат и увеличении быстродействия [7,8,10]. Причинами недостаточного внимания к этим работам являются:

-необходимость оснащения приводов управляемыми фиксаторами [3, 7],

-проблема зарядки пружинных аккумуляторов или после остановки или при первоначальной сборке,

-при использовании для компенсации диссипативных потерь электрических двигателей для обеспечения высокого быстродействия

требуются двигатели большой мощности и редукторы с большим передаточным числом [7,10].

При использовании для компенсации диссипативных сил гидропривода отпадает необходимость в управляемых фиксаторах и нет проблемы зарядки пружинных аккумуляторов [1]. Однако использование гидропривода целесообразно при больших массах перемещаемых объектов и невысоком быстродействии.

При использовании пневматического привода для компенсации диссипативных сил также возникают проблемы с быстродействием, учитывая, что рекомендуемые скорости в стандартных пневмоцилиндрах не превышают 2 м/с.

В данной работе рассматриваются рекуперативные приводы с использованием линейных пружинных аккумуляторов (ЛПА), представленных на рис. 1, и нелинейных пружинных аккумуляторов (НПА), представленных на рис. 2.

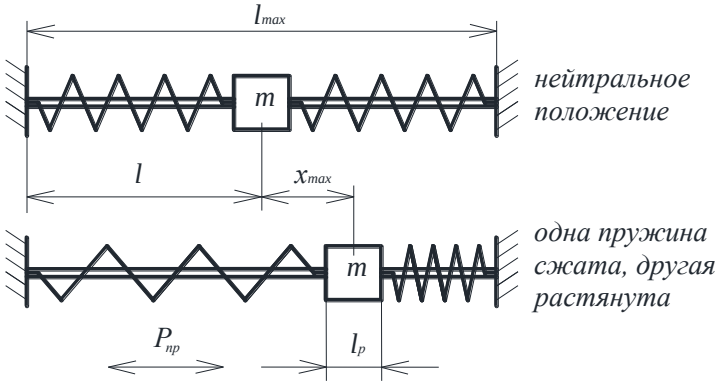


Рис. 1. Линейный пружинный аккумулятор с двумя пружинами растяжения или сжатия

Рассматриваемые пружинные аккумуляторы являются колебательными системами, где время перемещения из одного крайнего положения в другое определяется полупериодом колебаний.

К параметрам рекуперативного привода относятся:

m – приведенная масса ползуна и рабочего органа или груза, t – заданное время перемещения ползуна из одного крайнего положения в другое (полупериод колебаний), l – длина пружины в состоянии устойчивого равновесия (в нейтральном положении), $x_{\max}$ - максимальное отклонение пружины от среднего положения.

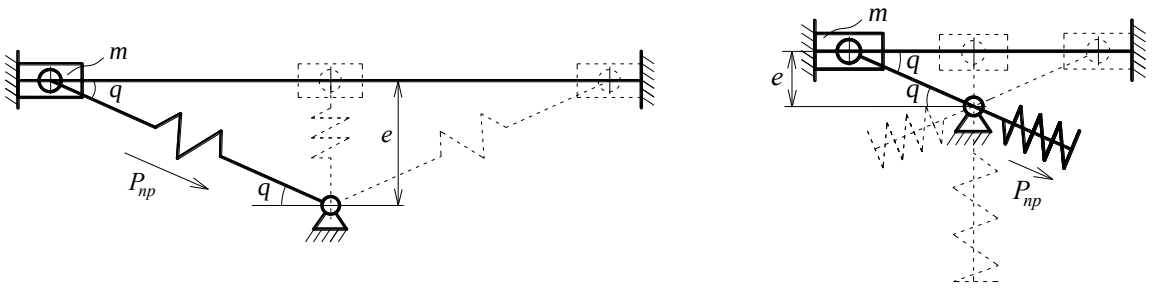
Основными характеристиками пружинных аккумуляторов являются:

$П_{\max}$ – максимальная потенциальная энергия каждой пружины,

$П_э$ – эффективная потенциальная энергия, преобразуемая в максимальную кинетическую энергию ползуна без учета диссипативных сил,

$P_{\max}$ – максимальное усилие пружины при ее максимальном удлинении,

c – жесткость пружины.



(а) (б)

Рис. 2. Нелинейные пружинные аккумуляторы:
а) с пружинами растяжения, б) с пружинами сжатия

Особенностью пружинного аккумулятора, представленного на рис. 1, является то, что максимальная потенциальная энергия пружины в 2 раза превышает суммарную потенциальную энергию аккумулятора в среднем положении, а эффективная потенциальная энергия также в 2 раза меньше максимальной потенциальной энергии пружины.

Для НПА в работе [5] показано, что при больших амплитудах, когда $x_{\max}$ больше расстояния между осью крепления пружины и направляющей ползуна e (рис.2), с достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать, что время перемещения между крайними положениями для рассматриваемых аккумуляторов равно времени перемещения линейного аккумулятора с одной пружиной сжатия и растяжения, представленного на рис. 3.

В таблице представлены выражения, определяющие основные характеристики рассматриваемых пружинных аккумуляторов в зависимости от их конструктивных параметров.

Таблица

Характеристика аккумулятора	ЛПА с двумя пружинами растяжения или сжатия (рис.1)	НПА с одной пружиной растяжения или сжатия (рис.2)	НПА с одной пружиной растяжения или сжатия (рис.3)
$П_{\max}$	$2cx_{\max}^2$	$0{,}5cx_{\max}^2$	$0{,}5cx_{\max}^2$
$П_э$	$cx_{\max}^2$	$0{,}5cx_{\max}^2$	$0{,}5cx_{\max}^2$
$P_{\max}$	$2cx_{\max}$	$cx_{\max}$	$cx_{\max}$
t	$\pi\sqrt{\frac{m}{2c}}$	$\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$	$\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$

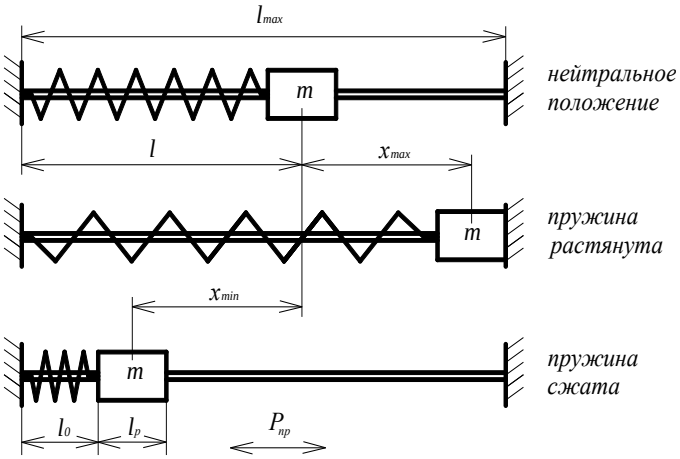


Рис. 3. Схема линейного пружинного аккумулятора с одной пружиной сжатия-растяжения

Максимальная кинетическая энергия пружинного аккумулятора без учёта диссипативных потерь равна:

$$E_{\max} = \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}_{\max}^2 \tag{1}$$

где $\dot{x}_{\max}$ - максимальная скорость ползуна в среднем положении.

В соответствии с работой [6] жесткость пружины, обеспечивающая заданное время перемещения, определяется выражением:

$$c = \frac{\pi^2 \cdot m}{t^2} \tag{2}$$

А для рекуперативного привода с пружинным аккумулятором с двумя пружинами жесткость будет равна:

$$c = \frac{\pi^2 \cdot m}{2t^2} \tag{3}$$

Из совместного решения уравнений (1),(2),(3) и уравнений потенциальной и кинетической энергии по таблице 1 находим соотношение между временем перемещения и максимальной скоростью ползуна при прохождении нейтрального положения:

$$\dot{x}_{\max} = \frac{\pi}{t} \cdot x_{\max} \text{ или } \dot{x}_{\max} = \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot x_{\max} \tag{4}$$

Тогда зависимость минимального времени перемещения ползуна между крайними положениями от допустимой максимальной скорости и отклонением от максимального положения будет иметь вид:

$$t_{\min} = \frac{\pi}{\dot{x}_{\max}} \cdot x_{\max} \tag{5}$$

График зависимости (5) для $x_{\max} = 1$ показан на рис. 4.

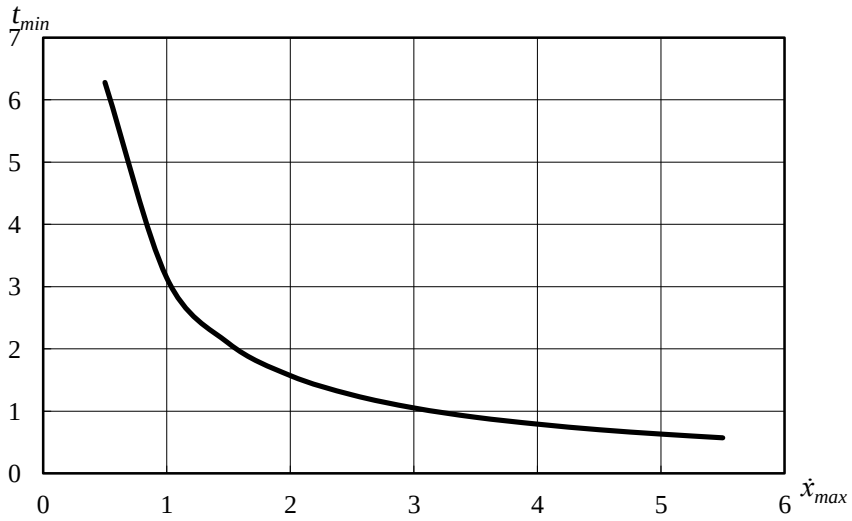


Рис. 4. График зависимости минимального времени перемещения ползуна от максимальной скорости

В соответствии с теоремой Эри при подаче компенсационно-силового импульса в начале периода время перемещения на заданное расстояние уменьшается, в конце периода увеличивается, а при подаче импульса в промежуток времени, симметричный относительно точки устойчивого равновесия, время определяется полупериодом колебательной системы. Точно так же полупериод колебательной системы сохранится, если будут даны два идентичных импульса в начале и в конце периода. Графически теорема Эри показана на рис. 5, а на рис. 6 показан пневматический привод для компенсации диссипативных потерь [2,4].

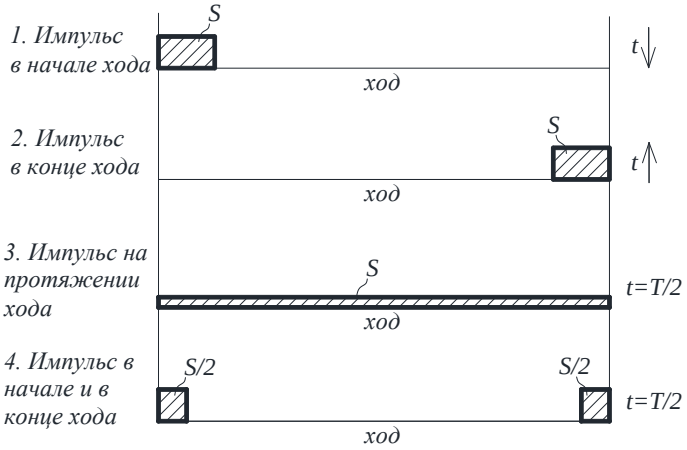


Рис. 5. Графическое изображение теоремы Эри

На рис. 6 пневмоцилиндр, используемый для компенсации диссипативных сил НПА, установлен таким образом, что он образует с поступательной парой кулисный механизм и позволяет подать силовой импульс в начале и в конце хода, только в начале хода или только в конце.

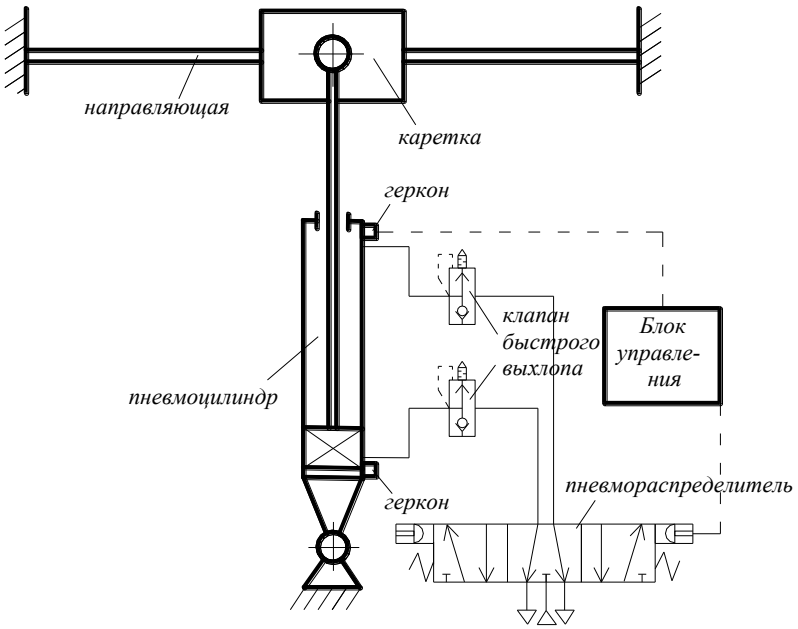


Рис. 6. Система компенсации диссипативных сил с пневмоцилиндром, образующим кулисный механизм с поступательной парой

Отметим, что привод с кулисным пневмоцилиндром самый перспективный, так как позволяет производить фиксацию в крайних положениях, выбирая пневмоцилиндр с усилием равным максимальному усилию пружинного аккумулятора, действующего на ползун.

Первая передаточная функция кулисного механизма между скоростью ползуна и скоростью поршня пневмоцилиндра имеет вид:

$$\dot{l} = \dot{x} \cdot \frac{x}{x^2 + h_{\max}^2} \tag{6}$$

В соответствии с работой [9] скорость ползуна в функции от его координаты определяется выражением:

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot x_{\max} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{x^2 + h^2} - h}{\sqrt{x_{\max}^2 + h^2} - h} \right)^2} \tag{7}$$

На рис. 7 показаны графики изменения линейной скорости поршня пневмоцилиндра в зависимости от координаты ползуна.

Из графиков видно, что максимальные скорости поршня меньше скорости ползуна и что период колебаний поршня в два раза больше периода колебаний ползуна, т.е. за время движения ползуна из одного крайнего положения в другое поршень успевает два раза совершить возвратно-поступательное перемещение. Причем, с увеличением координаты ползуна относительная скорость поршня пневмоцилиндра уменьшается. Отметим, что в диапазоне 0,9 – 1,0 скорость поршня практически не зависит от конструктивных параметров привода. При

$\dot{l}$ $\dot{x}$

координате, равной 0,9 амплитуды, скорость приблизительно в три раза меньше максимальной скорости каретки, а при координате, равной 0,95 амплитуды, скорость в 5 раз меньше максимальной скорости каретки.

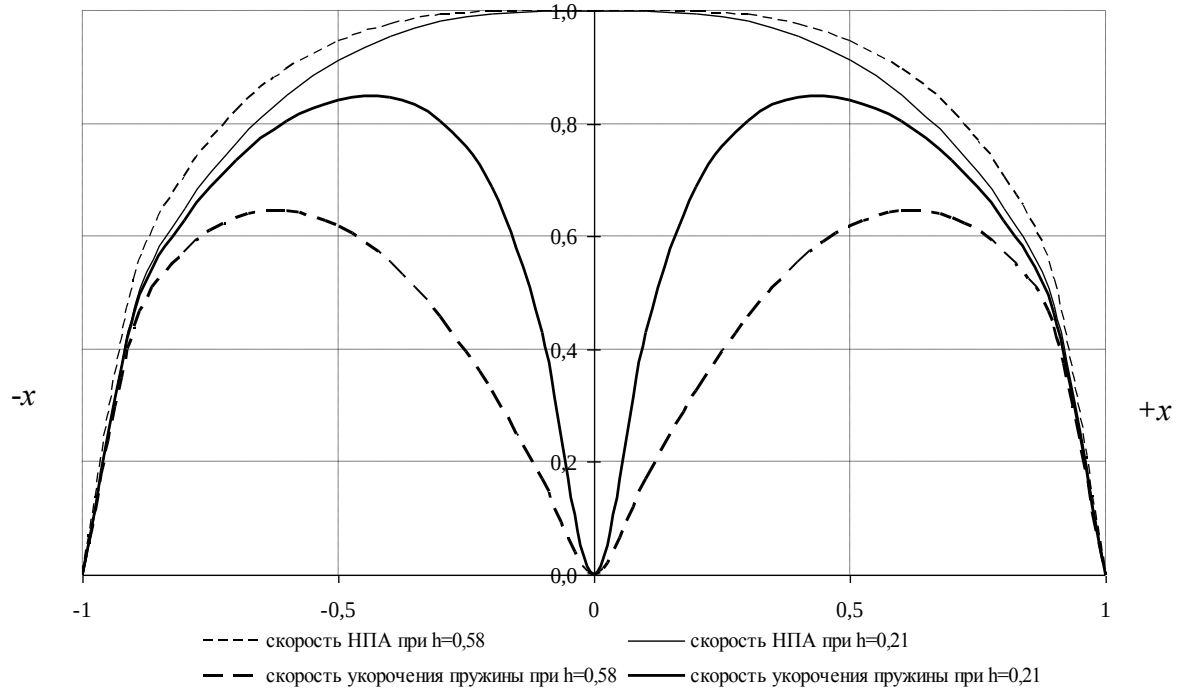


Рис. 7. Зависимость скорости поршня пневмоцилиндра от координаты ползуна

Для компенсации диссипативных сил предпочтительнее применять режим работы с включением пневмоцилиндров в конце хода, что обеспечивает компенсацию диссипативных потерь с одновременной фиксацией ползуна в крайних положениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1283083 (СССР). Привод перемещения звеньев/ Г.Г.Ежов, В.Л.Жавнер, Н.А.Феоктистова // БИ. – 1987. - №2.
2. Баутин Н.Н. Динамическая теория часов: Стабилизация периода в колебательных системах с двумя степенями свободы. – М.: Наука, - 1986. – 192 с.
3. Жавнер В.Л., Смирнов А.Б. Мехатронные принципы проектирования технологического оборудования // Конструктор-машиностроитель. - 2008. - №3.
4. Жавнер В.Л., Жавнер М.В., Мацко О.Н. Мехатронный рекуперативный привод для возвратно-поступательных и возвратно-качательных движений // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов X Международной научно-технической конференции «Чтения памяти

В.Р.Кубачека». – Екатеринбург: Уральский гос-ный горный университет, 2012. – С.267-270.
5. Жавнер М.В., Мацко О.Н. Нахождение периода колебаний нелинейного пружинного аккумулятора с поступательной парой // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2013. – с. 205-209.
6. Жавнер В.Л., Жавнер М.В., Мацко О.Н. Мехатронный рекуперативный привод для возвратно-поступательных перемещений // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – с. 304-310.
7. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М.: Наука. – 2006. – 376 с.
8. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Цикловые роботы с аккумуляторами механической энергии. Многопозиционные системы с одной или несколькими степенями подвижности// Станки и инструмент, 1984, №6, с.4-8.
9. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений: учеб.пособие/ В.Л. Жавнер, М.В. Жавнер, О.Н. Мацко. – Saarbrucken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2014. - 90 с.
10. Тывес Л.И. Механизмы робототехники: Концепция развязок в кинематике, динамике и планировании движений. – М.: ЛЕНАРД, 2014. – 208 с.

V.L.Javner, O.N.Matsko

RECUPERATIVE DRIVES FOR CYCLE MOVEMENTS WITH PNEUMATIC DISSIPATIVE FORCE COMPENSATORS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to reduction of power consumption in process equipment recuperative drives by installing spring accumulators with pneumatic dissipative force compensators. The comparison of basic parameters and characteristics for linear and non-linear spring accumulators is given.

Key words: recuperative drive, linear spring accumulator, non-linear spring accumulator, dissipative force compensation

REFERENCES

[1] USSR patent 1283083. Drive for link movement/ Ezhov G.G., Zhavner V.L., Feoktistova N.A. // BI. – 1987. – No. 2. (rus.)

[2] Bautin N.N. Dynamic clock theory: Period stabilization in oscillating systems with two degrees of freedom. – M.: Nauka, - 1986. – 192 p. (rus.)
[3] Zhavner V.L., Smirnov A.B. Mechatronic design criteria of process equipment // Konstruktor-Mashinostroitel. - 2008. – No. 3. (rus.)
[4] Zhavner V.L., Zhavner M.V., Matsko O.N. Mechatronic recuperative drive for reciprocating and swinging motions // Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoi i neftegazovoi promyshlennost: Works of the 10th International Scientific and Technical Conference "Chteniya pamyati Kurbacheka V.R." – Ekaterinburg: State Ural Mining Universit, 2012. – 267-270 p. (rus.)
[5] Zhavner V.L., Matsko O.N. Finding of oscillation time for a non-linear spring accumulator with a sliding pair // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. – St.-Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta. – 2013. – 205-209 p. (rus.)
[6] Zhavner V.L., Zhavner M.V., Matsko O.N. Mechatronic recuperative drive for reciprocating motions // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. – St.-Petersburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta. – 2012. – c. 304-310. (rus.)
[7] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Theoretical basis for robotic technology. In 2 books. – M.: Nauka. – 2006. – 376 p. (rus.)
[8] Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. Cycle robots with mechanical energy accumulators. Multiposition systems of one or several degrees of freedom // Stanki i instrumen, 1984, No.6, 4-8 p. (rus.)
[9] Recuperative drives for cycle motions: teaching aids Zhavner V.L., Zhavner M.V., Matsko O.N. – Saarbrucken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2014. - 90 p. (rus.)
[10] Tyves L.I. Robotic mechanisms: coupling principles in kinematics, dynamics and motion planning. – M.: LENARD, 2014. – 208 p. (rus.)

УДК 681.51

П. В. Маков

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ БЕЗ УЧАСТИЯ ВОДИТЕЛЯ

Пётр Владимирович Маков, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Протвино»
Россия, г. Протвино Московской обл.
Тел.: (9092)9588959, E-mail: avtomak1@yandex.ru.

Аннотация

Раскрываются причины создания в перспективе автомобилей оснащённых системами автономного (автоматизированного) управления – робокаров. Представлены пути развития систем автономного управления предлагаемые различными компаниями с целью перехода к таким автомобилям. Перечисляются проблемы внедрения автомобилей управляемых без участия водителя для движения в транспортных потоках.

Ключевые слова: автомобиль, автономные системы управления, водитель, робокары

Предпосылки создания робокаров

Известно, что автомобиль является источником повышенной опасности, так как ежегодно в мире в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) погибает 1,2 миллиона человек. Однако резкого снижения количества ДТП, несмотря на улучшения в области транспортной безопасности, не происходит.

Применение систем автономного управления автомобилями может в несколько раз повысить безопасность на дорогах, а, следовательно, спасти многие жизни [1].

С помощью таких систем, водители в будущем смогут решать, вести ли автомобиль самостоятельно, или же предоставить управление машине. Автомобиль станет еще более безопасным, так как будет способен реагировать как на свое состояние, так и на внешние обстоятельства. Кроме того, расход топлива, а также характеристики автомобиля будут оптимизированы на основе данных, поступающих в режиме реального времени, что позволит сделать вождение более энергосберегающим [2,3].

В дополнении необходимо сказать, что такие системы позволят снизить нагрузку на социальные службы, когда престарелые люди и

инвалиды перестанут зависеть от них хотя бы в вопросах транспортировки. Достаточно задать автомобилю цель, и он поедет в нужном направлении.

Американская компания Cisco Systems опубликовала результаты собственного исследования отношения потребителей к процессу выбора и эксплуатации автомобилей.

Компания опросила 1500 потребителей в 10 странах мира, включая Россию. По результатам исследования 57% заявили, что они не против поездок в автомобиле с автономным управлением. Примечательно, что наибольшее доверие выразили потребители в странах с развивающимися рынками: Бразилии (96%), Индии (86%), Китае (70%). В России, о своем доверии к самоуправляемым авто заявили 57% опрошенных – почти столько же, сколько и в США – 60%.

Таким образом, самостоятельно передвигающийся автомобиль-робот – оптимальное решение проблем [4].

Автоматизированные системы серийных автомобилей

В основе систем автоматизированного управления автомобилями – системы превентивной безопасности, навигация, системы помощи водителю (СПВ или DAS), контролирующие слепые зоны, дистанцию, полосу движения, распознающие дорожные знаки, адаптивный круиз-контроль, который управляет скоростью, следит за дистанцией, подруливает, поворачивает и меняет полосу движения для обгонов и перестроений.

Сегодня в компании **Continental** над созданием основ автоматизированной системы управления трудится более 1250 специалистов. Они разрабатывают системы СПВ, например, адаптивный круиз-контроль и так называемый «тормозной ассистент». Создание подобных устройств предполагает использование сложных технологий, которые позволяют при любых обстоятельствах следить за дорожной обстановкой с помощью инфракрасной камеры и радара – рис. 1, а значит, - всегда предупреждать водителя об опасности, поддерживать его и облегчать процесс вождения [12].

Разработанный компанией Continental автомобиль проехал по общественным дорогам в Неваде более 24000 км с помощью автоматизированной системы управления [11].

Компания Google применяет обычную видеокамеру на лобовом стекле, а обе немецкие системы имеют стереокамеры с двумя объективами, способными «рисовать» динамическую трехмерную карту и точнее определять расстояние до объектов и направление движения – рис. 2. Вместо микрокамер по кругу Bosch, подобно коллегам из Google, берет данные с вращающегося лазерного сканера, зона действия которого 150 м [8].

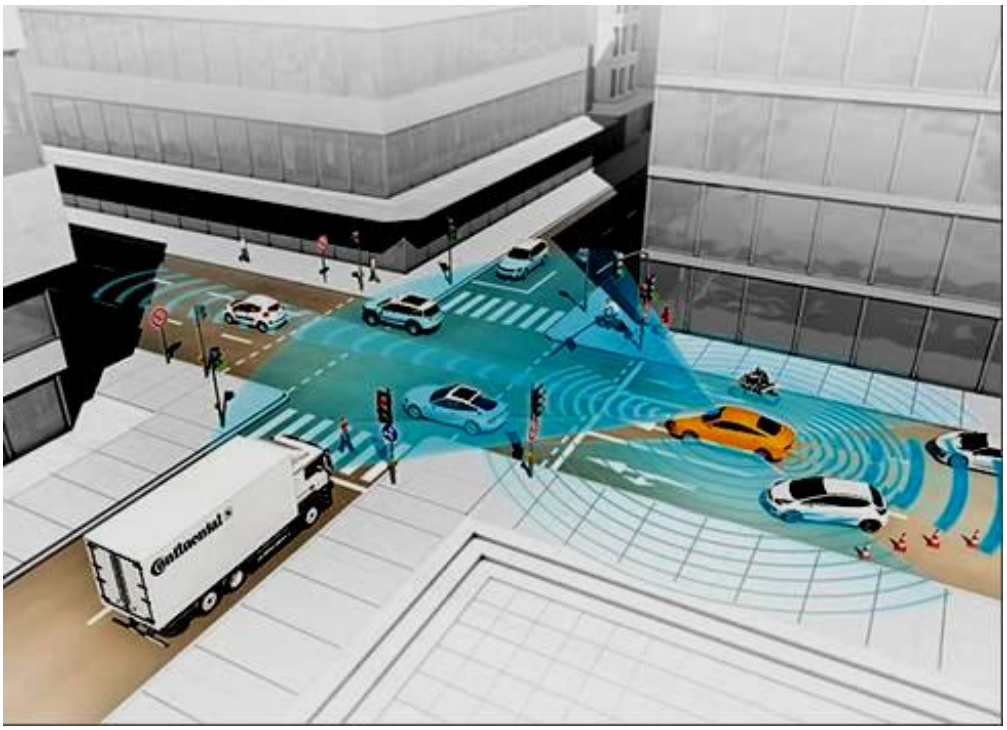


Рис. 1. Взаимосвязь автомобиля с окружающей средой

Рис. 2. Дальность радаров и видеокамер

Первые элементы автопилотного вождения компания **Volvo** представит в новом Volvo XC90 к концу 2014 года [6]. Другие возможности – распознавание края дороги и ограждений, благодаря вспомогательной системе управления, которая автоматически использует момент рулевого управления для удержания автомобиля в своей полосе движения и не даёт ему съехать с дороги.

Интеллектуальную систему управления наружным освещением на светодиодах ILS использует не одна автомобильная фирма (Audi, BMW, Mercedes-Benz). Данная система обеспечивает автоматическое управление дальним светом с плавными переходами и адаптивным регулированием дальности освещения в зоне действия ближнего света.

Активная система контроля «мёртвых» зон предупреждает водителя о съезде с полосы движения посредством вибрации рулевого колеса и звукового сигнала, если автомобиль случайно начинает пересекать распознанную раннее разметку.

Система адаптивного круиз-контроля Mercedes-Benz поддерживает желаемую скорость движения автомобиля, автоматически регулируя расстояние до впереди идущего транспорта – рис. 3.

Рис. 3. Система адаптивного круиз-контроля Mercedes-Benz

Система ночного видения Night View Assist Plus имеет видеокамеру, работающую в сочетании с двумя инфракрасными светодиодными фарами, отображает на дисплее комбинации приборов то, что в обычной ситуации осталось бы скрытым от глаз водителя – рис. 4. При активной функции Spotlight, люди, распознанные на обочине на стороне переднего пассажира будут дополнительно подсвечены мигающим светом с помощью специального модуля в фаре головного освещения.

Система контроля степени усталости снижает риск секундного засыпания и при скорости от 60 до 200 км/ч система при отклонениях характера управления подаёт звуковые и оптические сигналы водителю.

Всё большее количество автомобилей оборудуются **камерами заднего вида** либо **системой видеокамер**, которые контролируют зоны сбоку и непосредственно перед автомобилем, передавая картинку на дисплей, и формируя вид сверху.

Audi представила новую систему автономного управления автомобилем, способную на малых скоростях избавить водителя от управления при движении «бампер к бамперу» в потоке – рис. 5 [10].

Рис. 4. Система ночного видения Mercedes-Benz

Рис. 5. Система помощи при движении в плотном потоке Audi

Перспективные системы автономного управления

Компания Google в начале 2012 года первая вывела для испытаний на дороги общего пользования свой беспилотник на базе гибрида Toyota Prius. Роботы компании Google, как и опытные роботизированные Volkswagen Passat с системой Continental, сейчас испытываются в США по дорогам Невады и уже без проблем прошли полмиллиона «автоматических» километров, а автопилоты Bosch на универсалах BMW испытываются в Мичигане, Калифорнии и на автобанах Германии.

Смысл автономного управления по версии компании **«Nissan»** заключается в следующем: исключить возможность аварий благодаря умной, принимающей самостоятельные решения машине – рис. 6 [9].

«Nissan» показал электромобиль «Лиф». Он медленно движется между рядами машин. Обнаружив, что одна из них выезжает, ожидает, пока место освободится, и занимает его. Затем по команде со смартфона

владельца так же самостоятельно выезжает и движется к нему, определив местонахождение по GPS-координатам. Если автомобиль не найдет свободного места, он вернется к месту, где его оставил владелец, и сообщит ему на смартфон, что он должен срочно вернуться [5,7].

Рис. 6. Автономное управление компании «Nissan»

Компания **Audi** также имеет собственную технологию самоуправляемого автомобиля с использованием 12 ультразвуковых датчиков, который может найти место на стоянке и припарковаться без участия водителя, а владелец может вызвать автомобиль с парковки.

Компании **BMW** и **Continental** объединили свои усилия для разработки технологии самоуправляемого автомобиля. Основная цель совместной деятельности - разработка и тестирование технологий, которые ознаменуют с 2020 года вступление в эру высокоавтоматизированного вождения на европейских автострадах, с полностью автоматизированными системами, как ожидается, с 2025 года.

Учёные из **технического университета Мюнхена** совместно со специалистами BMW построили прототип руля, интегрированные датчики которого измеряют частоту сердечных сокращений, сопротивление кожи и насыщение крови кислородом. Соответствующие параметры могут выводиться на дисплей в салоне.

Автомобиль обнаруживает, когда водитель уже не чувствует себя комфортно, а затем предпринимает соответствующие действия.

Проект **Volvo** SARTRE по движению автомобилей в караване представляет собой автопоезд, состоящий из трех легковых автомобилей и грузовика. На испытаниях, автопоезд выехал на дороги общего пользования и проделал около 200 км в окрестностях испанской Барселоны – рис. 7.

Суть проекта - в создании системы, которая позволяет автомобилям ехать на «автопилоте» в связке за машиной-лидером, которой управляет профессиональный водитель.

Рис. 7. Проект Volvo SARTRE

Перспективы развития систем автономного управления

Технологически, автоматизированное вождение ведет к эволюции вспомогательных автомобильных систем. Объединение этих систем, систем управления и информации, поступающей от водителя, в одну сеть способствует реализации концепции автоматизированного вождения.

Начиная с 2016 года, частично автоматизированные системы управления смогут помогать водителям на низких скоростях (до 30 км/ч) при езде с частыми остановками (например, когда движение на дороге затруднено). Однако этот шаг к автоматизации все же не позволит водителям совсем не уделять внимание тому, что происходит на дороге.

Свое полное воплощение такие системы могут получить с внедрением высокоавтоматизированного управления в 2020 году. Такой режим можно будет применять при скорости больше 30 км/ч. Тем не менее, даже при таком уровне автоматизации вождения, водитель должен иметь возможность в любое время контролировать автомобиль.

В 2025 году станет возможным полностью автоматизированное управление машиной. Автомобиль с полностью автоматизированной системой управления сможет абсолютно самостоятельно справляться с вождением на скорости вплоть до 130 км/ч.

В планах **Continental** – разработка и предложение покупателям в 2016 году продукцию, которая решит проблему частично автоматизированного управления автомобилем, а к 2020 или 2025 году создание первых устройств для полностью автоматизированного вождения на высокой скорости и в сложных дорожных условиях.

Эти сроки не случайны – именно с 2014 года одним из требований комитета Euro NCAP будет обязательное наличие системы, снижающей риск попутного столкновения машин, а с 2016-го года – и электроники,

способной замечать пешеходов и останавливать автомобиль перед ними (подобные поправки готовятся и в японскую и американскую программы безопасности).

Volvo берет курс на оснащение всех своих машин автоматической системой безопасного вождения, которая сейчас активно разрабатывается и проходит тестовые испытания.

В течение ближайших двадцати лет доля самоуправляющихся автомобилей на рынке будет расти, и к 2035 году достигнет 75% от общего количества продаваемых в мире легковых автомобилей, считают аналитики Navigant Research.

Возможные проблемы на пути развития систем автономного управления автомобилем

«Главное условие для внедрения систем автоматизированного вождения - это их надежность. Максимальная безопасность на дороге является фундаментом, на который должна опираться вся система», - объясняет Дегенхарт, председатель совета директоров компании Continental. Говоря более конкретно, подобные системы требуют такой структуры, которая не допускала бы ошибок, и которая делала бы автомобиль безопасным, если все же неполадка возникнет [12].

И хотя полностью самоуправляемые автомобили еще не скоро станут распространенным явлением на дорогах, законодатели в нескольких американских штатах, как отмечает издание Wall Street Journal, уже начали готовить юридические основания для эксплуатации подобных ТС.

Пока только Калифорния, Невада и Флорида приняли некоторые законы по использованию машин с автономным управлением на дорогах общего пользования. Еще в нескольких штатах готовятся аналогичные законопроекты. Главный вопрос, который встает перед разработчиками, – кто будет нести ответственность в случае ДТП с таким автомобилем: компания, разработавшая технологию, владелец, который мог бы взять управление на себя, или производитель транспортного средства?

Наиболее продвинулась вперед в этом вопросе Невада, в 2011 году принявшая закон о «беспилотных» авто, благодаря которому департамент транспортных средств штата создал 22-страничный свод правил по использованию машин с автономным управлением. Пока в Неваде такие ТС можно использовать только для испытаний на дорогах общего пользования и только после того, как машины наездят 10 тысяч тестовых часов на закрытых полигонах, после чего производитель обязан внести залог в 1 млн долларов на случай возмещения ущерба.

В Калифорнии принятое законодательство обязывает департамент транспортных средств разработать правила для эксплуатации «беспилотников» к 2015 году, а во Флориде — к 2014 году.

Кроме того, пересматривать придется не только внутренние законы, но и Венскую конвенцию, сейчас предписывающую каждому транспортному средству иметь водителя, а тому, в свою очередь, не отвлекаться от управления.

Кроме того, разработчики компании Continental и ещё одной компании признались, что их автопилоты смогут безошибочно работать только в предсказуемых ситуациях, «понимая», что делают окружающие машины, и в расчете на то, что автомобиль-робот окружают законопослушные и адекватные водители, соблюдающие правила движения и скоростной режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна: Учебник для студентов вузов/ И.С. Степанов, А.Н. Евграфов, А.Л. Карунин, В.В. Ломакин, В.М. Шарипов; Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: МГТУ «МАМИ», 2002. –230 с.
2. Информация – основополагающая составляющая современной автомобильной эргономики / Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. Том 3. / Гл. ред. С.У. Увайсов; Отв. ред. И.А. Иванов– М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, Прага-2013, стр. 251-253
3. Информация – как одно из ключевых понятий современной автомобильной эргономики / VII международная научно-практическая конференция «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве» – Протвино: 24 - 28 июня 2013 г., стр. 315-317
4. Конструирование роботов: Пер. с франц. / Андре П., К 65 Кофман Ж. – М., Лот Ф., Тайар Ж. – П.; Мир, 1986. – 360 с., ил.
5. Соснин Д.А., Яковлев В.Ф. Новейшие автомобильные электронные системы. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 240 с.: ил.
6. Хернер А., Риль Х-Ю. Автомобильная электрика и электроника. Перевод с нем. ЧМП РИА «СММ-пресс». - М.: ООО «Издательство «За рулем», 2013. - 624 с .: ил.
7. Райф К. Датчики в автомобиле: Пер. с нем. – М.: За рулем, 2013. – 165 с.
8. И. Хлебушкин. Беспилотники // Авторевю. – 2013. – № 17. – С. 66-68
9. Д. Фёдоров. Бесчеловечность // За рулём. – 2013. – № 3. С. 52-53
10. М. Гзовский, К. Милешкин. Водитель свободен // За рулём. – 2013. – № 8. – С. 42-46
11. http://www.nauka21vek.ru (дата обращения: 13.03.2014 г.)
12. http://www.autodela.ru (дата обращения: 13.03.2014 г.)

P.V.Makov

TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS SYSTEMS DRIVING WITHOUT PARTICIPATION OF THE DRIVER

International university of the nature, society and person "Dubna",
Protvino Branch

Abstract

The creation reasons in the long term cars equipped with systems of an off-line control reveal. Ways of development of such systems offered by various companies are presented. Problems of their introduction are listed.

Key words: car, autonomous control systems, driver, car-robot

REFERENCES

[1] Cars and tractors. Fundamentals of ergonomics and design: The textbook for students of higher education institutions / I.S. Stepanov, A.N. Evgrafov, A.L. Karunin, V. V. Lomakin, V. M. Sharipov; Under a general edition of V. M. Sharipov. – M.: "MAMI" MGTU, 2002. –230 pages.

[2] Information – a fundamental component of modern automobile ergonomics / Innovative information technologies: Materials of the international scientific and practical conference. Volume 3. / Editor-in-chief S. U. Uvaysov; Crucial edition I.A. Ivanov – M.: MIEM NIU VShE, Prague-2013, p. 251-253.

[3] Information – as one of key concepts of modern automobile ergonomics / the VII international scientific and practical conference "Information and Communication Technologies in Education, Science and Production" – Protvino: 24 - On June 28, 2013, p. 315-317.

[4] Designing of robots: The lane with fr. / André P., To 65 Coffman Zh. – M, Lot F. Tayar Zh. – P.; World, 1986. – 360 pages, silt.

[5] Sosnin D. A. Yakovlev V. F. The latest automobile electronic systems. – M.: SOLON Press, 2005. – 240 pages: silt.

[6] Herner A., Ril H-Yu. Automobile electrician and electronic engineer. The translation with it. ChMP RIA "CMM-press". - M.: Ltd. «Za rulem» Publishing House, 2013. - 624 pages: silt.

[7] Rayf K. sensors in the car: The lane with it. – M.: Za rulem, 2013. – 165 pages.

[8] Hlebushkin. Pilotless car // Avtorevyu. – 2013 . – No. 17. – Page 66-68.

[9] M. Gzovsky, K. Mileshkin. The driver is free // Za rulem. – 2013 . – No. 8. – Page 42-46.

[10] D. Fyodorov. Inhumanity // Za rulem. – 2013 . – No. 12. – Page 52-53.

[11] http://www.nauka21vek.ru (дата обращения: 13.03.2014 г.)

[12] http://www.autodela.ru (дата обращения: 13.03.2014 г.)

УДК 62-52

С.В. Павлюченко[1], М.Н. Полищук[2], Н.Е. Пуленец[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СТЕНДА В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

[1]Сергей Владимирович Павлюченко, инженер
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: metronom@inbox.ru.

[2]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

[3]Николай Евгеньевич Пуленец, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: virus80@mail.ru

Аннотация

В работе выполнена оценка погрешности воспроизведения линейных ускорений в динамических режимах. Приведены результаты исследований центробежного стенда при движениях по различным функциональным законам.

Ключевые слова: линейные ускорения, центробежный стенд, динамические режимы, точность.

Задача определения погрешностей воспроизведения линейных ускорений в динамических режимах работы, т. е. для ускорений, изменяющихся по функциональным законам, может быть решена путем прямого сопоставления заданной и воспроизведенной траектории движения. Для этого необходимо измерить воспроизводимые ускорения в различных (по времени) точках траектории, сопоставить их с заданной траекторией и определить ошибку. Очевидно, что наиболее простым решением было бы установить на ротор центрифуги акселерометр, записать его показания за интересующий интервал времени, математически обработать данные и сравнить известный теоретический закон воспроизведения с полученным. Существуют, однако, серьезные

проблемы при подборе акселерометра, удовлетворяющего требованиям точности и диапазона измерения. Кроме того, при обработке данных с акселерометра неизбежно придется учитывать также и погрешности, вносимые ориентацией и расположением измерительной оси акселерометра относительно вектора центробежного ускорения. Поэтому на практике удобнее воспользоваться косвенными измерениями скорости вращения ротора по показаниям, полученным с датчика угла поворота.

В основу измерительной системы созданного в СПбГПУ стенда [3, 4, 5, 9, 10] положен принцип измерения угла поворота ротора за фиксированный интервал времени. Угол поворота регистрируется программно-аппаратными средствами контроллера движения NI PXI-7342. На вход контроллера поступает последовательность импульсов с датчика угла. Эта последовательность регистрируется счетчиком и используется контроллером в качестве сигналов обратной связи по положению [1]. Информация об угловом положении вала ротора центрифуги (в виде массива данных) обрабатывается программным обеспечением стенда [6] с использованием следующих формул [4]:

– угол поворота вала, α_t, рад

$$\alpha_t = \frac{\pi}{2Z} \cdot z_t, \tag{1}$$

где Z – число штрихов измерительного лимба датчика угла; z_t – значение счетчика импульсов датчика угла в момент измерения t;

– угловая скорость ω_t, рад/с

$$\omega_t = \frac{\alpha_{t-\Delta t/2} - \alpha_{t+\Delta t/2}}{\Delta t}, \tag{2}$$

где Δt – интервал измерения, с;

– угловое ускорение ε_t, рад/с^2

$$\varepsilon_t = \frac{\omega_{t-\Delta t/2} - \omega_{t+\Delta t/2}}{\Delta t}, \tag{3}$$

или

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_{t-\Delta t} - 2\alpha_t + \alpha_{t+\Delta t}}{(\Delta t)^2}; \tag{4}$$

– линейное ускорение a_t, м/с^2

$$a_t = \omega_t^2 \cdot R \tag{5}$$

или

$$a_t = \left(\frac{\alpha_{t-\Delta t/2} - \alpha_{t+\Delta t/2}}{\Delta t} \right)^2 \cdot R, \tag{6}$$

где R – радиус воспроизведения, м;

– градиент линейного ускорения, k_t, м/с^3

$$k_t = 2\omega_t \cdot \varepsilon_t \cdot R \tag{7}$$

или

$$k_t = 2 \cdot \frac{(\alpha_{t-\Delta t/2} - \alpha_{t+\Delta t/2}) \cdot (\alpha_{t-\Delta t} - 2\alpha_t + \alpha_{t+\Delta t})}{(\Delta t)^3} \cdot R. \qquad (8)$$

Чтобы оценить погрешность воспроизведения, необходимо проводить измерения действующих величин с достаточной точностью; погрешность результата измерения должна быть меньше погрешности, с которой определяется погрешность воспроизведения. Поскольку не учитываются погрешности, связанные с ориентацией вектора центробежного ускорения, и принимается действующее значение ускорения на базовом радиусе центрифуги [2, 10], достаточно проанализировать влияние погрешности определения угла поворота ротора и погрешности определения времени.

Центрифуга стенда оснащена прецизионным датчиком угла ЛИР-392А-3-Н-125000-05-ПИ-4 производства СКБ ИС [7]. Производителем указано, что этот датчик соответствует 5-му классу точности (по ГОСТ 26242-90), для которого предел допускаемой погрешности (наибольшее отклонение от действительного значения между двумя любыми точками во всем диапазоне) составляет ±7,5". Указанная погрешность может рассматриваться как максимальная абсолютная погрешность датчика угла. Для оценки погрешности при обработке экспериментальных данных удобнее рассматривать случайные погрешности по значениям их моментов, в частности, по среднеквадратичному отклонению. Поэтому необходимо перейти от максимальной абсолютной погрешности датчика угла к среднеквадратичной погрешности.

О характере закона изменения погрешности датчика как случайной величины известно только то, что она (погрешность) является функцией от угла поворота вала и изменяется в пределах от минимального до максимального значений. Логично предположить, что в момент измерения вал может равновероятно занимать любое положение на интервале $[0, 2\pi]$, что соответствует случаю равномерного распределения. Для измерения угла поворота необходимо произвести, как минимум, два независимых измерения положения вала и вычесть одно из другого. Поскольку измерения независимы, то и результаты измерений также могут рассматриваться как независимые случайные величины. Случаю, когда суммируются или вычитаются две независимые случайные величины с равномерным законом распределения, соответствует распределение Симпсона (треугольный закон распределения). Дисперсия распределения Симпсона определяется выражением

$$D = \frac{a^2}{6}, \qquad (9)$$

где 2а – ширина диапазона изменения случайной величины.

Поскольку известно, что случайная величина изменяется в пределах от минимального до максимального значения абсолютной погрешности,

определенной производителем датчика угла, то СКО результата измерения угла поворота вала, определяемое погрешностью датчика угла, можно определить как

$$S_{\alpha s} = \frac{1}{\sqrt{6}} \Delta\alpha_s, \tag{10}$$

где $\Delta\alpha_s$, рад – погрешность датчика угла, занесенная в паспорт прибора.

Формула (10) получена в предположении о равномерном распределении случайной величины (ошибки) в пределах оборота вала датчика угла. На практике можно уточнить информацию о характере поведения ошибки, сняв кривую ошибки датчика угла внутри одного оборота вала. На рис. 1 показан пример такой кривой для датчика того же типа, что установлен на центрифуге стенда [7].

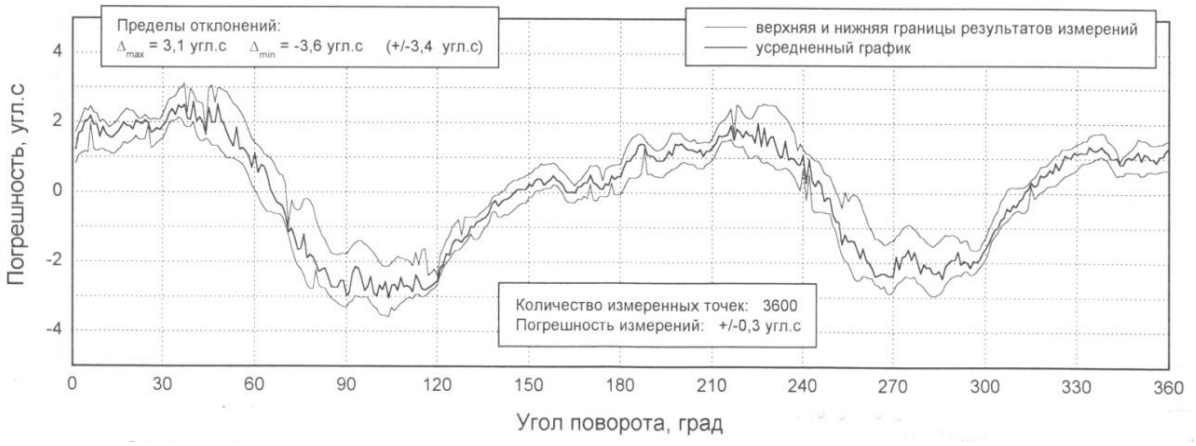


Рис. 1. Пример кривой ошибки датчика угла поворота

Кривая имеет гармонический характер с двумя периодами на один оборот. Исходя из внешнего вида графика, в качестве закона изменения случайной величины можно принять нормированный по амплитуде гармонический закон вида $y(\alpha) = \sin(2\alpha)$, где α – случайная величина угла поворота, равномерно распределенная на интервале $[0, 2\pi]$. Для подобной случайной величины дифференциальная функция распределения принимает вид

$$p(y) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}}, \tag{11}$$

дисперсия случайной погрешности

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} (y - \bar{y})^2 p(y) dy = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{1} y^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}} dy = \frac{1}{2}. \tag{12}$$

Таким образом, СКО результата измерения угла поворота вала в $\sqrt{2}$ раз меньше максимальной погрешности датчика угла: $S\alpha s = \Delta\alpha_s/\sqrt{2}$.

Следующим источником погрешности определения угла поворота будет погрешность квантования результата измерения угла. Речь идет о

дискретности датчика угла. В момент измерения положение вала ротора определено с максимальной погрешностью в ±1 метку датчика угла; при этом значение погрешности подчинено равномерному закону распределения случайной величины. Поскольку речь идет об измерении угла в дискретной системе, т. е. по двум независимым отсчетам, то справедливо утверждение, что погрешность квантования результата измерения угла будет подчинена треугольному закону распределения и СКО определится выражением

$$S_{\alpha q} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\pi}{2Z}. \tag{13}$$

Погрешность измерения времени определяется погрешностью захвата положения триггерным входом контроллера движения, которая (по документации производителя контроллера движения) не превышает 100 нс. Захват положения происходит с постоянной частотой, поэтому точки в измерительном буфере отстоят друг от друга на постоянную величину. Зная эту величину, можно измерить время между отстоящими друг от друга измерениями, ориентируясь только на их индексы (номера).

Для оценки СКО результата измерения времени предположим, что закон изменения случайной величины (задержки захвата положения) подчиняется равномерному закону распределения, для которого значение дисперсии определяется выражением $D = a^2/3$, где $2a$ – пределы изменения случайной величины.

Подставив в качестве предела изменения случайной величины значение погрешности измерения времени Δt_m запишем выражение для СКО результата измерения времени

$$S_t = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta t_m. \tag{14}$$

Для определения СКО результата измерения угловой скорости воспользуемся выражением СКО результата косвенных измерений

$$S_\omega = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial \alpha}\omega_t(\alpha)\right)^2 S_{\alpha s}^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \alpha}\omega_t(\alpha)\right)^2 S_{\alpha q}^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}\omega_t(\alpha)\right)^2 S_t^2},$$

$$S_\omega = \sqrt{\frac{4}{\Delta t^2}\left(S_{\alpha s}^2 + S_{\alpha q}^2\right) + \frac{\omega^2}{\Delta t^2} S_t^2}. \tag{15}$$

СКО результата измерения линейного ускорения при этом равно

$$S_a = 2 \cdot \omega \cdot R \cdot S_\omega. \tag{16}$$

Как видно, СКО результата измерения угловой скорости и, соответственно, ускорения при известных значениях СКО измерения угла и времени будут существенно зависеть от выбранного интервала измерения (или интервала осреднения). Для выбора приемлемого интервала измерения построены графики (рис. 2…4) относительной

погрешности СКО результата измерения линейного ускорения при следующих исходных данных:

– число штрихов измерительного лимба датчика угла, Z — 125000 меток

– погрешность датчика угла, $\Delta\alpha_s$ — ±7,5" (угл. секунд)

– погрешность квантования угла — ±1 метка

– погрешность измерения времени, Δt_m — 100×10^{-9} с

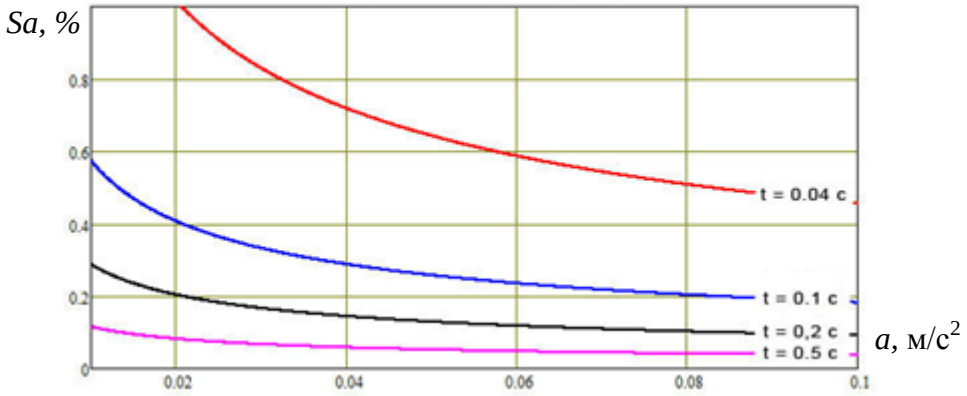


Рис. 2. СКО результата измерения ускорения в диапазоне 0,01…0,1 м/с^2

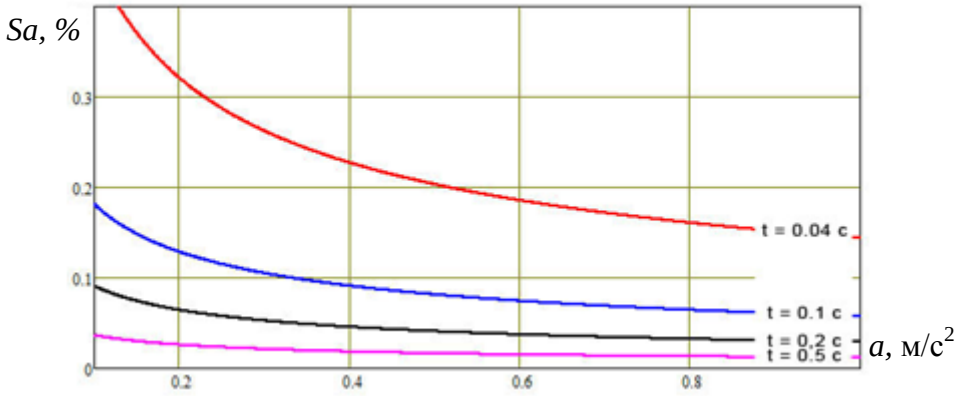


Рис. 3. СКО результата измерения ускорения в диапазоне 0,1…1 м/с^2

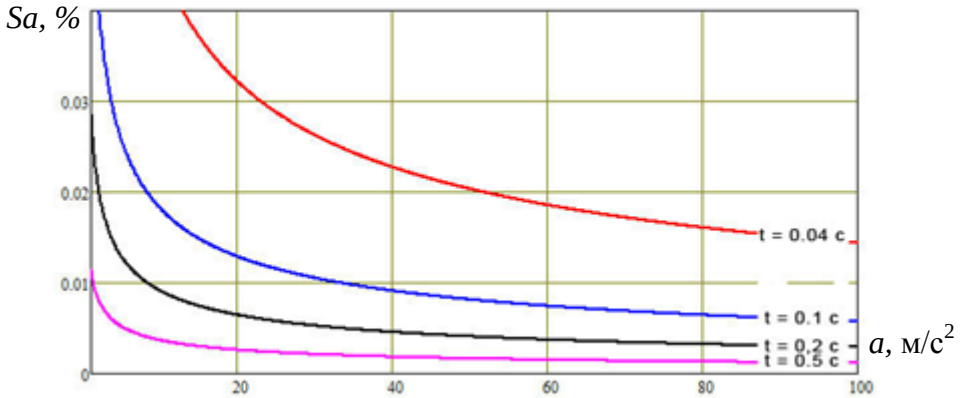


Рис. 4. СКО результата измерения ускорения в диапазоне 1…100 м/с^2

Для достоверности измерения выбираются такие интервалы измерения ускорения, при которых погрешность измерения заведомо ниже

требуемой погрешности воспроизведения. Как видно из графиков, для всех трех заданных диапазонов линейных ускорений указанному условию удовлетворяет интервал измерения в 0,2 с.

Для оценки погрешности воспроизведения сравнивается участок воспроизводимой траектории движения с заданной. Для упрощения математической обработки выбирается линейный закон движения. Линейный закон движения, несмотря на кажущуюся простоту реализации, мало отличается, с точки зрения контроллера движения, от любого другого закона.

Данные для анализа можно получить с помощью измерительной системы стенда, последовательно воспроизводя линейный закон движения на заданных диапазонах (диапазон 1…100 для удобства разбивается на два: 1…10 и 10…100) и проводя измерения параллельно. Время перехода с одного ускорения на другое выбирается так, чтобы гарантированно выполнить по 30 измерений действующего значения линейного ускорения с интервалом в 0,2 с. Параметры воспроизводимых законов сведены в табл. 1 (для линейного закона движения).

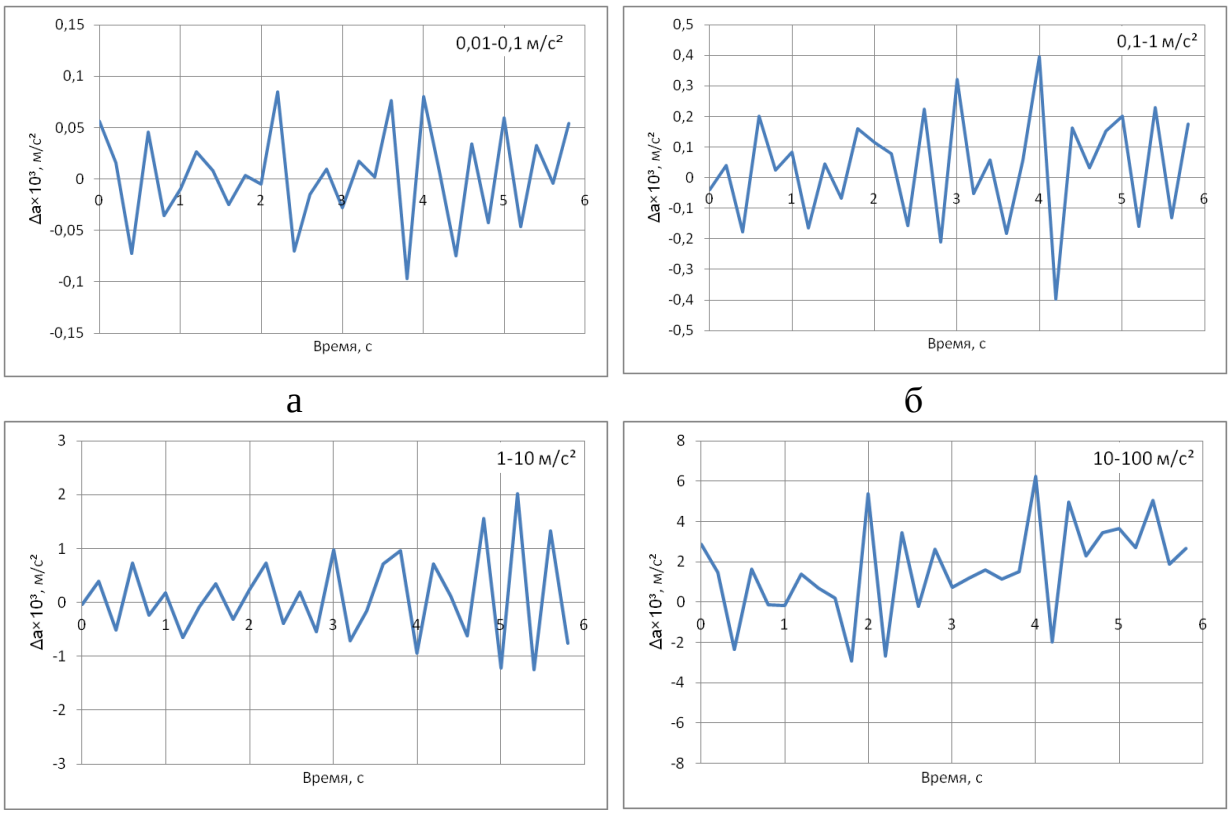
Таблица 1

Параметры воспроизводимых траекторий для линейного закона движения

Диапазон	a_0	a_1	Δt, с	R, м	k, м/с^3
	м/с^2				
1	0,01	0,1	10	0,3	0,009
2	0,1	1			0,09
3	1	10			0,9
4	10	100			9

Поскольку необходимо количественно оценить величину погрешности воспроизведения, следует определить параметр, который будет выступать показателем качества. Само значение линейного ускорение изменяется во времени, поэтому брать его действующие значения для анализа неудобно. Погрешность воспроизведения можно рассматривать, как отклонение действующего значения от заданного, т. е. от размера ошибки.

Чтобы вычислить величину ошибки, необходимо сопоставить полученные данные по линейному ускорению с теоретическим значением. Графики ошибки воспроизведения, полученные в результате эксперимента, для всех диапазонов показаны на рис. 5.



а б

в г

а – 0,01…0,1 м/с^2; б – 0,1…1 м/с^2; в – 1…10 м/с^2; г – 10…100 м/с^2;

Рис. 5. Ошибка воспроизведения, м/с^2×10^3

В качестве оценки погрешности примем СКО результата наблюдения и вычислим относительную погрешность, приведенную к правой и левой границе диапазона.

$$S_{\Delta a} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\Delta a_i - \overline{\Delta a})^2} \quad (18)$$

$$\overline{\Delta a} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta a_i \quad (19)$$

$$S_{\Delta a0} = S_{\Delta a}/a_{[]}, \quad (20)$$

где $S_{\Delta a}$ – СКО результата наблюдения; $\overline{\Delta a}$ – среднее значение ошибки (математическое ожидание); n – число измерений (n = 30); $S_{\Delta a0}$ – относительная погрешность результата наблюдения; $a_{[]}$ – ускорение на границе диапазона.

Результаты вычислений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительные погрешности результата наблюдений

N	Границы диапазона, м/с^2		$\overline{\Delta a}$, м/с^2	$S_{\Delta a}$, м/с^2	$S_{\Delta a0}$, отн. на границе диапазона	
	левая	правая			левой	правой
1	0,01	0,10	$3{,}11\cdot10^{-6}$	$4{,}798\cdot10^{-5}$	$4{,}798\cdot10^{-3}$	$4{,}798\cdot10^{-4}$
2	0,1	1,0	$3{,}38\cdot10^{-5}$	$1{,}785\cdot10^{-4}$	$1{,}785\cdot10^{-3}$	$1{,}785\cdot10^{-4}$
3	1,0	10,0	$9{,}36\cdot10^{-5}$	$8{,}134\cdot10^{-4}$	$8{,}134\cdot10^{-4}$	$8{,}134\cdot10^{-5}$
4	10,0	100,0	$1{,}61\cdot10^{-3}$	$2{,}317\cdot10^{-3}$	$2{,}317\cdot10^{-4}$	$2{,}317\cdot10^{-5}$

График зависимости относительной погрешности воспроизведения по левой (наихудшей) границе диапазона воспроизведения показан на рис. 6 (для наглядности – с использованием логарифмической шкалы).

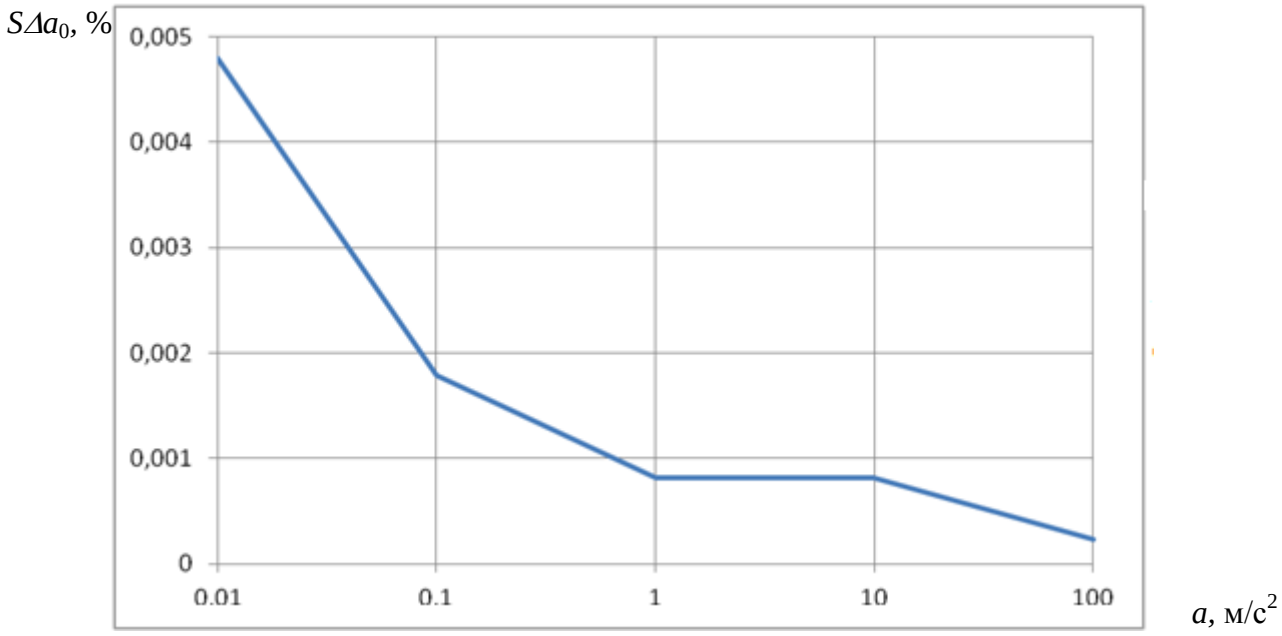


Рис. 6. Относительная погрешность воспроизведения

Из графика видно, что относительная погрешность воспроизведения в диапазоне от 0,01 до 100 м/с^2 не превышает 0,5% и убывает с увеличением линейного ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич А.В., Полищук М.Н. Теория автоматического управления. Практикум, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 125 с.
2. Дьяченко В.А., Попов А.Н., Тимофеев А.Н. Градуировочные и испытательные стенды кафедры "Автоматы". Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2007. №52-1. С.73-78.
3. Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле

действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда [Текст]: отчет о НИОКР (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2012. – 99 с. – Библиогр.: с. 95–96. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.

4. Исследование динамических и точностных характеристик центробежных стендов на макете стенда для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка специального привода (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 190 с. – Библиогр.: с. 146–147. – № ГР 01201370610. – Инв. № 143322301.
5. А.В. Назаров, А.Н. Попов, Е.А. Чернова. Стенд для моделирования аэродинамических потерь в испытательных центрифугах. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 210-216.
6. С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец. Программное обеспечение для лабораторного испытательного стенда. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 217-226.
7. Преобразователь угловых перемещений ЛИР-392А. http://www.skbis.ru/pdf/_angular.
8. Разработка технического проекта макета стенда для испытаний изделий в поле ускорений [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб. 2012. – 243 с. – Библиогр.: с. 170–175. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.
9. Создание макета лабораторного стенда со специальным приводом [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 135 с. – Библиогр.: с. 72–74. – № ГР 01201370510. – Инв. № 143322301.
10. Центрифуга. Попов А.Н., Тимофеев А.Н., Чернова Е.А. Патент на полезную модель. RUS 127477 11.12.2012.

S.V. Pavluychenko, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenets

THE CENTRIFUGAL TESTING MASHINE DYNAMIC OPERATION MODES ACCURACY RESEARCH

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article deals with the error estimation of linear accelerations in dynamic modes. The results of studies of the centrifugal testing machine when moving to different functional laws are presented.

Key words: linear acceleration, centrifugal testing machine, dynamic modes, accuracy.

REFERENCES

[1] Borisevich A.V., Polishchuk M.N. Automatic Control Theory. Workshop, St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – 125 p.

[2] Diachenko V.A., Popov A.N., Timofeev A.N. Calibration and test equipment designed at the Department of "Automatic machines". Scientific and Technical Statements SPBSTU. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press 2007. № 52-1. P. 73-78. (rus).

[3] Investigation of centrifugal test machines for products within the field of constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and development of the laboratory machine [Text]: report on R & D (final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] – St. Petersburg., 2012. – 99 p. – Bibliography.: P. 95-96. – № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).

[4] Investigation of dynamic and accuracy characteristics of centrifugal machine on the laboratory model for testing products in the field of action of the constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and the development of a special drive (final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] – St. Petersburg., 2013. – 190 p. - Bibliography: P. 146-147. – № GR 01201370610. – Inv. Number 143322301. (rus).

[5] A.V. Nazarov, A.N. Popov, E.A. Chernova. Aerodynamic losses in test centrifuges simulating machine. Modern engineering. Science and education. – St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. P. 217-226. (rus).

[6] S.V. Pavluchenko, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenets. Software for the laboratory test machine. Modern engineering. Science and education. – St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – P. 227-236.

[7] Converter angular displacements LIR-392A. http://www.skbis.ru/pdf/_angular.

[8] Technical design of the laboratory simulating machine for testing in the field accelerations [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.]. – St. Petersburg, 2012. – 243 p. – Bibliography: P. 170-175. - № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).
[9] Creation of the laboratory simulating machine with a special drive [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] - St. Petersburg., 2013. – 135 p. – Bibliography: P. 72-74. – № GR 01201370510. – Inv. Number 143322301. (rus).
[10] Centrifuge. Popov A.N., Timofeev A.N., Chernova E.A. A utility model patent. RUS 127477 11.12.2012.

УДК 62-52

М.Н. Полищук[1], А.Н. Попов[2], А.Н. Тимофеев[3]

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА ЦЕНТРОБЕЖНОМ СТЕНДЕ

[1]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: porka.n@mail.ru.

[2]Аркадий Николаевич Попов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

[3]Александр Николаевич Тимофеев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: timofeev42@list.ru

Аннотация

В статье проведено исследование центробежного стенда обеспечивающего воспроизведение линейных ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам. Получены теоретические оценки диапазонов воспроизведения угловых скоростей вращения ротора центрифуги.

Ключевые слова: линейные ускорения, центробежный стенд, математическая модель, статические и динамические диапазоны угловых скоростей.

Одной из задач, которые решались при проектировании на кафедре «Автоматы» СПбГПУ центробежного стенда [4, 5, 6, 11, 12, 13], являлась оценка диапазонов воспроизводимых параметров движения, статических и динамических. Хотя стенд предназначен для задания линейных ускорений (как постоянных, так и изменяющихся по требуемым функциональным законам), однако с учетом однозначной связи воспроизводимых на заданном радиусе линейных ускорений и угловых скоростей вращения ротора центрифуги стенда, можно вести речь о диапазонах задания скоростей вращения.

Статический диапазон воспроизведения угловых скоростей

определяется минимальным и максимальным значениями угловой скорости вращения ротора центрифуги, при которых обеспечиваются необходимые требования по погрешности стабилизации скорости. Нижний предел воспроизводимых скоростей ограничивается, в первую очередь, возможностью потери устойчивости замкнутой системы управления из-за недостаточной частоты следования сигналов обратной связи от датчика углового положения ротора при низких скоростях вращения. Верхний предел диапазона обусловливается быстрым ростом аэродинамических потерь на высоких скоростях вращения при ограниченной мощности приводного двигателя. Динамические диапазоны воспроизводимых скоростей и ускорений зависят от максимального значения развиваемого углового ускорения, которое, в свою очередь, ограничивается моментом двигателя.

Для выполнения теоретических оценок границ диапазонов, в которых выполняются заданные требования по воспроизведению на стенде параметров движения, необходима математическая модель сервопривода центрифуги, построенного на базе синхронного электродвигателя с частотным преобразователем и контроллера с ПИД-регулятором. В учебной и специальной литературе [3, 7] приводятся математические модели синхронных двигателей, хуже обстоит дело с математическим описанием частотных преобразователей. В любом случае подобные описания являются слишком сложными, чтобы пытаться на их основе получить теоретические оценки. Упростим модель.

Математическая модель системы

Требуемая скорость вращения ротора центрифуги стенда поддерживается с помощью контура регулирования углового положения ротора [9]. Как уже было сказано выше, в этот контур входят, в частности, синхронный электродвигатель и частотный преобразователь, оптимизирующий параметры его работы.

Воспользуемся тем обстоятельством, что при хорошей настройке пары «преобразователь-двигатель» выходной вращающий момент синхронного двигателя прямо пропорционален напряжению, которое поступает с ПИД-регулятора. При таком допущении математическая модель системы упрощается и может быть представлена в следующем виде

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi}(t) = M(t) - M_{\text{с}}(t), \\ M(t) = Ku(t), \\ u(t) = k_{\text{п}}\Delta\varphi(t) + k_{\text{д}}\Delta\dot{\varphi}(t) + k_{\text{и}}\int\Delta\varphi(t), \\ \Delta\varphi(t) = \varphi^*(t) - \varphi(t), \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции ротора центрифуги; φ(t) – угол поворота ротора центрифуги; $M(t)$ – момент двигателя; $M_{\text{с}}(t)$ – момент сопротивления

вращению; K – коэффициент пропорциональности между моментом двигателя и напряжением, подаваемым на двигатель; u – напряжение на выходе ПИД-регулятора (т. е. на входе двигателя); $k_п$, $k_д$, $k_и$ – коэффициенты усиления пропорционального, дифференциального и интегрального каналов ПИД-регулятора; φ*(t) – желаемая «траектория» движения ротора – воспроизводимый закон изменения угла поворота ротора центрифуги во времени; Δφ(t) – отклонение текущего угла поворота ротора от номинального значения, определяемого желаемой траекторией.

Структурная схема системы, соответствующая модели (1), представлена на рис. 1.

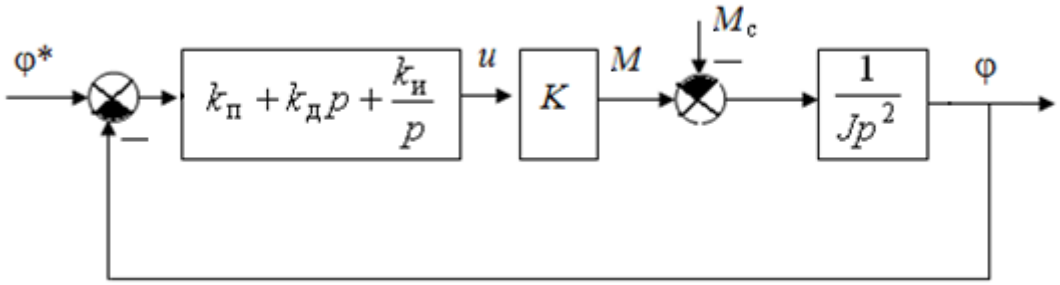


Рис. 1. Структурная схема системы

С учетом того, что момент сопротивления аппроксимируется квадратичной зависимостью $M_c(t) = \alpha\dot{\varphi}^2$ ($\alpha \approx 1\cdot10^{-5}$ Нмс^2), дифференциальное уравнение системы в отклонениях от заданного режима $\dot{\varphi}^*(t) = \omega_0$ принимает вид

$$J\Delta\dddot{\varphi} + (Kk_д + \alpha\omega_0)\Delta\ddot{\varphi} + Kk_п\Delta\dot{\varphi} + Kk_и\Delta\varphi = 0. \quad (2)$$

Согласно критерию Гурвица необходимые и достаточные условия устойчивости системы сводятся к виду

$$(Kk_д + \alpha\omega_0)k_п > Jk_и \quad (3)$$

или в несколько упрощенной форме

$$k_п k_д > \frac{J}{K}k_и \quad (4)$$

Все дальнейшие оценки зависят от выбора параметров ПИД-регулятора. Существуют различные методы определения коэффициентов усиления каналов ПИД-регулятора. Условно их можно разделить на методы ручной настройки (интуитивные), аналитические и оптимизационные [1]. Имея в распоряжении математическую модель, можно использовать аналитические и оптимизационные методы синтеза.

Ясно, что значения оптимальных параметров зависят от реализуемого режима (траектории движения) и, вообще говоря, будут различными на каждом режиме. В принципе, возможна поднастройка параметров в зависимости от режима, но выполнить такую настройку не просто, особенно в динамических режимах с быстрым изменением скорости вращения ротора, так как ресурсы компьютера и контроллера в режиме

управления центрифугой стенда в реальном времени ограничены. Кроме того, следует учитывать еще один важный фактор. В режимах разгона центрифуги напряжение с выхода ПИД-регулятора должно иметь такую величину, чтобы обеспечить высокий момент двигателя, необходимый как для движения с нужным угловым ускорением, так и для преодоления момента сопротивления вращению. Поэтому коэффициенты не могут быть малыми. Так как наиболее проблемными представляются именно режимы с высокой динамикой, то и при выборе коэффициентов $k_п$, $k_д$ и $k_и$ следует ориентироваться на эти режимы.

Для синтеза параметров ПИД-регулятора был выбран один из основных режимов его работы – переход с малой угловой скорости вращения ротора центрифуги $\omega_1 = 10$ рад/с на скорость $\omega_2 = 100$ рад/с при угловом ускорении $\varepsilon = 10$ рад/с^2 (рис. 2).

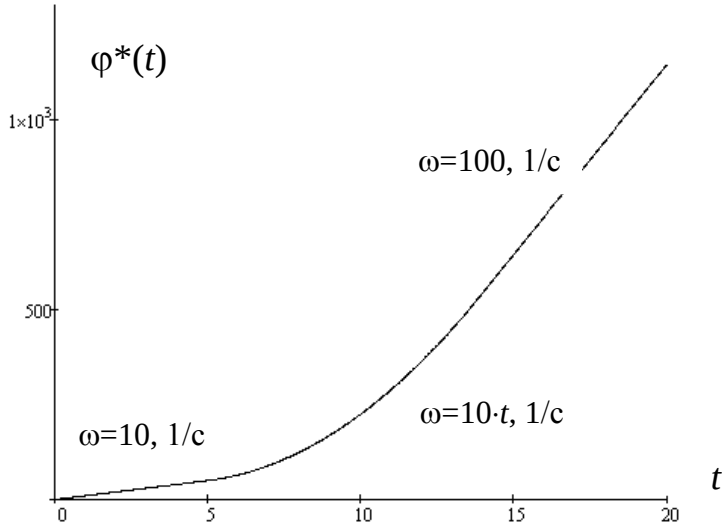


Рис. 2. Тестовая траектория для синтеза параметров ПИД-регулятора

Математически оптимизационный синтез регулятора может быть сформулирован как задача численной минимизации функции вида

$$\Phi(\Lambda) = \int_0^{T_0} [y_\Lambda(t) - y^*(t)]^2 dt \to \min, \qquad (5)$$

где Λ – вектор параметров регулятора, для которых осуществляется подбор оптимальных значений; в данном случае $\Lambda = (k_п, k_д, k_и)$; $y_\Lambda(t)$ – выходной сигнал объекта управления в системе с настраиваемым регулятором; y*(t) – желаемый выходной сигнал; T_0 – продолжительность моделируемого интервала времени работы системы.

Выбор в пользу этого метода можно объяснить наличием программных средств, в частности модуля Simulink [1, 2], где процедура оптимизации реализована достаточно просто и удобно для пользователя. В Simulink встроен инструмент Simulink Design Optimization, который позволяет решать задачи синтеза регуляторов для линейных и нелинейных систем на основе задачи оптимизации параметров регулятора.

В результате оптимизации были получены следующие значения коэффициентов: $k_п$ = 718; $k_д$ = 922; $k_и$ = 317, которые и использовались далее при теоретических оценках.

Теоретическая оценка нижней границы статического диапазона

Как уже было сказано выше, минимальное значение угловой скорости вращения, воспроизводимое на лабораторном центробежном стенде, лимитируется возможной потерей устойчивости.

Условие устойчивости можно представить в виде

$$T = \frac{2\pi}{m\omega} < T_{кр}, \tag{6}$$

где T – период следования сигналов с датчика углового положения (типа ЛИР); $T_{кр}$ – критическое (максимально возможное) значение периода следования сигналов обратной связи; m – число меток датчика на оборот; ω – угловая скорость вращения ротора.

Из (6) следует оценка минимальной скорости

$$\omega_{min} = \frac{2\pi}{mT_{кр}}. \tag{7}$$

С учетом дискретности следования сигналов математическая модель системы (1) несколько изменяется и принимает вид

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi}(t) = M(t) - M_c(t), \\ M(t) = Ku[nT], \quad nT \le t < (n+1)T, \quad n = 0,1,\ldots, \\ u(t) = k_п\Delta\varphi(t) + k_д\Delta\dot{\varphi}(t) + k_и\int\Delta\varphi(t), \\ \Delta\varphi(t) = \varphi^*(t) - \varphi(t), \end{cases} \tag{8}$$

Структурная схема системы, соответствующая модели (8), представлена на рис. 3.

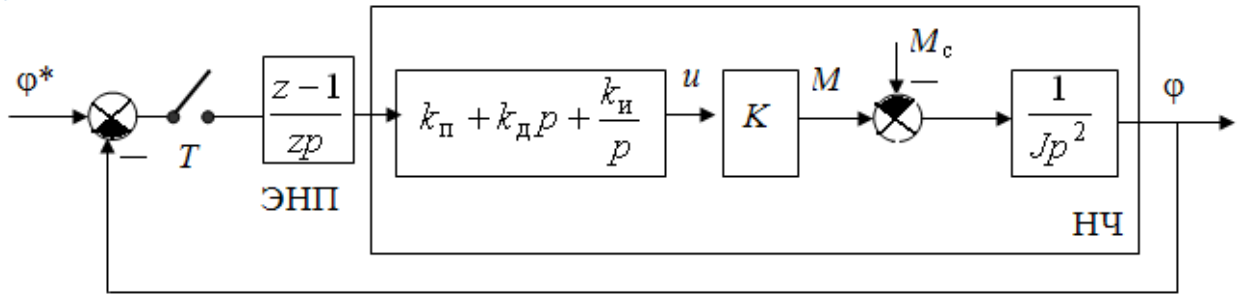


Рис. 3. Структурная схема системы:
ЭНП – экстраполятор нулевого порядка, НЧ – непрерывная часть системы

Система (8) является линейной импульсной, поэтому для ее исследования можно применить аппарат Z-преобразования. Передаточная функция разомкнутой импульсной системы имеет вид

$$G_{раз}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z\left\{\frac{G_н(p)}{p}\right\}, \tag{9}$$

где $G_н(p)$ – передаточная функция непрерывной части системы; z – переменная Z-преобразования.

С учетом выражения

$$G_н(p) = K \cdot \frac{k_п + k_д p + \frac{k_и}{p}}{Jp^2} = K \cdot \frac{k_п p + k_д p^2 + k_и}{Jp^3} \qquad (10)$$

получаем

$$G_{раз}(z) = \frac{K}{J} \cdot \frac{z-1}{z} \cdot Z\left\{\frac{k_д p^2 + k_п p + k_и}{p^4}\right\}. \qquad (11)$$

После преобразований приходим к окончательному выражению для передаточной функции разомкнутой импульсной системы в виде

$$G_{раз}(z) = \frac{KT}{6J(z-1)^3}\left\{6k_д(z-1)^2 + 3k_п T(z+1)(z-1) + k_и T^2(z^2+4z+1)\right\}. \qquad (12)$$

По выражению (12) получим характеристическое уравнение замкнутой системы $Q(z) = 1 + G_{раз}(z) = 0$, применим w-преобразование и воспользуемся алгебраическим критерием устойчивости для линейных импульсных систем:

$$Q(w) = A_0 w^3 + A_1 w^2 + A_2 w + A_3 = 0, \qquad (13)$$

где $A_0 = 48J - 24Kk_д T + 2Kk_и T^3$; $A_1 = 24Kk_д T - 12Kk_п T^2 - 6Kk_и T^3$; $A_2 = 12Kk_п T^2 - 6Kk_и T^3$; $A_3 = 6Kk_и T^3$.

Согласно критерию Гурвица, необходимые и достаточные условия устойчивости сводятся к требованиям: $A_i > 0$ (i = 1…3), $A_1 \cdot A_2 > A_0 \cdot A_3$. Из (13) следует, в частности, такая оценка периода следования сигналов обратной связи:

$$T < \min\left\{\frac{2J}{Kk_д}; \frac{2k_п}{k_и}; \frac{2k_д}{k_п}\right\}. \qquad (14)$$

При найденных ранее «оптимальных» коэффициентах $k_п = 718$; $k_д = 922$; $k_и = 317$ находим теоретическую оценку критического (максимального) периода $T_{кр} = 1{,}72 \cdot 10^{-3}$ с.

Для проверки полученной оценки было выполнено моделирование дискретной системы с помощью Simulink. После уточнения на имитационной модели было получено критическое значение периода: $T_{кр} = 1{,}74 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае система находится на границе устойчивости, наблюдаются незатухающие колебания постоянной амплитуды, определяемой заданными начальными условиями.

Согласно (14) при числе меток датчика m = 50000 получаем оценку нижнего диапазона воспроизводимых угловых скоростей $\omega > 7{,}2 \cdot 10^{-3}$ рад/с или n > 0,07 об/мин. Следует также отметить, что с учетом нелинейности системы (ограничения напряжения на выходе ПИД-регулятора)

неустойчивость при более низких скоростях будет проявляться в форме автоколебаний.

Теоретическая оценка динамических диапазонов

Так как центробежные стенды предназначены для воспроизведения линейных ускорений, то можно считать, что все ограничения обусловливаются только возможностью достижения требуемых линейных ускорений или, что то же самое, требуемых угловых скоростей вращения. Так реально и происходит, когда речь идет о статических режимах, если, конечно, не важно время выхода на нужный режим. При воспроизведении динамических траекторий ситуация усложняется. На первый план выходит вид требуемого закона воспроизводимых линейных ускорений.

Опыт создания центробежных стендов, позволяющих воспроизводить различные законы изменения линейных ускорений, показал, что рациональным является следующий подход:

1) предусматривается возможность реализации на стенде некоторого набора «стандартных» законов a(t), например, линейного, квадратичной параболы, кубичного сплайна и др.;

2) требуемый закон, в том числе достаточно сложный, имитирующий реальный физический процесс, моделируемый на стенде (например, старт летательного аппарата), аппроксимируется элементами стандартного набора, например, за счет разбиения требуемой траектории на малые временные интервалы и выбора на каждом из них наиболее подходящего из имеющихся законов;

3) на каждом участке (интервале) задается начальное и конечное значение линейного ускорения, время движения и, возможно, дополнительный параметр.

При таком подходе возникает задача реализуемости соответствующих участков. Разработчик должен предусмотреть соответствующую проверку и не задавать «недопустимые» участки.

Анализ показал, что задача решается путем проверки ограничений по максимальным (по модулю) значениям угловых скоростей и угловых ускорений. Этого вполне достаточно, в частности, чтобы не допустить слишком большие линейные ускорения или градиенты линейных ускорений. Поэтому достаточно определить динамические диапазоны угловых скоростей и угловых ускорений ротора центрифуги.

Допустимая угловая скорость вращения ротора центрифуги ограничивается следующими факторами:

- номинальной угловой скоростью приводного двигателя;
- условиями прочности при действии центробежных сил;
- требованиями по точности;
- параметрами частотного регулятора.

С учетом параметров двигателя CMP80S/KY/RH1M/KK, используемого в стенде (номинальная скорость вращения 2000 об/мин),

выполненных прочностных расчетов [8, 10, 11] и настроек преобразователя было принято значение допускаемой скорости ω_{max} = 100 рад/с.

Допустимое угловое ускорение зависит, в первую очередь от вращающего момента двигателя и геометрических параметров ротора. Максимальное угловое ускорение, которое способен развить двигатель, можно оценить по формуле

$$\varepsilon_{max} = \frac{M_н - M_с}{J}, \tag{15}$$

где $M_с$ – момент сопротивления, определяемый, в первую очередь, аэродинамическими потерями; J – момент инерции ротора.

Для двигателя с номинальным моментом $M_н$ = 13,4 Нм и дискового ротора центрифуги с моментом инерции J ≈ 1,06 кгм^2 из (15) получаем оценку $\varepsilon_{max} \approx 10$ 1/с^2.

Итак, для стенда устанавливаются следующие ограничения: $|\omega_{max}| = 100$ рад/с, $|\varepsilon_{max}| = 10$ рад/с^2.

По (15) можно оценить динамические диапазоны изменения линейных ускорений и градиентов линейных ускорений. Понятно, что при базовом радиусе R = 0,3 м имеем для линейных ускорений: 0 ≤ a ≤ 3000 м/с^2.

Градиент воспроизводимого линейного ускорения определяется по формуле

$$k(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d\left|\omega^2(t)R\right|}{dt} = 2\varepsilon(t)\omega(t)R. \tag{16}$$

Очевидно, что значение градиента не может превышать произведения максимальных значений угловой скорости и углового ускорения вращения ротора центрифуги. Из (16) следует

$$k_{max} \le \frac{2M_н R}{J}\omega_{max} \tag{17}$$

или

$$k_{max} \le \frac{2M_н\sqrt{R}}{J}\sqrt{a_{max}}\,. \tag{18}$$

Формулы (17) и (18) позволяют грубо оценить верхний предел возможного значения градиента изменения линейного ускорения. Более точно это можно сделать, рассмотрев конкретные функциональные законы изменения линейного ускорения.

Формула (18) показывает, что для конкретного стенда (при определенных значениях номинального момента $M_н$ двигателя, момента инерции J ротора, базового радиуса R) допустимый градиент k ускорения зависит от начального ускорения a, с которого «стартует» траектория (или соответствующий ее участок) (рис. 4). Зеленым цветом на графике выделена допустимая зона, а красным – не допустимая, т. е. такая, где невозможно движение с заданным градиентом. Граница, разделяющая

области, соответствует самому динамичному режиму – движению с максимальным угловым ускорением.

Полученные теоретические оценки могут использоваться при составлении технических заданий на разработку центробежных стендов. Проведенные авторами экспериментальные исследования на лабораторном стенде подтвердили их адекватность.

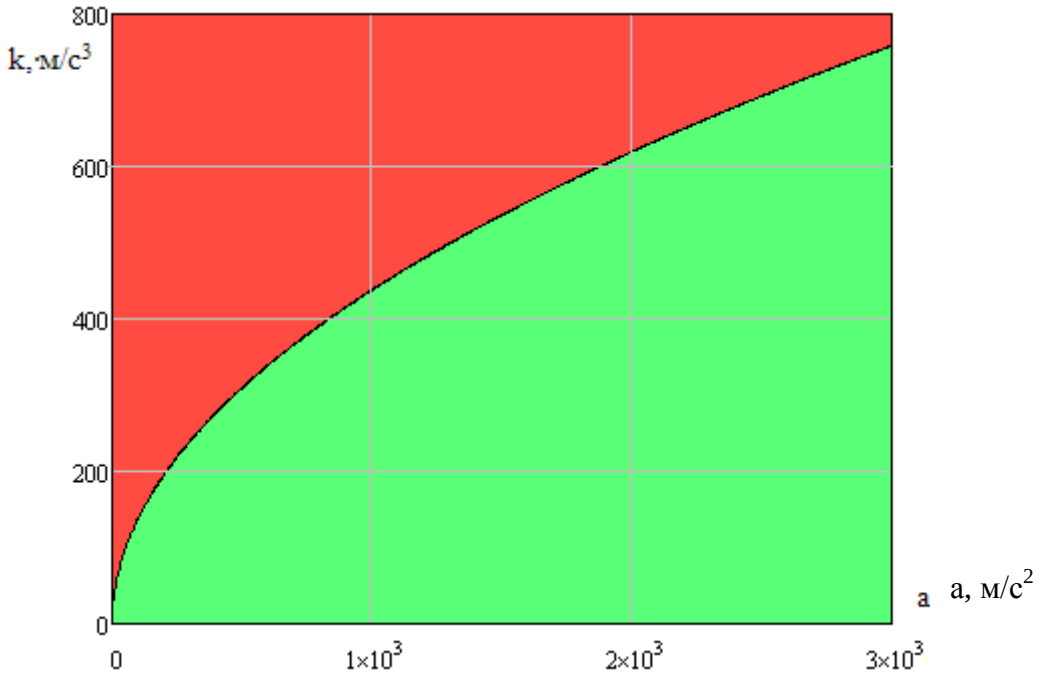


Рис. 4. Зависимость допустимого градиента от линейного ускорения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич А.В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 200 с.
2. Борисевич А.В., Полищук М.Н. Теория автоматического управления. Практикум, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 125 с.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока /А.Б. Виноградов. ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».— Иваново, 2008. — 298 с. URL: http://www.vectorgroup.ru/files/doc/books/vinogradov_book.pdf.
4. Дьяченко В.А., Попов А.Н., Тимофеев А.Н. Градуировочные и испытательные стенды кафедры "Автоматы". Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2007. № 52-1. С. 73-78.

5. Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда [Текст]: отчет о НИОКР (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2012. – 99 с. – Библиогр.: с. 95–96. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.
6. Исследование динамических и точностных характеристик центробежных стендов на макете стенда для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка специального привода (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 190 с. – Библиогр.: с. 146–147. – № ГР 01201370610. – Инв. № 143322301.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев.— Москва: Энергоатомиздат, 2001. — 560 с.: ил. — Библиогр.: 553 с..
8. А.В. Назаров, А.Н. Попов, Е.А. Чернова. Стенд для моделирования аэродинамических потерь в испытательных центрифугах. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 210-216.
9. С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец. Программное обеспечение для лабораторного испытательного стенда. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 217-226.
10. М.Н. Полищук, А.Н. Попов, И.Б. Челпанов, Е.А.Чернова. Аэродинамические потери в испытательных центрифугах. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 227-237.
11. Разработка технического проекта макета стенда для испытаний изделий в поле ускорений [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб. 2012. – 243 с. – Библиогр.: с. 170–175. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.
12. Создание макета лабораторного стенда со специальным приводом [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 135 с. – Библиогр.: с. 72–74. – № ГР 01201370510. – Инв. № 143322301.
13. Центрифуга. Попов А.Н., Тимофеев А.Н., Чернова Е.А. Патент на полезную модель. RUS 127477 11.12.2012.

M.N. Polishchuck, A.N. Popov, A.N. Timofeev

EVALUATION OF RANGE MOTION PARAMETERS OF THE CENTRIFUGAL TESTING MASHINE

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Abstract

The article presents the study of the centrifugal testing machine providing playback of linear accelerations, varying in different functional laws. The theoretical evaluation playback ranges angular velocities of the centrifuge rotor are obtained.

Key words: centrifugal testing machine, linear acceleration, motion parameters, accuracy, static and dynamic range.

REFERENCES

[1] Borisevich A.V. Automatic Control Theory: an elementary introduction using MATLAB, St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2011. – 200 p.
[2] Borisevich A.V., Polishchuk M.N. Automatic Control Theory. Workshop, St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – 125 p.
[3] Vinogradov A.B. Vector control of electric AC drive / A.B. Vinogradov. Ivanovo State Power Universityof V.I. Lenin. – Ivanovo, 2008. – 298 p. (rus). URL: http://www.vectorgroup.ru/files/doc/books/vinogradov_book. pdf.
[4] Diachenko V.A., Popov A.N., Timofeev A.N. Calibration and test equipment designed at the Department of "Automatic machines". Scientific and Technical Statements SPBSTU. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press 2007. № 52-1. P. 73-78. (rus).
[5] Investigation of centrifugal test machines for products within the field of constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and development of the laboratory machine [Text]: report on R & D (final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] - St. Petersburg., 2012. – 99 p. – Bibliography.: P. 95-96. – № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).
[6] Investigation of dynamic and accuracy characteristics of centrifugal machine on the laboratory model for testing products in the field of action of the constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and the development of a special drive

(final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] – St. Petersburg., 2013. - 190 p. - Bibliography: P. 146-147. – № GR 01201370610. – Inv. Number 143322301. (rus).

[7] Klyuchev V.I. Electric drive theory: Textbook for Universities / V.I. Klyuchev. – Moscow: Energoatomizdat, 2001. - 560 p.: Il. – Bibliography: P. 553. (rus).

[8] A.V. Nazarov, A.N. Popov, E.A. Chernova. Aerodynamic losses in test centrifuges simulating machine. Modern engineering. Science and education. - St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. P. 217-226. (rus).

[9] S.V. Pavluchenko, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenets. Software for the laboratory test machine. Modern engineering. Science and education. - St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – P. 227-236.

[10] M.N. Polishchuck, A.N. Popov, I.B. Chelpanov, E.A. Chernova. Aerodynamic losses in test centrifuges. Modern engineering. Science and education. – St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. P. 217-226. (rus).

[11] Technical design of the laboratory simulating machine for testing in the field accelerations [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] - St. Petersburg., 2012. – 243 p. – Bibliography: P. 170-175. – № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).

[12] Creation of the laboratory simulating machine with a special drive [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] - St. Petersburg., 2013. – 135 p. – Bibliography: P. 72-74. – № GR 01201370510. – Inv. Number 143322301. (rus).

[13] Centrifuge. Popov A.N., Timofeev A.N., Chernova E.A. A utility model patent. RUS 127477 11.12.2012.

УДК 62-526

А.Н. Попов[1], С.В. Павлюченко[2], М.Н. Полищук[3], А.Н. Тимофеев[4]

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНОГО СТЕНДА

[1]Аркадий Николаевич Попов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: porka.n@mail.ru.

[2]Сергей Владимирович Павлюченко, инженер
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: metronom@inbox.ru.

[3]Михаил Нусимович Полищук, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: polishchuck@mail.ru

[4]Александр Николаевич Тимофеев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9686, E-mail: timofeev42@list.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы построения и исследования специального высокоточного привода центробежного стенда. Стенд предназначен для воспроизведения линейных ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам. Экспериментальные исследования, выполненные в лаборатории, показали высокие динамические и точностные характеристики специального привода.

Ключевые слова: исследования, специальный привод, центробежный стенд, линейные ускорения, синхронный серводвигатель, погрешность, динамика, произвольный закон движения.

Точность и надежность функционирования систем управления движением динамических объектов во многом определяется качеством работы измерительных преобразователей параметров движения: линейных и угловых акселерометров, датчиков угловых скоростей, гироскопов. Разработка, исследование и совершенствование этих приборов

невозможны без средств метрологического обеспечения их градуировки и поверки – градуировочных и испытательных стендов. Уровень точности воспроизведения параметров движения на подобных стендах должен быть выше, чем требуется для измерительных преобразователей, а диапазоны воспроизводимых параметров – шире диапазонов измеряемых преобразователями сигналов.

Опыт разработки и создания центробежных стендов свидетельствует о том, что их характеристики, по сути, в равной степени зависят, как от «механики» (точности изготовления и сопряжения деталей и сборки узлов, правильности выбора материалов, соблюдения технологий и т. д.), так и от привода. Последний «отвечает» за задание и поддержание необходимой скорости вращения ротора центрифуги, динамические диапазоны и точность отработки ускорений. Поэтому задача обоснованного выбора принципов построения привода и его грамотная техническая реализация актуальна. Ее эффективное решение не только повышает точностные характеристики роторных центробежных стендов, но также в значительной мере способствует и разработке новых перспективных моделей датчиков скорости, акселерометров и гироскопов для навигации, космонавтики и других важных научно-технических направлений [4, 13].

Высокоточный привод центробежных стендов имеет целый ряд важных особенностей, которые не присущи большей части типового машиностроительного оборудования. Основными среди них являются:

– прямой привод от двигателя к платформе центрифуги без каких-либо промежуточных передач;

– большой момент инерции ротора центрифуги, который, помимо прочего, может существенно изменяться от запуска к запуску из-за смены градуируемых приборов и технологической оснастки;

– широкий диапазон регулирования скоростей вращения и темпа набора (снижения) этих скоростей;

– существенное нелинейное аэродинамическое сопротивление на высоких скоростях [8, 10];

– высокие требования по метрологическому обеспечению воспроизведения и измерения параметров движения.

Часть возникающих в связи с этим проблем можно в той или иной мере решить на этапе проектирования центрифуги стенда. Например, аэродинамическое сопротивление можно уменьшить, используя кожух и ротор оптимальной формы, момент инерции ротора можно снизить, оптимизируя его конструкцию. Другие проблемы «снимаются» за счет применения взвешенных и обоснованных решений при проектировании привода.

На кафедре «Автоматы» СПбГПУ в рамках выполнения государственного контракта с корпорацией «Росатом» был разработан

центробежный стенд [5, 6, 11, 12] (рис. 1). Одной из главных задач при его создании было исследование возможностей высокоточного привода.

Рис. 1. Центробежный стенд

Высокоточный привод стенда построен на базе сервопривода и включает в себя контроллер движения NI PCI7342, приводной преобразователь Eurodrive MDX61B-0040-503, серводвигатель CMP80S/KY/RH1M/KK, датчик обратной связи по положению исполнительного звена ЛИР-392А-3-Н-125000-05-ПИ и резольвер RH1M [11, 12]. Упрощенная структурная схема привода представлена на рис. 2.

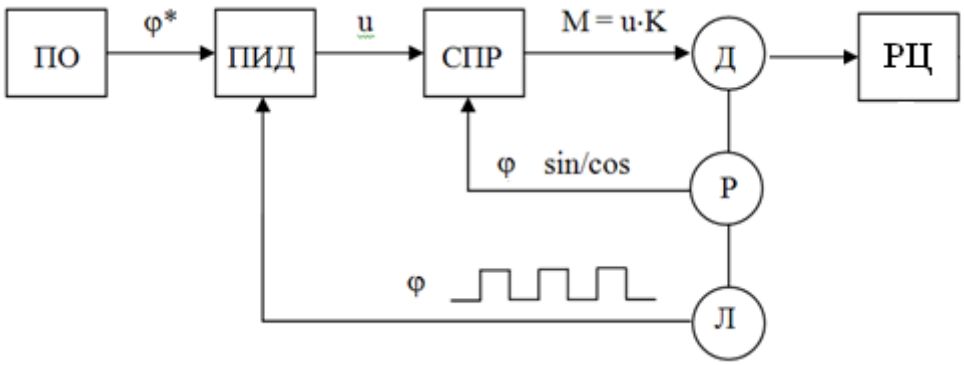


Рис. 2. Упрощенная схема сервопривода стенда:
ПО – программное обеспечение; ПИД – ПИД-регулятор;
СПР – сервопреобразователь; Д – двигатель; РЦ – ротор центрифуги;
Р, Л – датчики углового положения (резольвер и ЛИР)

В схеме на рис. 2 можно выделить два контура управления: локальный (регулирование момента двигателя) и основной (регулирование углового положения ротора центрифуги). Контур регулирования момента

включает преобразователь, двигатель и резольвер, а контур регулирования положения – регулятор, преобразователь, двигатель и энкодер.

Привод стенда реализован на базе специального синхронного высокомоментного двигателя CMP80S с постоянными магнитами и скошенными пазами на статоре. Выбор этого двигателя для стенда был обусловлен следующими обстоятельствами. Во-первых, синхронные серводвигатели с возбуждением от постоянных магнитов в настоящее время наиболее часто применяются в качестве серводвигателей прецизионного привода благодаря относительной простоте управления (по сравнению с асинхронными двигателями), более высокой точности и широким диапазонам регулирования момента. Во-вторых, синхронные серводвигатели отличаются высокой динамикой в сочетании с прецизионной точностью и высокими удельными характеристиками (отношением мощности и момента к массе двигателя). Их высокие динамические характеристики обусловлены большим крутящим моментом по отношению к моменту инерции ротора двигателя и значительной перегрузочной способностью по моменту, отношением максимального момента к номинальному. Это позволяет реализовать высокое быстродействие, разгон до номинальной частоты вращения за десятки миллисекунд и реверс с номинальной скорости в пределах одного оборота вала двигателя [1, 2, 3, 7].

Серводвигатель CMP80S работает в широком диапазоне скоростей, обеспечивает высокую плавность хода, низкие вибрации и шумы. Управление двигателем происходит с помощью преобразователя частоты (инвертора) Eurodrive MDX61B-0040-503. Основное назначение сервопреобразователя заключается в том, чтобы обеспечить условия, при которых момент на валу двигателя линейно зависит от сигнала управления на входе преобразователя. Поэтому важным является правильное согласование двигателя с преобразователем. Как бы ни были хороши по отдельности двигатель и преобразователь, качество их работы определяется степенью соответствия математического описания двигателя в преобразователе. Чтобы синхронный двигатель работал с максимальным моментом, устройство управления должно поддерживать электрический угол между векторами магнитной индукции статора и ротора равным 90°. Модули и направления этих векторов определяются значениями фазных токов статора и положением ротора относительно статора. Фазные токи можно рассчитать на основе известной математической модели двигателя, а положение ротора определить с помощью датчика. В преобразователе Eurodrive MDX61B-0040-503 есть возможность выбрать параметры, необходимые для оптимальной работы двигателя CMP80S (значения индуктивных и активных сопротивлений обмоток, число пар полюсов и др.). Геометрическое положение ротора определяется с помощью датчика абсолютного положения, связанного с ротором и однозначно

ориентированного относительно статора. Зная положение ротора относительно статора, преобразователь и рассчитывает требуемые фазные токи, обеспечивая максимальный момент двигателя. При этом следует отметить, что для хорошей работы контура регулирования момента не требуется высокой точности определения углового положения ротора, поэтому в качестве датчика используется резольвер.

Контур регулирования углового положения требует использования датчика с высоким разрешением, в противном случае возникнут проблемы с устойчивостью привода и точностью отработки требуемых траекторий. Поэтому здесь применяется инкрементальный энкодер типа ЛИР. Работу этого контура определяет контроллер движения NI PCI7342. Он участвует в формировании задания (генератор траектории) и сигнала управления (ПИД-регулятор), а также выполняет функции сравнивающего устройства.

Задание траектории (т. е. требуемого функционального закона изменения угла поворота ротора во времени) в виде набора данных (точек траектории) поступает извне от устройства управления верхнего уровня, в рассматриваемом случае от персонального компьютера. Получив задание в виде произвольного набора точек, генератор траектории дополняет этот набор промежуточными точками, интерполируя входные данные. Координаты точек от генератора траектории сравниваются с соответствующими сигналами от датчика обратной связи, а разностный сигнал (сигнал ошибки) поступает на вход ПИД-регулятора. Выходной управляющий сигнал с ПИД-регулятора подается на вход сервопреобразователя и далее на двигатель. Связь контроллера движения с сервопреобразователем должна обладать высоким быстродействием, чтобы минимизировать время реакции на сигнал ошибки.

В рассматриваемом приводе плата контроллера движения устанавливается в свободный слот шины ввода/вывода персонального компьютера. Ресурсы ПК используются для управления контроллером движения и обеспечения пользовательского интерфейса. Использование компьютера (в отличие от решения на базе специализированного программируемого логического контроллера) практически не требует дополнительных аппаратных затрат и кроме того, как правило, обладает большей гибкостью и функциональностью, что особенно важно при решении задач исследования привода.

Стенд работает под управлением специального программного обеспечения [9], которое реализует удобный пользовательский интерфейс и позволяет отрабатывать практически любые функциональные законы изменения линейных ускорений, например, гармонические, экспоненциальные, квадратичные, с постоянным и линейным градиентом, задаваемые в виде сплайнов, составные траектории из различных сопрягаемых участков и т. д. В таблице приведены данные по такой составной траектории, а на рис. 3 показан график ее отработки.

Таблица

Характеристики составной траектории

Номер сегм.	Тип траектории	a_{min}, м/с^2	a_{max}, м/с^2	k_{min}, м/с^3	k_{max}, м/с^3	ω_{min}, 1/с	ω_{max}, 1/с	ε_{min}, 1/с^2	ε_{max}, 1/с^2
1	Угловое ускорение	0	5	0	1	0	4,1	0	0,4
2	Сигмоид	5	25	0,03	3,0	4,1	9,1	0	9,6
3	Линейный	25	60	3,5	3,5	9,1	14,1	0,4	0,6
4	Параболи-ческий	60	110	0	10	14,1	19,1	0	1,2
5	Кубический сплайн	105	215	-11	20,5	18,7	26,8	-1,0	1,5
6	Экспонен-циальный	180	210	-30	0	24,5	26,5	-2,0	0
7	Гармонический	60	180	0	18,9	14,1	24,5	0	2,2
8	Квадратный корень	60	80	1	22,3	14,1	16,3	0,1	2,6

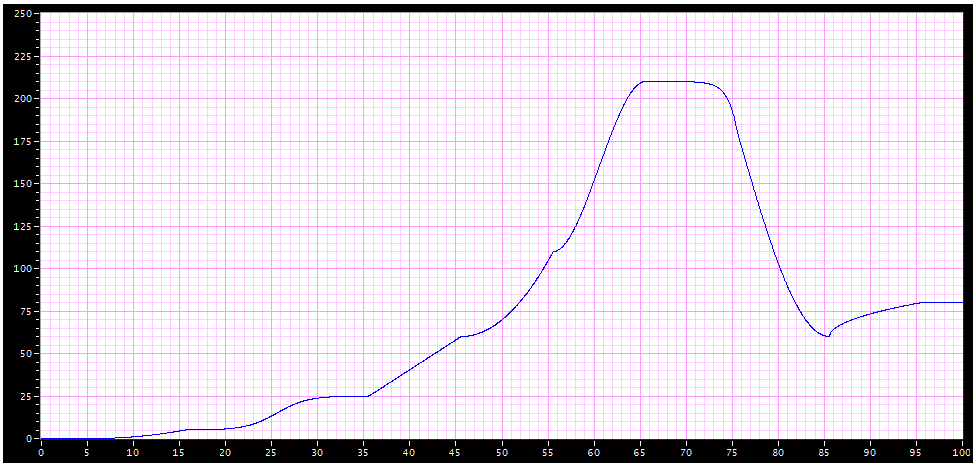


Рис. 3. Пример отработки воспроизводимой траектории

Стенд обеспечивает следующие характеристики:

– относительная погрешность воспроизведения постоянных угловых скоростей:

в диапазоне (0,01…0,1) – не более 0,0005,

в диапазоне (0,1…1) – не более 0,0001,

в диапазоне (1…100) – не более 0,00001,

– относительная погрешность воспроизведения постоянных линейных ускорений

в диапазоне (0…0,005) – не более 0,001,

в диапазоне (0,005…0,5) – не более 0,0002,

в диапазоне (0,5…1000) – не более 0,00002.

– относительная погрешность воспроизведения линейных ускорений, изменяющихся по функциональным законам

в диапазоне линейных ускорений (0,01…0,1) – не более 0,05,

в диапазоне линейных ускорений (0,1…1) – не более 0,01,

в диапазоне (1…1000) – не более 0,005.

Результаты проведенных испытаний подтвердили высокую точность и широкие диапазоны воспроизводимых параметров движения специального привода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич А.В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 200 с.
2. Борисевич А.В., Полищук М.Н. Теория автоматического управления. Практикум, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 125 с.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока /А.Б. Виноградов. ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».— Иваново, 2008. — 298 с. URL: http://www.vectorgroup.ru/files/doc/books/vinogradov_book.pdf.
4. Дьяченко В.А., Попов А.Н., Тимофеев А.Н. Градуировочные и испытательные стенды кафедры "Автоматы". Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2007. №52-1. С.73-78.
5. Исследование центробежных стендов для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка макета лабораторного стенда [Текст]: отчет о НИОКР (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2012. – 99 с. – Библиогр.: с. 95–96. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.
6. Исследование динамических и точностных характеристик центробежных стендов на макете стенда для испытания изделий в поле действия постоянных ускорений и ускорений, изменяющихся по различным функциональным законам, и разработка специального привода (заключительный): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук.

Попов А. Н.; исполн.: Попов А. Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 190 с. – Библиогр.: с. 146–147. – № ГР 01201370610. – Инв. № 143322301.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев.— Москва: Энергоатомиздат, 2001.— 560 с.: ил.— Библиогр.: с. 553.
8. А.В. Назаров, А.Н. Попов, Е.А. Чернова. Стенд для моделирования аэродинамических потерь в испытательных центрифугах. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 210-216.
9. С.В. Павлюченко, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец. Программное обеспечение для лабораторного испытательного стенда. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 217-226.
10. М.Н. Полищук, А.Н. Попов, И.Б. Челпанов, Е.А.Чернова. Аэродинамические потери в испытательных центрифугах. Современное машиностроение. Наука и образование. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2013. – С. 227-237.
11. Разработка технического проекта макета стенда для испытаний изделий в поле ускорений [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб. 2012. – 243 с. – Библиогр.: с. 170–175. – № ГР 01201270251. – Инв. № 140402202.
12. Создание макета лабораторного стенда со специальным приводом [Текст]: отчет о НИОКР (промежуточ.): / Санкт-Петербургский государственный технический университет; рук. Попов А.Н.; исполн.: Попов А.Н. [и др.]. – СПб., 2013. – 135 с. – Библиогр.: с. 72–74. – № ГР 01201370510. – Инв. № 143322301.
13. Центрифуга. Попов А.Н., Тимофеев А.Н., Чернова Е.А. Патент на полезную модель. RUS 127477 11.12.2012.

A.N. Popov, S.V. Pavluychenko, M.N. Polishchuck, A.N. Timofeev

SPECIAL DRIVE CENTRIFUGAL TESTING MASHINE

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article considers the construction and research of special high-precision drive of centrifugal testing machine. The machine is designed for testing of linear accelerations, varying in different functional laws. Experimental

studies performed in the laboratory, showed high accuracy and dynamic characteristics of a special drive.

Key words: research, special drive, centrifugal stand, linear acceleration, synchronous servo motor, accuracy, dynamics, arbitrary law of motion.

REFERENCES

[1] Borisevich A.V. Automatic Control Theory: an elementary introduction using MATLAB, St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2011. – 200 p.

[2] Borisevich A.V., Polishchuk M.N. Automatic Control Theory. Workshop, St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – 125 p.

[3] Vinogradov A.B. Vector control of electric AC drive / A.B. Vinogradov. Ivanovo State Power Universityof V.I. Lenin. – Ivanovo, 2008. – 298 p. (rus). URL: http://www.vectorgroup.ru /files/doc/books/vinogradov_book.pdf.

[4] Diachenko V.A., Popov A.N., Timofeev A.N. Calibration and test equipment designed at the Department of "Automatic machines". Scientific and Technical Statements SPBSTU. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press 2007. № 52-1. P. 73-78. (rus).

[5] Investigation of centrifugal test machines for products within the field of constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and development of the laboratory machine [Text]: report on R & D (final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] – St. Petersburg., 2012. – 99 p. – Bibliography.: P. 95-96. – № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).

[6] Investigation of dynamic and accuracy characteristics of centrifugal machine on the laboratory model for testing products in the field of action of the constant acceleration and accelerations, varying in different functional laws, and the development of a special drive (final) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] – St. Petersburg., 2013. – 190 p. - Bibliography: P. 146-147. – № GR 01201370610. – Inv. Number 143322301. (rus).

[7] Klyuchev V.I. Electric drive theory: Textbook for Universities / V.I. Klyuchev. – Moscow: Energoatomizdat, 2001. – 560 p.: Il. – Bibliography: 553 p. (rus).

[8] A.V. Nazarov, A.N. Popov, E.A. Chernova. Aerodynamic losses in test centrifuges simulating machine. Modern engineering. Science and

education. – St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. P. 217-226. (rus).
[9] S.V. Pavluchenko, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenets. Software for the laboratory test machine. Modern engineering. Science and education. – St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. – P. 227-236.
[10] M.N. Polishchuck, A.N. Popov, I.B. Chelpanov, E.A. Chernova. Aerodynamic losses in test centrifuges. Modern engineering. Science and education. - St. Petersburg.: Univ. Polytechnic. University Press, 2013. P. 217-226. (rus).
[11] Technical design of the laboratory simulating machine for testing in the field accelerations [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.]. – St. Petersburg, 2012. – 243 p. – Bibliography: P. 170-175. - № GR 01201270251. – Inv. Number 140402202. (rus).
[12] Creation of the laboratory simulating machine with a special drive [Text]: report on R & D (intermediate) / Saint-Petersburg State Polytechnical University; hands. Popov A.N.; executed. Popov A.N. [et al.] - St. Petersburg., 2013. – 135 p. – Bibliography: P. 72-74. – № GR 01201370510. – Inv. Number 143322301. (rus).
[13] Centrifuge. Popov A.N., Timofeev A.N., Chernova E.A. A utility model patent. RUS 127477 11.12.2012.

УДК 621.8-1/-9

А.В. Шайтанов

ЗАДАЧИ И ПУТИ СОЗДАНИЯ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ ПРИ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Антон Викторович Шайтанов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-96-86, E-mail: Shaitanovav.89@mail.ru

Аннотация

Формулируется задача построения пространственной шестистепенной (на основе управляемых гидроприводов) активной системы амортизации при условии сохранения точной угловой стабилизации объекта. На основе силового расчета получены требования к геометрии системы и к параметрам гидроцилиндров.

Ключевые слова: активная амортизация, виброзащита, механизм параллельной структуры, математическая модель, преобразование координат, динамика, собственные частоты, угловая стабилизация.

1. Постановка задачи

Рассматриваемая практическая задача ставится следующим образом. На корпусе вертолета, как носителе снаружи на кронштейне размещается опорно-поворотный механизм мобильного комплекса, массивного оптического устройства с системой самонаведения; в полете необходимо обеспечить сохранение оси оптической системы на заданную цель с высокой точностью при угловых и линейных перемещениях и колебаниях носителя в заданных диапазонах частот и амплитуд. Предварительные исследования показали, что пассивные системы амортизации в различных вариантах не могут обеспечить в заданных ограниченных габаритах одновременно высокую степень виброзащиты и точность угловой стабилизации. Поэтому необходима гидравлическая многостепенная активная стабилизация, работа которой обеспечивается бортовой гидравликой, имеющей достаточные запаси по мощности. Сложность задачи расчета и проектирования такой системы амортизации заключается в том, что амортизация должна быть многостепенной, а конструкция системы амортизации должна быть компактной.

2. Конструкция мобильного комплекса

Достаточно сложная металлоконструкция указанного опорно-поворотного устройства (рис. 1), обеспечивающая требуемую жесткость при наведении с вертолета на подвижную цель, подвергается воздействию перегрузок на мобильный комплекс при его движении, от действия сил веса и инерции, а также вибрационного воздействия основания, которым является элемент несущей конструкции корпуса вертолета. Эти воздействия приводят к угловым колебаниям, отклонениям реальной оси наведения от требуемой оси, что является одним из основных факторов риска потери объекта наблюдения.

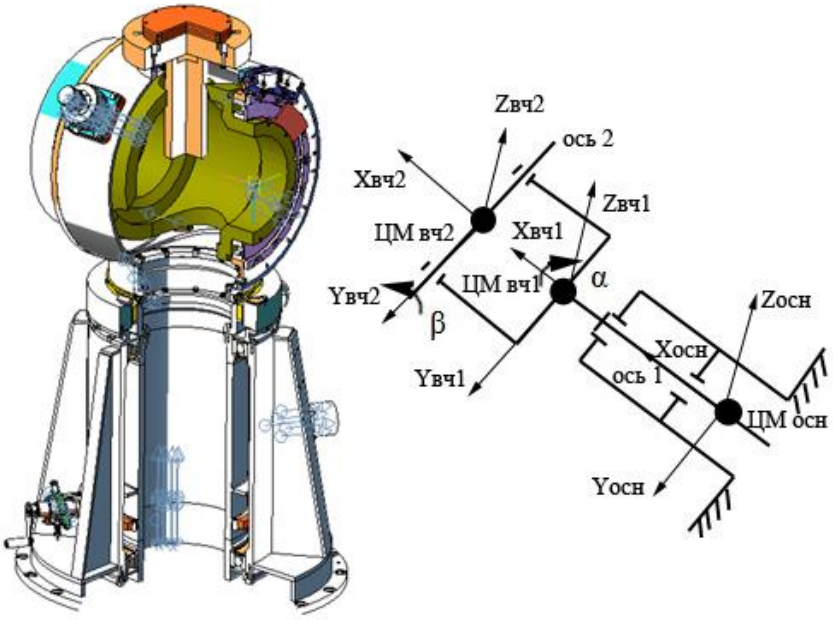


Рис. 1. Опорно-поворотное устройство без навесного оборудования в разрезе и его кинематическая схема

Опорно-поворотное устройство состоит из основания (осн) и двух вращающихся частей (вч1, вч2) и осуществляет наведение на подвижный объект по углам α и β.

В работе [13] автором были определены собственные частоты колебаний данного опорно-поворотного устройства, они имеют следующие значение: 19,396 Гц; 22,097 Гц; 42,061 Гц; 49,385 Гц; 132,568 Гц;143,167 Гц. Нужно отметить, что собственные частоты попадают в диапазон 10-60 Гц, для которого и нужно обеспечить виброзащиту.

Вне зависимости от типа виброзащитной системы к ней предъявляются следующие требования:

1. Обеспечение точности наведения (допустимые угловые отклонения реальной оси наведения не более 10 угловых секунд);
2. Габаритные требования (должна располагаться за вертикальной несущей стенкой носителя в имеющемся объеме);

3. Не должна требовать дополнительных источников энергии, кроме как уже имеющихся на борту вертолета.

Задачу стабилизации реальной оси наведения на цель и минимизации её углового отклонения от теоретической оси можно решать двумя способами:

4. Установка пассивной системы виброзащиты;
5. Установка активной системы виброзащиты.

Автором была проведена серия исследований различных схемных и конструктивных вариантов [12], в результате этих исследований было показано, что пассивная система неспособна удовлетворить поставленным требованиям. Перспективной может быть только активная система. Однако до ее проектирования необходимо предварительно провести серию научных исследований. Наиболее перспективной представляется система амортизации, построенная по схеме механизма параллельной структуры [8].

3. Схема механизма амортизации и геометрические соотношения

Рассмотрим активную систему виброзащиты для опорно-поворотного устройства, построенную по принципу гексапода (рис. 2). Данный механизм состоит из двух платформ, одна из них $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ является неподвижной и крепится к вертикальной несущей стене вертолета, платформа $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$ соединяется с платформой $A_1A_2A_3A_4A_5A_6$ с помощью шести поступательных кинематических пар, представляющих собой гидроцилиндры. Гидроцилиндры A_1B_1, A_2B_2,… A_6B_6 соединены с платформами трехподвижной сферической кинематической парой. Сферические шарниры, расположенные на неподвижной платформе обозначим как A_1, A_2,… A_6, а на подвижной платформе B_1,B_2,…,B_6 соответственно. Основные достоинства данной схемы заключаются в высокой жесткости конструкции, возможности программным образом выполнять перемещение верхней платформы по 6 степеням свободы и статической определимостью конструкции.

Прежде чем проводить динамический анализ механизма, нужно определить максимальные усилия, возникающие в данном механизме, при предельном случае нагружения конструкции – вертикальном маневре вертолёта в плоскости OY_AZ_A с перегрузкой 4g.

Для оценки максимальных усилий в гидроцилиндрах введем следующие допущения: все звенья механизма считаются абсолютно твердыми телами, все кинематические пары – реализациями стационарных удерживающих голономных связей, нагрузка прикладывается к подвижной платформе статически в виде векторов сил и моментов, конструкция рассматривается при фиксированной длине хода гидроцилиндров, весом поступательных кинематических пар пренебрегаем.

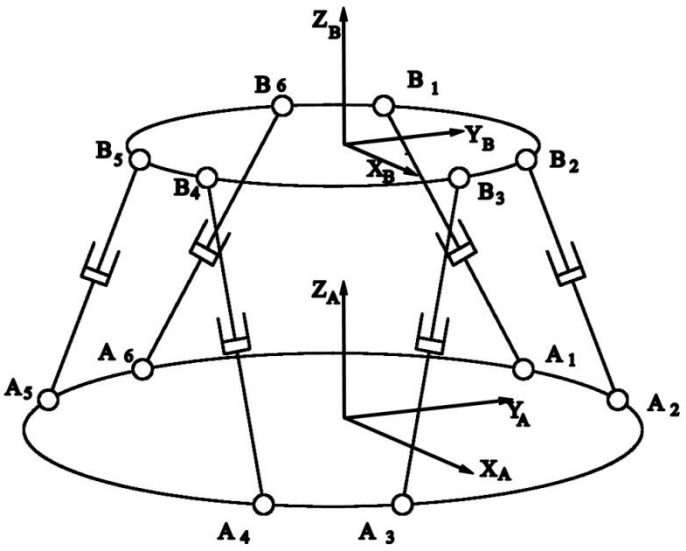


Рис. 2. Кинематическая схема активной виброзащиты

Положение шарниров A_1, A_2,…, A_6 в системе координат $X_AY_AZ_A$ будет определяться векторами $AI_i = \{x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}\}$, где i ϵ [1,6], а положение шарниров B_1, B_2,…, B_6 в системе координат $X_BY_BZ_B$ – векторами $BI_i = \{x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}\}$, где i ϵ [1,6]. Положение подвижной платформы в системе координат $X_AY_AZ_A$, связанной с неподвижной, определим с помощью вектора $AB = \{x_B, y_B, z_B\}$, соединяющего центры двух систем координат, и углов Эйлера – φ, ψ, θ.

Геометрические соотношения между системами координат $X_AY_AZ_A$ и $X_BY_BZ_B$ задаются в виде однородной матрицы преобразования:

$$\Gamma(\varphi,\psi,\theta,\Delta x,\Delta y,\Delta z) =$$

$$\begin{pmatrix} \cos\varphi\cdot\cos\psi-\cos\theta\cdot\sin\varphi\cdot\sin\psi & -\cos\theta\cdot\cos\psi\cdot\sin\varphi-\cos\varphi\cdot\sin\psi & \sin\varphi\cdot\sin\theta & \Delta x \\ \cos\psi\cdot\sin\varphi+\cos\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin\psi & \cos\theta\cdot\cos\varphi\cdot\cos\psi-\sin\varphi\cdot\sin\psi & -\cos\varphi\cdot\sin\theta & \Delta y \\ \sin\varphi\cdot\sin\theta & \cos\varphi\cdot\sin\theta & \cos\theta & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Положение шарниров B_1, B_2,…, B_6 в системе координат $X_AY_AZ_A$ будет определяться векторами:

$$BIn_i = \Gamma(\varphi,\psi,\theta,\Delta x,\Delta y,\Delta z)\cdot\begin{pmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \\ z_{Bi} \\ 1 \end{pmatrix},\ \text{где i ϵ [1,6].}$$

Длину поступательных пар определим как длину вектора:

$$L_i = \left|\vec{A_iB_i}\right| = \sqrt{(BIn_{i,1}-AI_{i,1})^2+(BIn_{i,2}-AI_{i,2})^2+(BIn_{i,3}-AI_{i,3})^2},\ \text{где i ϵ [1,6].}$$

Проекции усилий в гидроцилиндрах на оси системы координат $X_AY_AZ_A$ определяются по следующим зависимостям:

$$Fx_i = F_i \cdot \frac{BIn_{i,1} - AI_{i,1}}{L_i};$$

$$Fy_i = F_i \cdot \frac{BIn_{i,2} - AI_{i,2}}{L_i};$$

$$Fz_i = F_i \cdot \frac{BIn_{i,3} - AI_{i,3}}{L_i},$$

где i ϵ [1,6].

Составим систему из шести уравнений статики для определения усилий в гидроцилиндрах. Пусть FX, FY, FZ, MX, MY, MZ – проекции внешнего воздействия со стороны опорно-поворотного устройства, расположенного на вертолете, переведенные в систему координат $X_A Y_A Z_A$, связанную с неподвижным основанием, тогда данная система уравнений примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{6} Fx_i + FX = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{6} Fy_i + FY = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{6} Fz_i + FZ = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{6} Fy_i \cdot BIn_{i,3} + \sum_{i=1}^{6} Fz_i \cdot BIn_{i,2} + MX = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{6} Fx_i \cdot BIn_{i,3} + \sum_{i=1}^{6} Fz_i \cdot BIn_{i,1} + MY = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{6} Fy_i \cdot BIn_{i,1} + \sum_{i=1}^{6} Fx_i \cdot BIn_{i,2} + MZ = 0.$$

4. **Результаты расчетов активной системы амортизации**

На рис. 3 представлена активная система амортизации, удовлетворяющая приведенным выше требованиям.

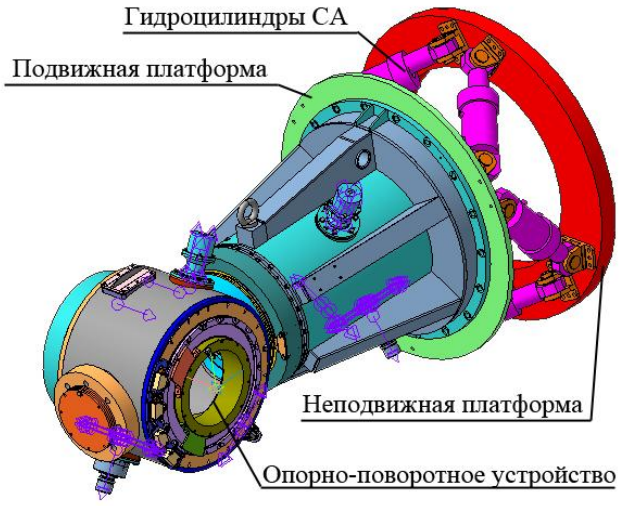


Рис. 3. Опорно-поворотное устройство с активной виброзащитой

Определим усилия, возникающие в гидроцилиндрах, по предложенной выше методике в начальном (нулевом) положении подвижной платформы, для которого:

$$\varphi = 0,\ \psi = 0,\ \theta = 0,\ \Delta x = 0 \text{ м},\ \Delta y = 0 \text{ м},\ \Delta z = 0 \text{ м}.$$

Координаты шарниров подвижной и неподвижной платформы, сведены в таблицу.

Таблица

		Координата шарнира		
		x, м	y, м	z, м
Обозначение шарнира	A_1	-0,104	0,626	0
	A_2	0,104	0,626	0
	A_3	0,594	-0,223	0
	A_4	0,490	-0,403	0
	A_5	-0,490	-0,403	0
	A_6	-0,594	-0,223	0
	B_1	-0,477	0,349	0,362
	B_2	0,477	0,349	0,362
	B_3	0,541	0,238	0,362
	B_4	0,064	-0,588	0,362
	B_5	-0,064	-0,588	0,362
	B_6	-0,541	0,238	0,362

Примем нагрузки на подвижную платформу следующим образом:

$$FX = 0;$$

$$FY = -M \cdot g \cdot n_y;$$

$$FZ = 0;$$

$$MX = FY \cdot Lg;$$

$$MY = 0;$$

$$MZ = 0,$$

где M = 4607 кг – масса опорно-поворотного устройства;
g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения;
$n_y = 4$ – максимальная вертикальная перегрузка;
Lg = 1,205 м – плечо центра тяжести.

Данная задача решалась в математическом пакете Wolfram Mathematica 8.0, и были получены следующие значения усилий в гидроцилиндрах:

$F_1 = 53$ кН; $F_2 = 53$ кН; $F_3 = 90$ кН; $F_4 = -143$ кН; $F_5 = -143$ кН; $F_6 = 90$ кН;

Для наглядности направления данных векторов представлены на 3D графике на рис. 4.

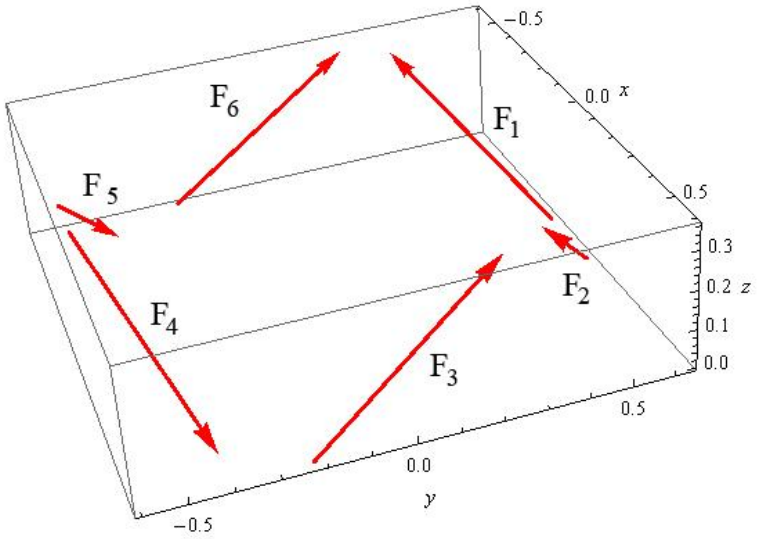


Рис. 4. Направления усилий в гидроцилиндрах активной СА

Полученные результаты могут быть использованы для проверки правильности выбора гидроцилиндров и оценки минимального усилия, развиваемого гидроцилиндром, необходимого для удержания опорно-поворотного устройства при вертикальном маневре вертолета. В дальнейшем планируется произвести динамический анализ активной виброзащитной системы. Необходимо отметить, что все результаты, полученные расчетным путем, нуждаются в экспериментальной проверке, для этого на базе ОАО «КБСМ» был создан макет опорно-поворотного устройства.

Выводы

Многостепенную систему амортизации целесообразно строить по схеме платформы Стюарта на основе гидроцилиндров. Выполненные силовые расчеты предварительно проработанного конструктивного варианта показывают, что имеются возможности создания многостепенной системы амортизации, удовлетворяющей всем сформулированным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.И. Артоболевский. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. М.З. Коловский. Нелинейная теория виброзащитных систем. М.: Наука, 1966. – 320 с.
3. Вибрации в технике. Защита от вибрации и ударов / В.К. Асташев [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – Т.6. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
4. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1975. – 288с.
5. Разработка управляющих программ промышленных роботов: Учеб. Пособие / А.С. Климчик [и др.]; под ред. Р.И. Гомолицкого – Минск.: Изд-во Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 2008. – 131 с.

6. H. Marth, B. Lula. Novel ceramic actuator for hexapod applications provides long-travel, high force with picometer resolution for active optical alignment in astronomy // Physik Instrumente. 2006. URL: http://www.hexapods.net/pdf/Hexapod_In_Astronomy_Paper.pdf (20.03.2014).
7. Х.М. Альван, А.В. Слоущ. Декомпозищия задачи силового анализа многоподвижного механизма параллельной структуры // Теория механизмов и машин. – 2005. – Т.3. – №1. – С. 35-39.
8. Х.М. Альван, А.В. Слоущ. Об управлении движением пространственной платформы с несколькими степенями подвижности // Теория механизмов и машин. – 2003. – №1. – С. 63-69.
9. В.С. Гендель, А.В. Слоущ. Силовой анализ платформы Стюарта с учетом неидеальности связей // Теория механизмов и машин. – 2005. – Т.3. – №2. – С. 59-66.
10. Е.А. Сапунов, И.А. Прошин. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т.13. – №1(2). – С. 337-340.
11. В.А. Смирнов, В.Б. Федоров. Использование кватернионов при математическом моделировании механизмов с параллельными кинематическими цепями // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – №10. – С. 24-29.
12. А.В. Шайтанов. Виброзащита опорно-поворотного устройства, расположенного на летательном аппарате // ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ. – 2012. – №3(6) – С. 110-111.
13. Андронников Г.Е., Шайтанов А.В. Методика определения углового отклонения опорно-поворотного устройства, обусловленного деформативностью его металлоконструкции // Материалы Международной конференции «Восьмые Окуневские чтения». – СПб, Изд-во БГТУ, 2013. – С. 50-52.

A.V. Shaitanov

OBJECTIVES AND THE WAYS OF DESIGNING A DYNAMIC SHOCK-ABSORPTION SYSTEM FOR ANGULAR STABILIZATION OF AIRBORNE MACHINE

Abstract

A task of designing a spatial six degrees-of-freedom dynamic shock absorbing system (using controlled hydraulic actuators) ensuring accurate angular stabilization of the piece is stated. System geometry and hydraulic cylinder requirements were developed based on force design.

Key words: dynamic shock absorption, vibration protection, parallel-kinematics mechanism, mathematical model, coordinates transformation, dynamics, natural frequencies, angular stabilization.

REFERENCES

[1] I.I. Artobolevskij. Teorija mehanizmov i mashin. M.: Nauka, 1988. – 640 p. (rus.)

[2] M.Z. Kolovskij. Nelinejnaja teorija vibrozashhitnyh sistem. M.: Nauka, 1966. – 320 p. (rus.)

[3] Vibracii v tehnike. Zashhita ot vibracii i udarov / V.K. Astashev [i dr.]; pod red. K.V. Frolova. – Vol.6. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 456 p. (rus.)

[4] Leshhenko V.A. Gidravlicheskie sledjashhie privody stankov s programmnym upravleniem. M.: Mashinostroenie, 1975. – 288p. (rus.)

[5] Razrabotka upravljajushhih programm promyshlennyh robotov: Ucheb. Posobie / A.S. Klimchik [i dr.]; pod red. R.I. Gomolickogo – Minsk.: Izd-vo Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radiojelektroniki, 2008. – 131 p. (rus.)

[6] H. Marth, B. Lula. Novel ceramic actuator for hexapod applications provides long-travel, high force with picometer resolution for active optical alignment in astronomy // Physik Instrumente. 2006. URL: http://www.hexapods.net/pdf/Hexapod_In_Astronomy_Paper.pdf (20.03.2014).

[7] H.M. Al'van, A.V. Sloushh. Dekompozishhija zadachi silovogo analiza mnogopodvizhnogo mehanizma parallel'noj struktury // Teorija mehanizmov i mashin. – 2005. – Vol.3. – N1. – P. 35-39. (rus.)

[8] H.M. Al'van, A.V. Sloushh. Ob upravlenii dvizheniem prostranstvennoj platformy s neskol'kimi stepenjami podvizhnosti // Teorija mehanizmov i mashin. – 2003. – N1. – P. 63-69. (rus.)

[9] V.S. Gendel', A.V. Sloushh. Silovoj analiz platformy Stjuarta s uchetom neideal'nosti svjazej // Teorija mehanizmov i mashin. – 2005. – Vol.3. – N2. – P. 59-66. (rus.)

[10] E.A. Sapunov, I.A. Proshin. Modelirovanie privoda dinamicheskogo stenda aviacionnogo trenazhera // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2011. – Vol.13. – N1(2). – P. 337-340. (rus.)

[11] V.A. Smirnov, V.B. Fedorov. Ispol'zovanie kvaternionov pri matematicheskom modelirovanii mehanizmov s parallel'nymi kinematicheskimi cepjami // Vestnik JuUrGU. – 2008. – N10. – P. 24-29. (rus.)

[12] A.V. Shaitanov. Vibrozashhita oporno-povorotnogo ustrojstva, raspolozhennogo na letatel'nom apparate // VOENMEH. Vestnik BGTU. – 2012. – N3(6) – P. 110-111. (rus.)

[13] Andronnikov G.E., Shaitanov A.V. Metodika opredelenija uglovogo otklonenija oporno-povorotnogo ustrojstva, obuslovlennogo deformativnost'ju ego metallokonstrukcii // Materialy Mezhdunarodnoj konferencii «Vos'mye Okunevskie chtenija». – SPb, Izd-vo BGTU, 2013. – P. 50-52. (rus.)

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.762

А.М. Зайцев, П.А. Кузнецов, М.А. Кузнецова

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ РАДИАЛЬНО-ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Александр Михайлович Зайцев, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (950) 036 73 99, E-mail: amkomi@mail.ru

Павел Алексеевич Кузнецов, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (911) 915 6753, E-mail: pa-kuznetsov@mail.ru

Маргарита Андреевна Кузнецова, дипломник
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (904) 639 12 70, E-mail: margaritik7@rambler.ru

Аннотация

В работе проведен анализ технологических возможностей нового процесса комбинированной радиально-торцевой раскатки при изготовлении осесимметричных деталей из спеченных материалов. Анализ показал, что применение комбинированного процесса, т.е. совместного воздействия на раскатываемую заготовку валка, действующего в осевом направлении и ролика, воздействующего в радиальном направлении, значительно расширяет технологические возможности изготовления осесимметричных деталей из малопластичных, в том числе спеченных материалов.

Ключевые слова: холодная торцевая раскатка, спеченные материалы, локальная пластическая деформация, комбинированная раскатка.

Методы локальной ротационной обработки значительно расширяют область применения процессов холодного объемного деформирования, т.к. локальных характер приложения нагрузки приводит к снижению, как

общего усилия деформирования, так и контактных напряжений действующих на инструмент [1,2,3,4]. Процессы локальной деформации являются также перспективными для изготовления изделий из спеченных материалов с точностью 9..12 квалитета и шероховатостью поверхности, порядка R_a=2.5..1.25 мкм [5]. Среди процессов локальной деформации выделяется процесс торцевой раскатки, заключающийся в силовом воздействии валка на торцевую часть заготовки, помещенную во вращающуюся матрицу. Однако металлические спеченные материалы из-за остаточной пористости в ряде случаев не обладают достаточной пластичностью, необходимой для изготовления изделий сложной формы. При деформации малопластичных, например спеченных материалов, необходимо использовать технологические схемы, создающие всестороннее неравномерное сжатие [4,5].

Существующее оборудование для холодной торцевой раскатки предназначено для изготовления осесимметричных деталей одним вращающимся инструментом – валком, перемещаемым в процессе деформации в осевом направлении [6]. Для создания схемы всестороннего неравномерного сжатия требуется использование дополнительного инструмента – ролика, имеющего возможность перемещения в радиальном направлении под действием силового гидроцилиндра.

Анализ возможных вариантов кинематики перемещений валка и ролика показывает, что возможны следующие схемы комбинированного воздействия формообразующих инструментов на деформируемую заготовку:

- осевое движение валка (Soc)
- осевое и радиальное движение валка (Soc, Spад)
- радиальное перемещение ролика (Spад)
- радиальное и осевое перемещение ролика (Spад, Soc)

Наибольший интерес представляют нижеуказанные комбинированные процессы раскатки.

Принципиальная схема комбинированного процесса раскатки с осевым движением валка и с радиальным и осевым движением ролика показана на рис. 1.

Процесс комбинированной раскатки с осевым движением валка и с радиальным и осевым движением ролика осуществляют следующим образом. В матрицу 2 устанавливают заготовку 1, к ее торцу подводят раскатной валок 4, а к боковой поверхности выставленной части заготовки 1 подводят ролик 5. Затем приводят во вращение шпиндель и осуществляют подачу раскатного валка 4. При этом начинается процесс ротационной высадки заготовки 1 и формообразование бурта. Одновременно ролик 5 начинает воздействовать усилием P2 на образующую часть бурта заготовки, таким образом деформацию материала заготовки осуществляют суммарным воздействием раскатного валка 4 и

ролика 5. Под действием осевого усилия Р1 от раскатного валка 4 происходит синхронное перемещение ролика 5 с роликодержателем и подпружиненной матрицы 2 в осевом направлении. При достижении необходимых величины бурта процесс останавливают, раскатной валок 4 возвращают в исходное положение, готовое изделие извлекают выталкивателем 3 из матрицы.

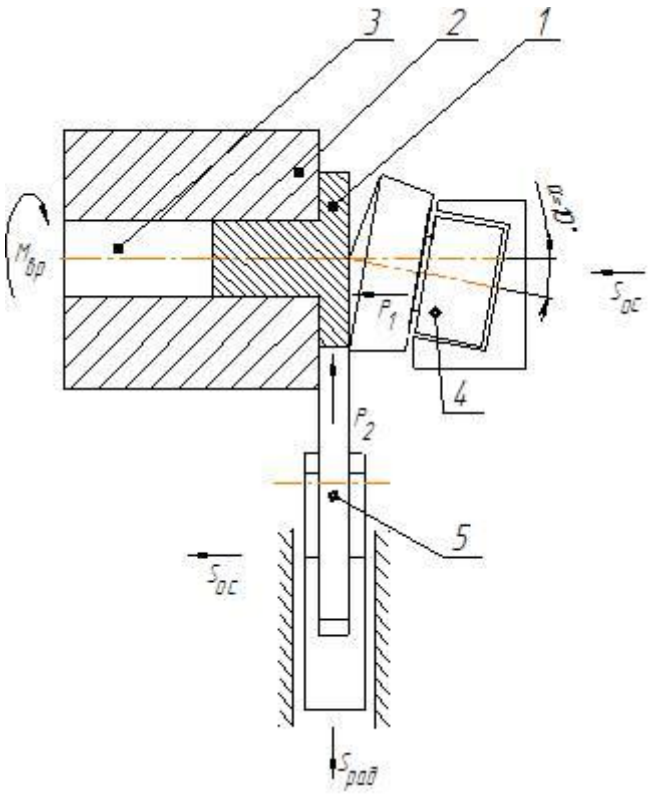


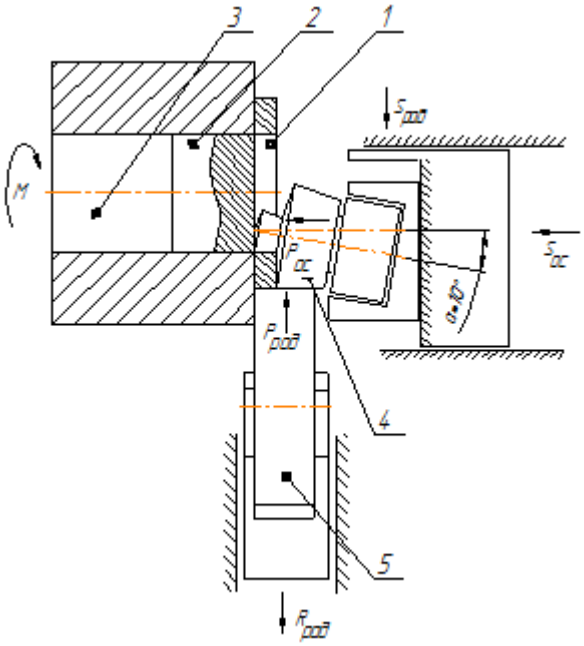
Рис. 1. Принципиальная схема комбинированного процесса раскатки с осевым движением валка и с радиальным и осевым движением ролика
1–заготовка, 2–матрица, 3–выталкиватель, 4–валок, 5 – ролик

Более широкими возможностями обладает процесс раскатки с осевым и радиальным движением валка и одновременным радиальным движением ролика – комбинированная радиально-торцевая раскатка (КРТР). Возможные варианты такого процесса комбинированной раскатки, иллюстрируются принципиальными схемами, показанными на рис. 2. По приведенным схемам раскатки можно изготавливать осесимметричные детали типа фланцев, втулок или стержней с буртами, ступенчатых втулок и стаканов, шайб, колец и др.

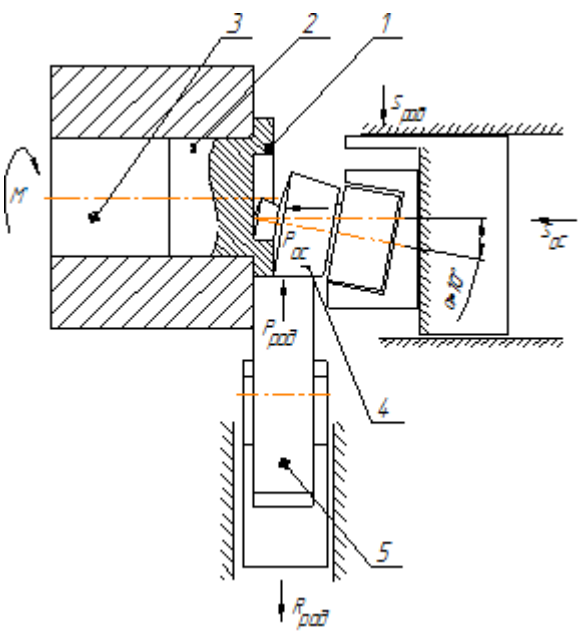
Особенностью раскатки деталей типа шайба (рис. 2, а) является геометрическая форма валка 4 и характер его движения на окончательном этапе формообразования детали, заключающийся в отделении шайбы от стержневой части заготовки при радиальном движении валка.

При изготовлении деталей типа ступенчатая втулка (рис. 2, б) процесс формообразования заготовки происходит аналогично предыдущему варианту, но отделение ступенчатой части детали не происходит. Форма втулки определяется взаимным расположением ролика 5 и валка 4.

а.



б.



в.

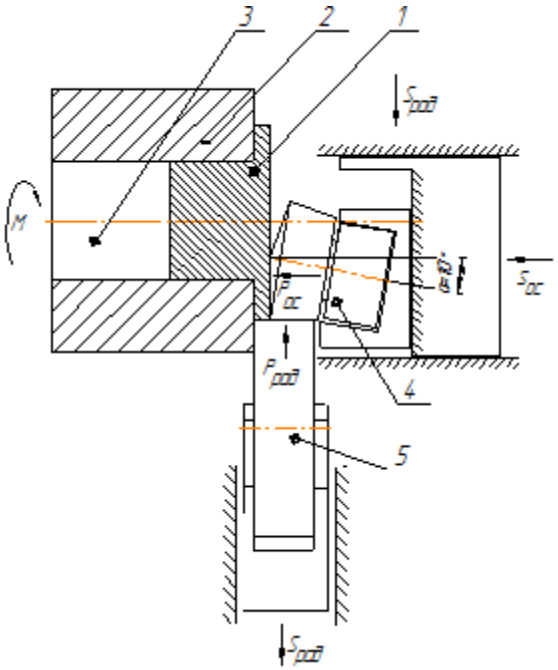


Рис. 2. Принципиальные схемы процессов комбинированной радиально-торцевой раскатки с радиальным и осевым движением валка и радиальным движения ролика:
а - раскатка деталей типа шайба; б – раскатка деталей типа ступенчатая втулка; в - раскатка детали типа стержень (или втулка) с фланцем:
1- заготовка, 2- матрица, 3- выталкиватель, 4- валок, 5- ролик

При изготовлении деталей типа стержень (втулка) с фланцем процесс формообразования определяется созданием схемы всестороннего неравномерного сжатия в зоне совместного воздействия валка и ролика, что позволяет получать фланцы большого диаметра. Пример: комбинированная раскатка втулки с буртом из порошка на основе железа РМ225Н (хим.состав: медь – 2%, никель - 2%, углерод – 0,5%, остальное – железо) со следующими параметрами:

относительная плотность бурта – 0,96; размеры раскатываемого изделия: диаметр бурта раскатанного изделия 70мм, высота бурта - 10мм, высота втулочной части раскатанного изделия – 36мм, диаметр внутреннего отверстия – 30мм, диаметр втулочной части изделия – 48,3мм. Для изготовления указанной детали была использована заготовка в виде спеченной втулки со следующими размерами: наружный диаметр - 48,3мм, внутренний диаметр – 30мм; высота заготовки – 70мм, средняя относительная плотность – 0,80.

При раскатки изделия с буртом методом комбинированной раскатки, путем совместного силового воздействия валка и ролика в осевом и радиальном направлениях, было получено изделие без брака с размерами близкими к размерам по чертежу. Отношение полученного диаметра бурта к диаметру втулочной части изделия составило 1,42 – 1,45. При этом средняя относительная плотность бурта составила 0,96-0,97, а относительная плотность втулочной части – 0,84-0,85. Результат исследования показал, что размер ступени при комбинированной раскатке на 12-14% больше, чем при обычной торцевой раскатке без радиального подпора.

Аналогичные исследования формообразования буртов на образующей части трубчатых изделий при раскатке компактных материалов показали возможности расширения номенклатуры получаемых деталей, так при раскатке втулок с фланцем соотношение диаметра фланца и втулочной части детали можно увеличить с 1,1 ÷ 1,4 до 1,5…2,0. При этом можно существенно снизить затраты на обработку заготовки под деформирование и улучшить механические свойства фланцев цилиндрических заготовок [7,8]. Анализ структурного состояния аналогичных деталей с раскатанным фланцем показал, что разработанная технология улучшила механические свойства изделия за счет сформированной при локальной обработке текстуры материала [9].

Благоприятный характер деформации по схеме всестороннего неравномерного сжатия подтверждается исследованием распределения плотности по сечению раскатанного бурта. На рис. 3 представлено распределение относительной плотности по сечениям буртов.

На основании проведенных исследований и расчетов предложен проект установки для комбинированной радиально - торцевой раскатки, принципиальная схема которой представлена на рис. 4. [10]. Раскатку осуществляют по схеме, представленной на рис.3в. Заготовку 1 устанавливают перед раскаткой в матрице 2 и фиксируют в осевом направлении требуемую для деформации изделия выставленную из матрицы часть заготовки с помощью выталкивателя 3. К торцу выставленной части заготовки 1 подводят валок 4, а к выставленной части заготовки 1 подводят ролик 5 до касания его рабочей поверхностью всей боковой поверхности выставленной части заготовки. При этом ролик

касается также своей рабочей поверхностью части боковой поверхности валка 4. Матрицу 2 с заготовкой 1 при помощи шпинделя (на схеме не обозначен) приводят во вращение требуемым моментом М и осуществляют осевую подачу $S_{ос}$ валка. При этом начинается процесс ротационной высадки заготовки 1 и формообразование утолщения на выставленной части заготовки. Ролик 5 осуществляет в этот момент радиальный подпор $P_{рад}$ всей выставленной части и создает в локальной зоне деформации радиальные сжимающие напряжения, которые накладываются на напряжения $P_{ос}$, вызываемые действием валка.

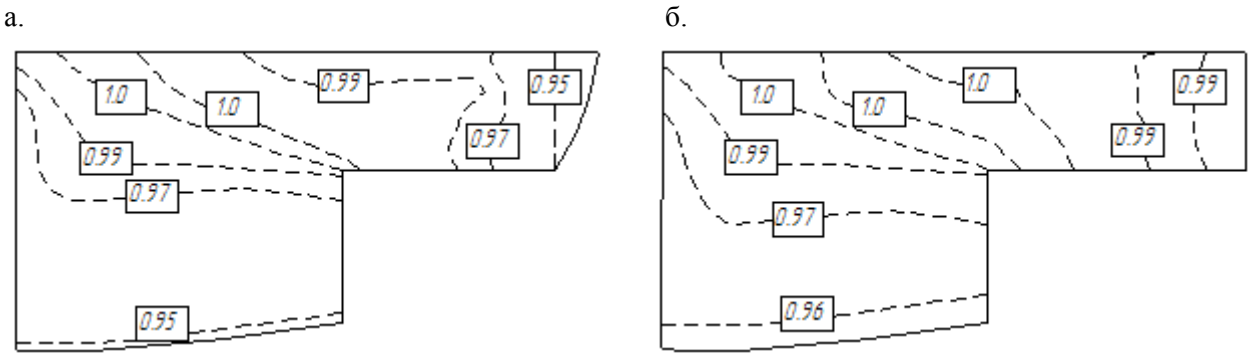


Рис. 3. Распределение относительной плотности по сечению бурта:
а – торцевая раскатка; б – радиально-торцевая раскатка

Совместное воздействие валка и ролика приводит к образованию в указанной общей зоне напряженного и деформированного состояния всестороннего неравномерного сжатия, благоприятного для деформации всех материалов и, особенно, малопластичных. С целью сохранения указанного состояния в процессе всего процесса раскатки и формообразования качественного изделия валок 4 подают дополнительно в радиальном направлении Sрад синхронно с радиальной подачей Rрад ролика 5. При этом усилие радиального подпора с помощью управляемого силового гидроцилиндра сохраняется на нужном уровне, необходимом для компенсации растягивающих напряжений на образующей получаемого утолщения раскатываемой заготовки. При достижении необходимой величины утолщения процесс останавливают, валок 5 возвращают в исходное положение, готовое изделие извлекают из матрицы при помощи выталкивателя 3.

Применение ротационных процессов объемного деформирования пористых заготовок позволяет расширить возможности холодной объемной штамповки спеченных порошковых материалов, прежде всего за счет снижения удельных усилий и повышения стойкости штамповой оснастки. Локальный характер приложения комбинированных деформирующих усилий и значительные сдвиговые деформации, связанные с течением материала по торцу матрицы, создают возможность

получения практически беспористых осесимметричных деталей широкой номенклатуры с развитыми сложнопрофильными элементами у одного из торцов заготовки, а также возможность получения деталей с широкими фланцами.

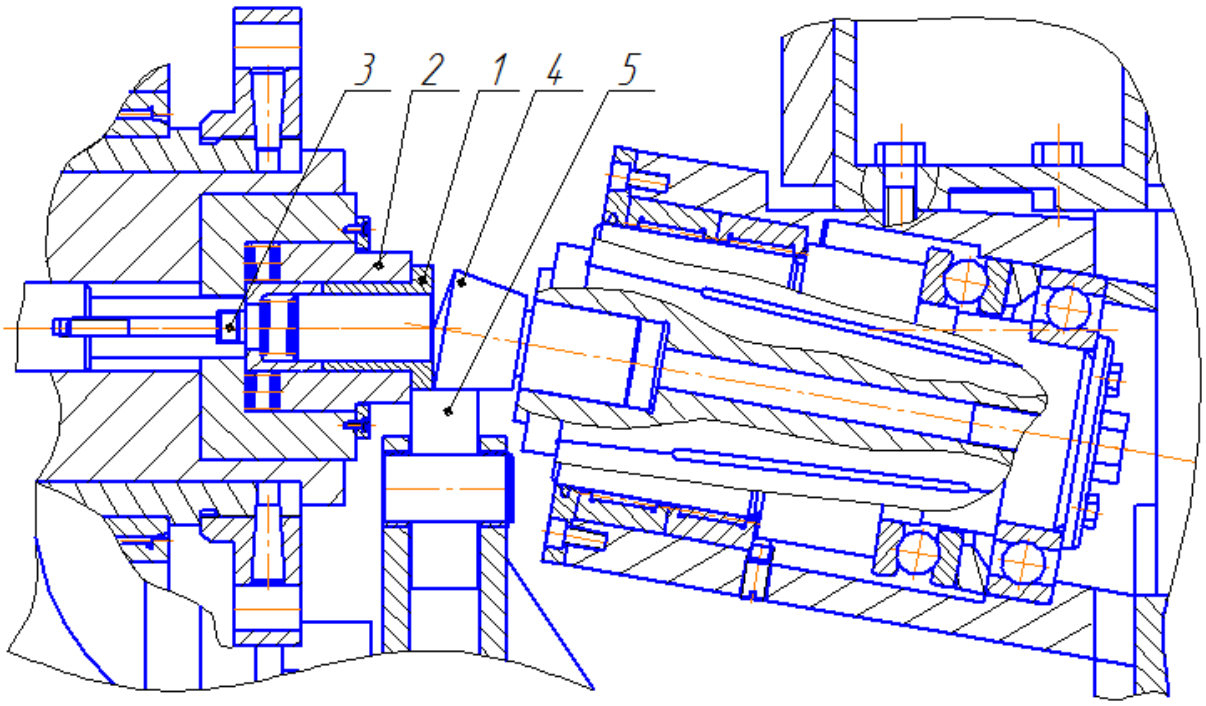


Рис. 4. Принципиальная схема установки для КРТР

Совместное воздействие валка и ролика приводит к образованию в указанной общей зоне напряженного и деформированного состояния всестороннего неравномерного сжатия, благоприятного для деформации всех материалов и, особенно, малопластичных, например, спеченных.

Технология комбинированной холодной радиально-торцевой раскатки может обеспечить высокие экономические и технологические показатели процесса, а именно: высокую производительность и стойкость инструмента, лучшее качество поверхности и структуры материала деталей, высокий коэффициент использования металла, сравнительную простоту механизации и автоматизации в сравнении с альтернативными методами [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экономичные методы формообразования деталей./Под. Ред. К.Н. Богоявленского, В.В. Риса. – Л.: Лениздат, 1984.- 144 с., ил.
2. Голенков В.А., Радченко С.Ю.. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. М.: Машиностроение, 1997, 226 с.: ил.

3. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / Голенков В.А., Дмитриев А.М. и др. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
4. А.с №867490 СССР, Способ изготовления осесимметричных деталей// Б.И. №36, 1981.
5. Исследование процесса холодной торцовой раскатки пористых кольцевых заготовок. К.Н. Богоявленский, Н.М. Елкин и др.Порошковые, композиционные и текстурованные материалы. Сборник научных трудов. Труды ЛПИ №417. Л.: 1986. с 39-42.
6. Мансуров И.З., Подрабинник И.М. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штамповочного производства: Справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 344 с.
7. П.В. Кононов, В.Н. Востров. Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок // Современное машиностроение наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / Под.ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.– С. 391-396 .
8. С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов. Технология изготовления раскаткой осесимметричных деталей с фланцем // Современное машиностроение наука и образование: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции / – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.– С. 856-866.
9. П.В. Кононов, В.Н. Востров. Анализ текстуры заготовок с раскатанным фланцем методом дифракции рентгеновских лучей // Современное машиностроение наука и образование: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции / – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.– С. 852-857.
10. Патент №123699, Российская Федерация, МПК B21H1/00.
11. Зайцев А.М, Кузнецов П.А. Разработка принципиальной схемы установки для комбинированной радиально-торцевой раскатки спеченных изделий. XLII Неделя науки СПбГПУ : материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. IV. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 г.

A.M. Zaitsev, P.A. Kuznetsov, M.A. Kuznetsova

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF REDIAL-BUTT ROLLING-OFF PROCESS FOR AXISYMMENTRIC ITEMS PRODUCTION MADE FROM SINTERED MATERIALS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

This article describes an analysis of new combined type technological capabilities of redial-butt rolling-off process for axisymmetric items production made from sintered materials. Analysis of redial-butt rolling-off process reveals significant increase technological capabilities of production items with low plasticity.

Key words: technology, redial-butt rolling-off process, sintered materials

REFERENCES

[1] Ekonomichnyye metody formoobrazovaniya detaley./Pod. Red. K.N. Bogoyavlenskogo, V.V. Risa. – L.: Lenizdat, 1984.- 144 p., il.(rus.)
[2] Golenkov V.A., Radchenko S.Yu..Tekhnologicheskiye protsessy obrabotki metallov davleniyem s lokalnym nagruzheniyem zagotovki. M.: Mashinostroyeniye, 1997, 226 p.: il.(rus.)
[3] Spetsialnyye tekhnologicheskiye protsessy i oborudovaniye obrabotki davleniyem / Golenkov V.A., Dmitriyev A.M. i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 464 p. (rus.)
[4] A.s №867490 SSSR, Sposob izgotovleniya osesimmetrichnykh detaley// B.I. №36, 1981.(rus.)
[5] Issledovaniye protsessa kholodnoy tortsovoy raskatki poristykh koltsevykh zagotovok. K.N. Bogoyavlenskiy, N.M. Yelkin i dr. Poroshkovyye, kompozitsionnyye i teksturovannyye materialy. Sbornik nauchnykh trudov. Trudy LPI №417. L.: 1986.- 39-42 p.(rus.)
[6] Mansurov I.Z., Podrabinnik I.M. Spetsialnyye kuznechno-pressovyye mashiny i avtomatizirovannyye kompleksy kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva: Spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 344 p.(rus.)
[7] P.V. Kononov, V.N. Vostrov. Formoobrazovaniye flantsev deformirovaniyem obrazuyushchey chaste trubchatykh zagotovok // Sovremennoye mashinostroyeniye, nauka i obrazovaniye: Materialy 2-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Pod.red. M.M.Radkevicha i A.N.Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012.– 391-396 p. (rus.)
[8] S.N. Kunkin, L.B. Aksenov. Tekhnologiya izgotovleniya raskatkoy osesimmetrichnykh detaley s flantsem // Sovremennoye mashinostroyeniye, nauka i obrazovaniye: Materialy 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii/ –SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013.– 856-866 p. (rus.)
[9] P.V. Kononov, V.N. Vostrov. Analiz tekstury zagotovok s raskatannym flantsem metodom difraktsii rentgenovskikh luchey // Sovremennoyemashinostroyeniyenauka i obrazovaniye: Materialy 3-y

Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii/ –SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013.– 852-857p.(rus.)
[10] Patent №123699, Rossiyskaya Federatsiya, MPK V21N1/00.(rus.)
[11] Zaytsev A.M, Kuznetsov P.A. Razrabotka printsipialnoy skhemy ustanovki dlya kombinirovannoy radialno-tortsevoy raskatki spechennykh izdeliy. XLII Nedelya nauki SPbGPU :materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Ch. IV. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013.(rus.)

УДК 621.77.04

П. В. Кононов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Павел Васильевич Кононов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (+7)952-398-05-84, E-mail: KPV710@Rambler.ru

Аннотация

Исследовали морфологию поверхности сечения пластически деформированной детали с применением атомно-силовой микроскопии. Рассчитаны значения величин размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам. Проведен фрактальный анализа поверхностей структур с использованием атомно-силовой микроскопии.

Ключевые слова: деталь с фланцем, латунь, атомно-силовая микроскопия, фрактальный анализ, пластическая деформация

Практически ни одно строительство промышленного типа не обходится без применения деталей с фланцев, главной задачей которых является обеспечение герметичного соединения отдельных узлов, агрегатов, сосудов и аппаратов, в трубопроводах, у вращающихся деталях и прочее. Детали с фланцами, значительно удаленными от торца [1, 2], находят широкое применение в машиностроении, высокие темпы развития отраслей которого требуют дальнейшего совершенствования технологии и, следовательно, создания новых методов диагностики особенностей формообразования созданных деталей. Технологические возможности процессов ограничиваются явлениями разрушения материалов и потерей устойчивости, проявляющейся в искривлении и складкообразовании деформируемой части детали. В связи с этим актуальна разработка методов диагностики напряженных состояний, оценка деформируемости материала заготовок, разработка рекомендаций по назначению технологических режимов, созданию новых схем, исключающих брак от разрушения и складкообразования заготовок и расширяющих технологические возможности процесса.

Для получения информации о распределении рельефа поверхности в настоящее время используются различные способы, в частности

сканирующая зондовая микроскопия, растровая электронная микроскопия и оптическая микроскопия. Применение методов сканирующей зондовой мирокроскопии [3, 4] позволяет анализировать морфологию и локальные свойства поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением. Поэтому исследование морфологии поверхности сечения пластически деформированных образцов в работе проводили с применением «полуконтактной» колебательной методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью нанолаборатории Ntegra Terma.

В работе деталь была получена с помощью технологии угловой раскатки фланцев трубчатых заготовок [5-8]. При этом деформирование заготовки осуществляли при поступательном перемещении инструмента и синхронном вращении заготовки и инструмента за счет контактного трения между поверхностями инструмента и заготовки. Процесс выполняли деформирующим роликом, установленным с возможностью вращения и поворота относительно оси заготовки. Детали с фланцами были созданы из латуни.

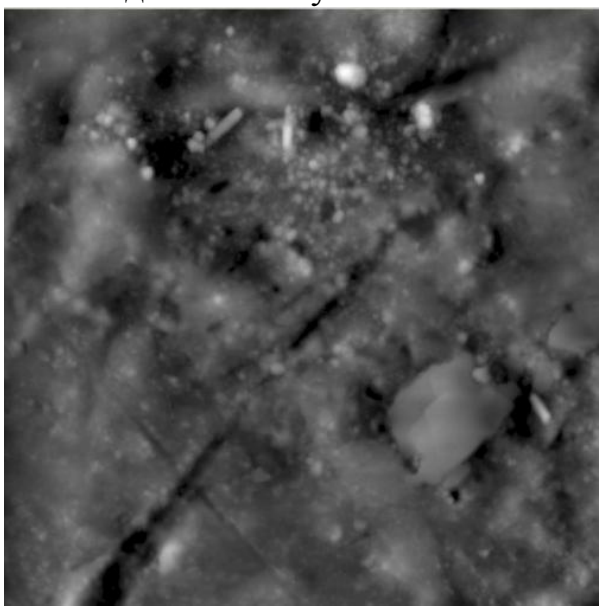


Рис. 1

Анализировали пять областей: 1 и 2 – область фланца; 3 и 4 – раскатанная область детали; 5 – нераскатанная область детали. Для диагностики использовали зондовые датчики с кантилевером в виде балки прямоугольного сечения серий NSG 01 компании NT-MDT (Зеленоград) с резонансными частотами 150 кГц кГц. АСМ-кадры представляли собой квадратные матрицы, имеющие размер 256 на 256 элементов. В качестве иллюстрирующего примера на рис. 1 представлено АСМ-изображение области 1 (размер изображения 20 мкм х 20 мкм).

Анализировали средние профили вдоль оси абсцисс изображений размером 3 мкм х 3 мкм, 7 мкм х 7 мкм, 10 мкм х 10 мкм, 12 мкм х 12 мкм, 20 мкм х 20 мкм, 40 мкм х 40 мкм.

Были построены гистограммы плотности распределения значений функции Z, на которых по оси абсцисс откладываются значения функции Z, с определенным шагом, а по оси ординат – количество точек N, значения которых лежат в заданном интервале по функции Z.

В таблице приведены результаты анализа гистограмм плотности распределения значений функции Z АСМ-изображений (размер

изображения 20 мкм х 20 мкм), где Sy –величина размаха высот, Sz – параметр, выражающий шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам.

Чтобы косвенно охарактеризовать поверхность образцов в работе анализировали результаты фрактального анализа поверхностей структур [9, 10] с использованием атомно-силовой микроскопии с помощью программы Gwyddion. Для расчета использовали метод подсчета кубов, метод триангуляции и метод спектра мощности.

Таблица

Область	Анализируемая величина				
	Статистические параметры		Значения рассчитанной фрактальной размерности		
	Sy, нм	Sz, нм	Метод триангуляции	Метод подсчета кубов	Метод спектра мощности
1	413,967	210,384	2,31	2,39	2,51
2	445,211	219,952	2,29	2,36	2,38
3	544,404	277,927	2,27	2,33	2,30
4	899,796	450,899	2,24	2,30	2,26
5	1097,960	548,472	2,21	2,25	2,25

В [11], используя программно-аппаратный комплекс на основе ANSYS [12-14] и LS–DYNA, были выполнены расчеты процесса холодной раскатки деталей с фланцами методом конечно-элементного моделирования. Была получена информация о напряженных и деформированных состояниях заготовок. Выявлено, что эквивалентные напряжения в раскатанных и не раскатанных областях детали отличаются в 3-5 раз.

В настоящей работе установлено, что значения величины размаха высот и параметра, выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам для раскатанных и не раскатанных областей отличаются в 2,5-2,7 раза.

Таким образом, в работе предложен новый метод анализа напряженных и деформированных состояний сплава (металлов) в процессе угловой раскатки фланца трубчатой заготовки. Значения эквивалентных напряжений в раскатанных и не раскатанных областях детали прямопропорциональны значениям фрактальной размерности и обратнопропорциональны значениям величины размах высот и параметра выражающего шероховатость поверхности по выбранным пяти максимальным высотам и впадинам. Причем как эквивалентные напряжения, так и статистические параметры отличаются для раскатанных и не раскатанных областей примерно в 3 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31655 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов П. В., Востров В. Н. Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 391-396.
2. Кононов П. В., Востров В. Н. Анализ текстуры заготовок с раскатанным фланцем методом дифракции рентгеновских лучей // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 852-857.
3. Мошников В. А., Спивак Ю. М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2009. – 78 с.
4. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Российская академия наук. Институт физики микроструктур, 2004.–114 с.
5. Востров В. Н., Кононов П. В. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / Патент на способ RUS 2 499 648. 25.06.2012.
6. Востров В. Н., Кононов П. В. Устройство для раскатки буртов на трубных заготовках / Патент на полезную модель RUS 116079. 07.12.2011.
7. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции рентгеновских лучей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. –№ 166. – С. 223–230.
8. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 // Научно-производственный журнал «Металлообработка». – 2012. – 4(70). – С. 38–42.
9. Грачева И.Е., Мошников В.А., Абрашова Е.В. Обобщение результатов анализа величины фрактальной размерности золь-гель пористых иерархических структур // Материаловедение. – 2013. – № 6. – С. 13-22.
10. Самосборка фрактальных агрегатов системы магнетит–диоксид кремния в постоянном магнитном поле / И.Е.Кононова, К.Г. Гареев, В.А. Мошников, В.И. Альмяшев, О.В. Кучерова // Неорганические материалы. –2014. – Т. 50. – № 1. – С. 75.
11. Кононов П. В., Востров В. Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 46–49.

12. Боровков А. И. Возможности системы конечно–элементного моделирования ANSYS/LS–DYNA // Первая международная конференция пользователей программного обеспечения ANSYSE. М.: EMT–ANSYS–центр. – 2003. – С. 128–136.
13. ANSYS Theory Reference. ANSYS inc., Canonsburg, PA. USA. Eleventh edition. ANSYS Release 10.0. – 2005. – 1286 p.
14. ANSYS. User's Guide.-ANSYS, In. (Canonsburg, PA), 2000. http://www.ansys.com/services/documentation/manuals.html

P. V. Kononov

MODELLING FORMING OF THE TUBULAR BLANKS OF PROCESS IN COLD ANGLE ROLLING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The morphology of plastically deformed surface layers of the model samples was investigated using atomic force and optical microscopy . Values of heights and scope parameter that expresses the surface roughness of the selected five maximum heights and hollows were calculated. Fractal analysis of surfaces structures using atomic force microscopy was conducted.

Keywords: detail with flanges, brass, atomic force microscopy, fractal analysis, plastic deformation

REFERENCES

[1] Kononov P.V., Vostrov V.N. Shaping flange by deformation forming part of tubular blanks // Modern engineering. Science and education. – 2012. – № 2. – P. 391–396. (rus.)
[2] Kononov P.V., Vostrov V.N. Texture analysis blanks with roll flange by X-ray diffraction // Modern engineering. Science and education. – 2013. – № 3. – P. 852–857. (rus.)
[3] Moshnikov V.A. Spivak Yu. M. Atomic force microscopy for nanotechnology and diagnosis: textbook. – St. Petersburg: ETU "LETI". 2009. – 78 p. (rus.)
[4] Mironov V.L. Basics of scanning probe microscopy: textbook. – Nizhny Novgorod, Russian Academy of Sciences. Institute of Microstructure Physics. 2004. –114 p. (rus.)
[5] Vostrov V. N., Kononov P. V. Way rolling flanges tubular blanks / Utility patent RUS 2 499 648. 25.06.2012. (rus.)

[6] Vostrov V. N., Kononov P. V. Way rolling flanges tubular blanks / Utility patent RUS 116079. 07.12.2011. (rus.)
[7] Vostrov V. N., Yablokova N. A., Kononov P.V. Study of residual stresses in the roll out details of the X-ray diffraction // Scientific and technical sheets SPbPU. 2013. № 166. P. 223–230. (rus.)
[8] Vostrov V. N, Yablokova N. A., Kononov P. V. Study of residual stresses X-ray diffraction method in detail with the roll out of an alloy flange L63 // Scientific and Production magazine «Metallobrabotka». 2012. – 4 (70). – P. 38–42. (rus.)
[9] Gracheva I.E., Moshnikov V.A., Abrashova E.V. Generalization of the results of analysis of fractal dimension of sol-gel porous hierarchical structures // Materials. – 2013. – № 6. – P. 13–22. (rus.)
[10] The self-assembly of fractal aggregates of magnetite-silica in constant magnetic field / I. E. Kononova, K.G. Gareev, V.A. Moshnikov, V.I. Almyashev, O.V. Kucherova // Inorganic Materials. –2014. – V. 50. – № 1. – P. 75. (rus.)
[11] Kononov P.V., Vostrov V. N. Finite element modeling of the process rolling flange on the tubular billet // Young scientist. 2013. – № 9. – P. 46-49. (rus.)
[12] Borovkov A. I. System capabilities of the finite element modeling ANSYS ANSYS/LS–DYNA // The first international conference of software users ANSYSE. M.: EMT-ANSYS-center, 2003. – P. 128–136. (rus.)
[13] ANSYS Theory Reference. ANSYS inc., Canonsburg, PA. USA. Eleventh edition. ANSYS Release 10.0. 2005. 1286 p.
[14] ANSYS. User's Guide.-ANSYS, In. (Canonsburg, PA), 2000. http://www.ansys.com/services/documentation/manuals.html

УДК 621.77.04

П. В. Кононов[1], В.Н.Востров[2]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ УГЛОВОЙ РАСКАТКИ

[1]Павел Васильевич Кононов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (+7)952-398-05-84, E-mail: KPV710@Rambler.ru

[2]Владимир Николаевич Востров, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)945-83-31, E-mail: vostrov-vn@mail.ru

Аннотация

Исследовали напряженное и деформированное состояния трубчатой заготовки в процессе угловой раскатки на торце конуса. В комплексе ANSYS и LS–DYNA разработана конечно-элементная модель, позволяющая прогнозировать технологию бездефектного формирования деталей данного класса. Представлен пример компьютерного расчета.

Ключевые слова: технология, деталь с конусом, холодная раскатка, конечно-элементный комплекс ANSYS и LS–DYNA, пластическая деформация, напряжение

Детали с конусом на торце трубчатой заготовки находят широкое применение в машиностроении. Известные технологии объемного формообразования деталей данного класса (клиновая раскатка, выдавливание, торцовая раскатка и др.) имеют ограниченные технологические возможности. Разработанная технология угловой раскатки конического участка на трубчатой заготовке расширяет технологические возможности объемного формообразования, повышает производительность труда и коэффициент использования материала [1-4]. Широкое внедрение данной технологии затруднено из-за недостаточной ее изученности и, в частности, отсутствия теоретических исследований напряженного и деформированного состояний заготовок в процессе их формоизменения.

Для проектирования бездефектного технологического процесса и оценки допустимых возможностей формоизменения получаемых изделий наиболее важным является изучение напряженного и деформированного состояния обрабатываемого материала. Кроме того, определение кинематики течения металла [5, 6] позволяет устанавливать наиболее опасные зоны с большим локальным деформированием и по ним оценивать допустимые геометрические характеристики конструктивных элементов деталей.

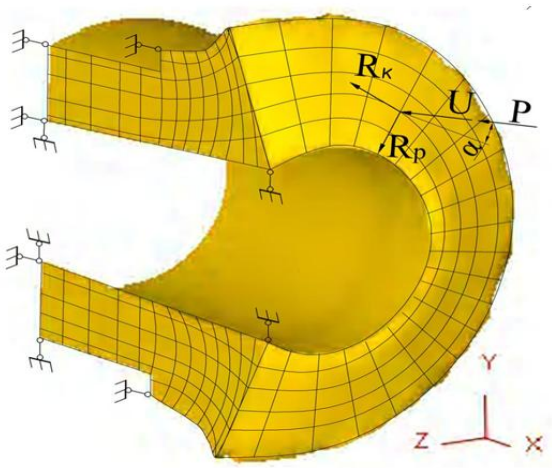


Рис. 1. Схема задания граничных условий

Схема задания граничных условий и разбивки тела заготовки показана на рис. 1. На свободных поверхностях, где нет контакта заготовки с деформирующим роликом, заданы нулевые силовые условия в виде сил, действующих по нормали к поверхности: $\{P\}=0$. На контактной поверхности задаем кинематические условия: скорости перемещения U_p в узловых точках в направлении силы P и проекции вектора сил трения R_T в радиальном R_p и касательном направлении $R_к$. Модель имеет ограничение по перемещению в осевом направлении и ограничение перемещения поверхности отверстия в радиальном направлении. Деформирование осуществляется при вращении заготовки в радиально-осевом направлении с силой P под углом α [7, 8].

Расчеты процесса ротационного формоизменения деформируемой части заготовки осуществляли в программно аппаратном комплексе на основе ANSYS и LS–DYNA [9-11]. Интенсивность напряжений в заготовке [10] при формообразовании конуса в сечении $Z/L = 0$ показано на рис. 2. Графики распределения деформаций и напряжений соответствующие данной расчетной схемы изображены на рис. 3 и 4.

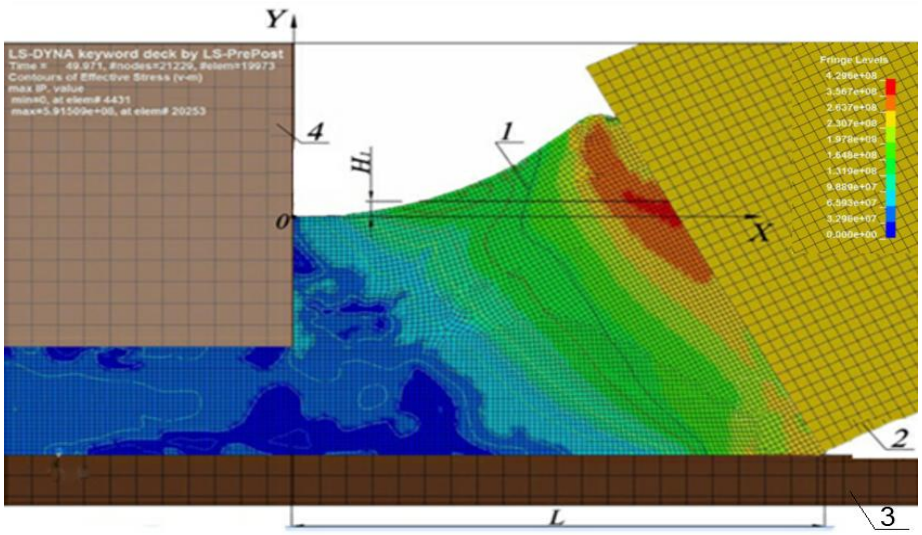


Рис. 2. Интенсивность напряжений в заготовке из сплава Л63 при формообразовании конуса на торце заготовки в сечении $Z/L = 0$.
1 – заготовка; 2 – раскатной ролик; 3 – ось; 4 – матрица.

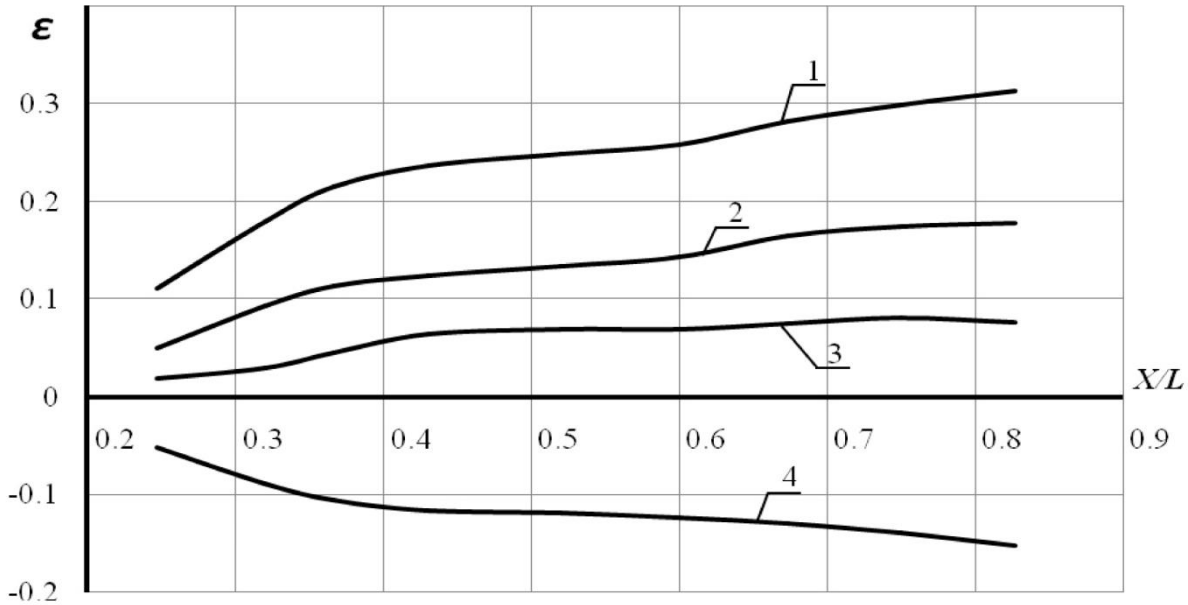


Рис. 3. Графики распределения логарифмических деформаций по оси X при формообразовании конуса из сплава Л63 в сечении (H_1/L =0,04; $Z/L = 0$) при $\mu = 0{,}2$.
μ – коэффициент контактного трения.
(Положение начала координат (точка 0) показано на рис. 1.)
1) ε_i – интенсивность деформаций. 2) ε_{yy} – деформации по оси Y
3) ε_{zz} – деформации по оси Z. 4) ε_{xx} – деформации по оси X

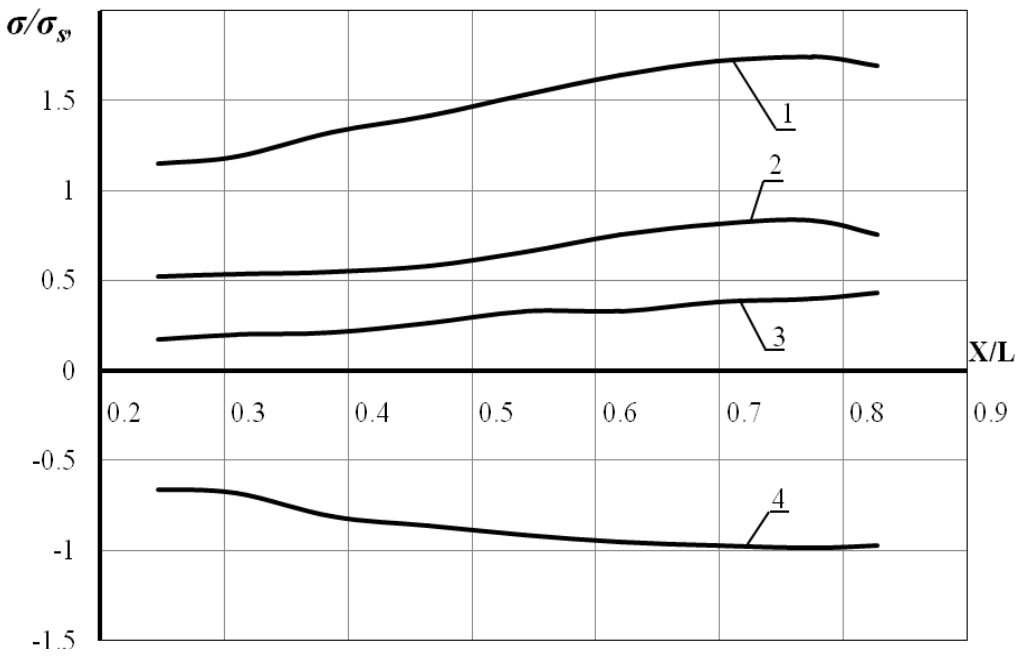


Рис. 4. График распределения напряжений по оси X при формообразовании конуса из сплава Л63 в сечении (H_1/L =0,04; Z/L = 0) при ε = 0,21, μ = 0,2.

μ – коэффициент контактного трения.

(Положение начала координат (точка 0) показано на рис. 1.)

1) σ_i – интенсивность напряжений. 2) σ_{yy} – нормальные напряжения по оси Y. 3) σ_{zz} – нормальные напряжения по оси Z. 4) σ_{xx} – нормальные напряжения по оси X

На основании конечно–элементной математической модели и выполненных расчетов процесса холодной раскатки конуса на трубчатой заготовке, определено изменение напряженного и деформированного состояния заготовки в процессе ее формоизменения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-31655 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Востров В. Н., Кононов П. В. Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / Патент на способ RUS 2 499 648. 25.06.2012.
2. Востров В. Н., Кононов П. В. Устройство для раскатки буртов на трубных заготовках / Патент на полезную модель RUS 116079. 07.12.2011.
3. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции

рентгеновских лучей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. –№ 166. –С. 223–230.
4. Востров В. Н., Яблокова Н. А., Кононов П. В. Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 // Научно-производственный журнал «Металлообработка». – 2012. – 4(70). – С. 38–42.
5. Игнатенко В. Н., Крутина Е. В., Молодов А. В. Кинематика течения металла при комбинированном радиальном и обратном выдавливании в конической матрице // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – С. 57–60.
6. Головин В.А. Особенности кинематики течения металла при комбинированном холодном выдавливании полых деталей с фланцем заданных размеров / В.А. Головин, Ю.К. Филиппов, В.Н. Игнатенко // Материалы 49-й международной научно-технической конференции ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» Секция 6 «Заготовительные производства в машиностроении. Подсекция «МиТОМД». Часть 2. – М., МАМИ. – 2005. –С. 18–20 с.
7. Кононов П. В., Востров В. Н. Формообразование фланцев деформированием образующей части трубчатых заготовок // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 391-396.
8. Кононов П. В., Востров В. Н. Анализ текстуры заготовок с раскатанным фланцем методом дифракции рентгеновских лучей // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 852-857.
9. Боровков А. И. Возможности системы конечно–элементного моделирования ANSYS/LS–DYNA // Первая международная конференция пользователей программного обеспечения ANSYSE. М.: EMT–ANSYS–центр. – 2003. – С. 128–136.
10. ANSYS Theory Reference. ANSYS inc., Canonsburg, PA. USA. Eleventh edition. ANSYS Release 10.0. 2005. – 1286 p.
11. ANSYS. User's Guide.-ANSYS, In. (Canonsburg, PA), 2000. http://www.ansys.com/services/documentation/manuals.html
12. Кононов П. В., Востров В. Н. Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 46–49.

P. V. Kononov, V. N. Vostrov

MODELLING FORMING OF THE TUBULAR BLANKS OF PROCESS IN COLD ANGLE ROLLING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Investigated the stress and strain state of the tubular blank in process of reeling cone on her end of the cone. Finite element model allowing to predict the formation of defect-free technology components of this class was developed in the complex ANSYS and LS-DYNA. Example of a computer calculation was presented.

Keywords: technology, detail with the cone, cold reeling, finite element ANSYS and LS-DYNA, plastic deformation, pressure

REFERENCES

[1] Vostrov V. N., Kononov P. V. Way rolling flanges tubular blanks / Utility patent RUS 2 499 648. 25.06.2012. (rus.)
[2] Vostrov V. N., Kononov P. V. Way rolling flanges tubular blanks / Utility patent RUS 116079. 07.12.2011. (rus.)
[3] Vostrov V. N., Yablokova N. A., Kononov P.V. Study of residual stresses in the roll out details of the X-ray diffraction // Scientific and technical sheets SPbPU. 2013. № 166. P. 223–230. (rus.)
[4] Vostrov V. N, Yablokova N. A., Kononov P. V. Study of residual stresses X-ray diffraction method in detail with the roll out of an alloy flange L63 // Scientific and Production magazine «Metallobrabotka». 2012. – 4 (70). – P. 38–42. (rus.)
[5] Ignatenko V. N., Krutina E. V., Molodov A. V. Kinematics of the metal flow in the combined radial and backward extrusion in a conical matrix // International scientific conference AAI «Automobile and Tractor in Russia: development priorities and preparation frame», dedicated to the 145 anniversary of MSTU «MAMI». – P. 57–60. (rus.)
[6] Golovin V. A., Filippov J. K., Ignatenko V. N. Features of the kinematics of the metal flow at the combined cold extrusion of hollow parts with flange specified sizes // Proceedings of the 49th International Scientific and Technical Conference AAI "Priorities of tractor development of domestic and training of engineers and scientists", Section 6 "Provision of industrial manufacture. Subsection MiTOMD". Part 2. M.: MAMI, 2005. – C. 18. (rus.)

[7] Kononov P.V., Vostrov V.N. Shaping flange by deformation forming part of tubular blanks // Modern engineering. Science and education. – 2012. – № 2. – P. 391–396. (rus.)
[8] Kononov P.V., Vostrov V.N. Texture analysis blanks with roll flange by X-ray diffraction // Modern engineering. Science and education. – 2013. – № 3. – P. 852–857. (rus.)
[9] Borovkov A. I. System capabilities of the finite element modeling ANSYS ANSYS/LS–DYNA // The first international conference of software users ANSYSE. M.: EMT-ANSYS-center, 2003. – P. 128–136. (rus.)
[10] ANSYS Theory Reference. ANSYS inc., Canonsburg, PA. USA. Eleventh edition. ANSYS Release 10.0. 2005. 1286 p.
[11] ANSYS. User's Guide.-ANSYS, In. (Canonsburg, PA), 2000. http://www.ansys.com/services/documentation/manuals.html
[12] Kononov P.V., Vostrov V. N. Finite element modeling of the process rolling flange on the tubular billet // Young scientist. 2013. – № 9. – P. 46-49. (rus.)

УДК 621.762

П.А. Кузнецов, А.В. Гоциридзе, М.А. Кузнецова

КОМБИНИРОВАННОЕ ПРЕССОВАНИЕ И ЛОКАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПЛОТНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЕЧЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кузнецов Павел Алексеевич, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (911) 915 67 53, E-mail:pa-kuznetsov@mail.ru

ГоциридзеАлексей Вахтангович, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (951) 640 94 59, E-mail: mtomd@zavod-vtuz.ru

Кузнецова Маргарита Андреевна, дипломник
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая , 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. 8 (904) 639 12 70, E-mail: margaritik7@rambler.ru

Аннотация

В работе проведен анализ процессов комбинированного прессования и локальной обработки давлением высокоплотных биметаллических спеченных изделий. Показано, что применение комбинированного процесса эластостатического прессования фасонных заготовок и последующей раскатки спеченных заготовок значительно расширяет технологические возможности изготовления высокоплотных деталей сложной формы.

Ключевые слова: прессование, раскатка, порошки, спеченные материалы, комбинированные процессы.

Биметаллические материалы представляют значительную группу современных материалов, всё более широко применяемых в различных отраслях промышленности [1]. Большинство технологических процессов металлообработки используются, как при изготовлении биметаллических материалов, так и при их обработке и изготовлении конкретных деталей. Можно выделить две основные группы методов изготовления биметаллических изделий. Первая группа, например, прокатка, представляет методы изготовления так называемых «непрерывных заготовок», т.е. заготовок, длина которых существенно превышает их поперечные размеры. Для изготовления конкретной заготовки приходится отделять от длинной заготовки необходимое количество материала. Более существенным недостатком при этом может стать нерациональное распределение материала рабочего слояв объёме готового изделия. Вторая группа методов, например, прессование, штамповка предполагает изготовление штучной биметаллической фасонной заготовки с рациональным расположением материала со специальными свойствами. Применение при изготовлении биметаллов порошковых материалов позволяет дополнительно использовать основные преимущества порошковой металлургии, в том числе создание изделий с уникальными свойствами. Задача изготовления биметаллических спеченных высокоплотных изделий с высокими эксплуатационными свойствами наиболее успешно решается при использовании комбинированных технологий, включающих получение предварительных фасонных заготовок и последующую пластическую деформацию с целью получения изделия требуемой формы и плотности [2,3]. На практике чаще всего предварительные фасонные заготовки получают прессованием в жестких пресс-формах, однако ряд исследований, проведённых в последние годы убедительно показал, что фасонные точные биметаллические заготовки весьма сложной формы можно эффективно получать эластостатическим прессованием [4,5,6,7].Использование в качестве деформирующей подвижной среды полиуретанов позволяет существенно снизить стоимость пресс-форм и расширить область применения метода от индивидуального до серийного производств.

В качестве примера на рисунке 1 представлена принципиальная схема эластостатического прессования (ЭСП) биметаллических втулок.

Одним из преимуществ ЭСП является возможность его реализации на универсальных гидравлических прессах. Для получения точных заготовок сложной формы следует использовать специализированное оборудование[8.9,10].

Квазиизостатический характер распределения давлений в эластичной среде позволяет получать практически равномерное распределение плотности в исходных заготовках.

Последующую пластическую деформацию спеченных заготовок можно эффективно осуществлять используя практически большинство процес-

сов локальных методов обработки давлением. Для трубчатых изделий в виде втулок, стаканов целесообразно использовать такие процессы как редуцирование или дорнование. На рисунке 2 представлены принципиальная схема процесса и характер распределения твердости рабочего слоя по толщине после деформации. В зависимости от условий эксплуатации изделие можно изготовить с заданным уровнем и характером распределения плотности и твердости по его объёму.

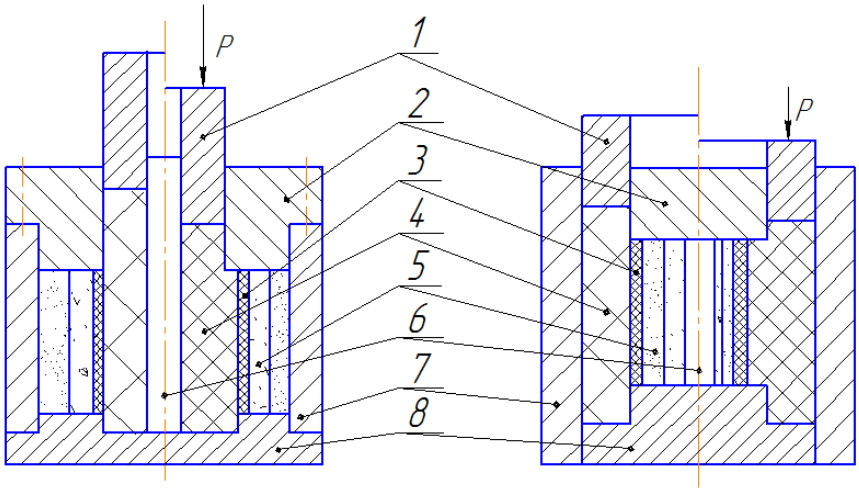


Рис. 1 – Принципиальная схема ЭСП биметаллических втулок
1 – пуансон; 2 – верхняя крышка; 3 – сменная эластичная втулка;
4 – стержень из полиуретана; 5 – биметаллическая втулка; 6 – оправка;
7 – матрица; 8 – нижняя крышка

Процессы локальной деформации являются перспективными для изготовления изделий из спеченных материалов с точностью 9..12 квалитета и шероховатостью поверхности, порядка R_a=2.5..1.25 мкм.

Методы локальной ротационной обработки значительно расширяют область применения процессов холодного объемного деформирования, т.к. локальных характер приложения нагрузки приводит к снижению, как общего усилия деформирования, так и контактных напряжений действующих на инструмент.

Среди процессов локальной деформации выделяется процесс торцевой раскатки, заключающийся в силовом воздействии валка на торцевую часть заготовки, помещенную во вращающуюся матрицу. Однако металлические спеченные материалы из-за остаточной пористости в ряде случаев не обладают достаточной пластичностью, необходимой для изготовления изделий сложной формы. При деформации малопластичных, например, спеченных материалов, необходимо использовать технологические схемы, создающие всестороннее неравномерное сжатие [11]. На рисунке 3 представлена принципиальная схема процесса холодной торцовой раскатки биметаллической втулки.

а. б.

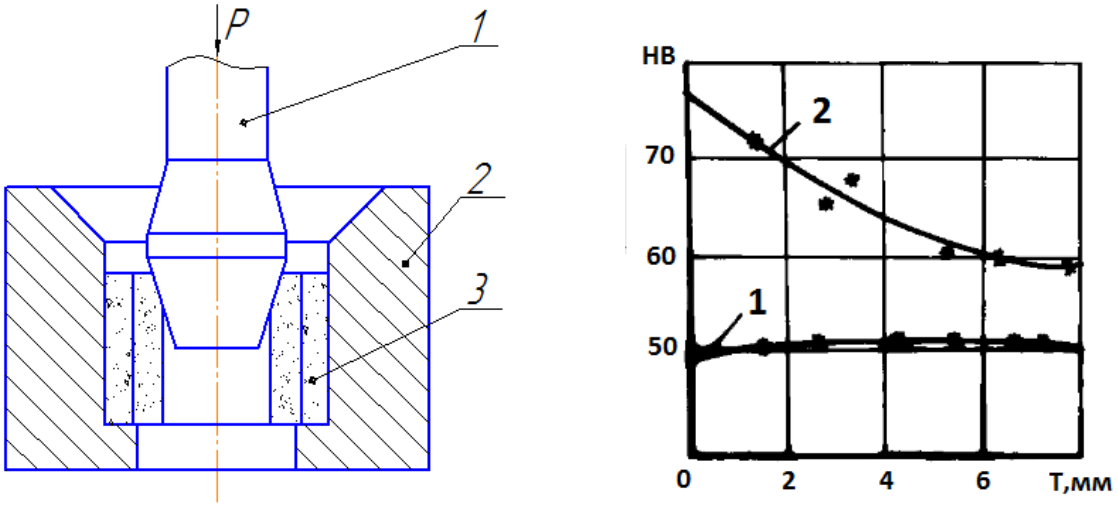
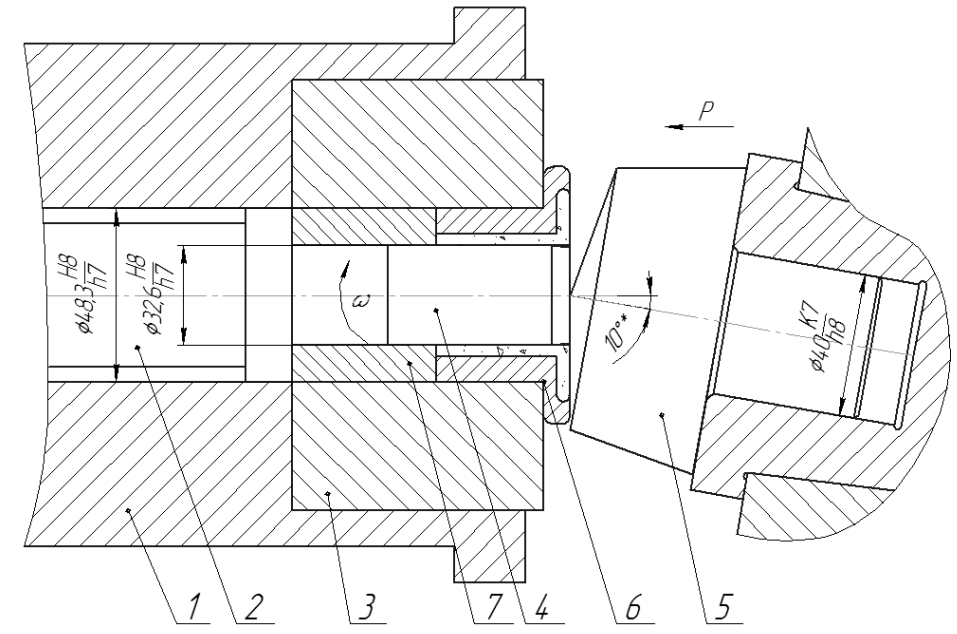


Рис. 2 – Дорнование биметаллических втулок
а – принципиальная схема процесса: 1 – дорн; 2 – матрица;
3 – калибруемая втулка; б – распределение твердости по толщине рабочего слоя: 1 – до деформации; 2 – после деформации



.

Рис. 3 – Принципиальная схема торцевой раскатки биметаллических втулок
1-шпиндель, 2-выталкиватель, 3-матрица, 4-оправка, 5-валок, 6-биметаллическая втулка,7-упор

Применение ротационных процессов объемного деформирования пористых заготовок позволяет расширить возможности холодной объемной

штамповки спеченных порошковых материалов, прежде всего за счет снижения удельных усилий и повышения стойкости штамповой оснастки. Локальный характер приложения комбинированных деформирующих усилий и значительные сдвиговые деформации, связанные с течением материала по торцу матрицы, создают возможность получения практически беспористых осесимметричных деталей широкой номенклатуры с развитыми сложнопрофильными элементами у одного из торцов заготовки, а также возможность получения деталей с широкими фланцами. Комбинированные процессы позволяют получать биметаллические изделия различной группы сложности – биметаллические ролики и кулачки, втулки и стаканы, например, подшипники скольжения и др.

На рисунке 4 представлены типовые спеченные изделия, полученные комбинированным прессованием и последующей локальной обработкой давлением.

Рис. 4 – Типовые спеченные изделия, полученные комбинированным прессованием и последующей локальной обработкой давлением

Технологии комбинированного эластостатического прессования точных фасонных биметаллических заготовок и последующей локальной обработки давлением могут существенно расширить номенклатуру получаемых изделий и обеспечить при этом высокие экономические и технологические показатели процесса, а именно: высокую производительность и стойкость инструмента, лучшее качество поверхности и структуры материала деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение. Энциклопедия. Том III-2. Технологии заготовительных производств. Под ред. В.Ф. Мануйлова, Москва, «Машиностроение», 1995.
2. Порошковая металлургия.Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник. / И.М.Федорченко, И.Н.Францевич, И.Д.Радомысельский и др. Отв.ред. И.М. Федорченко.- Киев: Наукова думка,1985.-624с.
3. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / Голенков В.А., Дмитриев А.М. и др. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.
4. Гоциридзе А.В., Кузнецов П.А., Мертенс К.К. Эластостатическое прессование деталей из порошковых материалов, «Кузнечно-штамповочное производство», М., 1995.
5. Технологические возможности эластостатического прессования порошковых материалов.// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002, №4.
6. Кузнецов П.А., Нгуен Тоан Тханг, Демчук Ф.А. Методика выбора рационального технологического варианта эластостатического прессования композиционных слоистых втулок из порошковых материалов, «Металлообработка», Научно-производств.журнал №6(54), 2009. С.25-27
7. Мертенс К.К., Кузнецов П.А. Прессование изделий из порошков подвижными средами// Металлообработка, Научно-производственный журнал, №3(63), 2011. С.25-30.
8. Кузнецов П.А., Нгуен Тоан Тханг, Демчук Ф.А. Установка для изостатического прессования изделий из порошковых материалов,Патент № 88604, Российская Федерация, МПК B28B3/02, Бюллетень №19, 2009.
9. Кузнецов П.А., Гоциридзе А.В., Дымкин Д.Г. Установка для изостатического прессования изделий из порошковых материалов, Патент № 121193, Российская Федерация, МПК B28B3/02.
10. Кузнецов П.А., Гоциридзе А.В., Дымкин Д.Г.Специализированные установки для эластостатического прессования изделий из порошков. Материалы IX международной научно-практической конференции «Современные достижения науки 2013», Прага, 2013.
11. Кузнецов П.А. Мочалова С. Б. Чесноков П.В. Установка для радиально-торцевой раскатки осесимметричных изделий, Патент № 123699, Российская Федерация, МПК B21H1/00.

P.A. Kuznetsov, A.V. Gotsiridze, M.A. Kuznetsova

COMBINED PRESSING AND LOCAL TREATMENT OF PRESSURE BIMETALLIC HIGH DENSITY SINTERED BODY

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The analysis of the combined processes of pressing and forming high-density local bimetallic sintered products. It is shown that the use of the combined process elastostatic compression molded preforms and subsequent rolling of sintered preforms significantly extends the technological possibility of producing high-density parts of complex shape.

Key words: pressing, forming, powders, sintered materials, combined processes.

REFERENCES

[1] Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. Tom III-2. Tekhnologii zagotovitelnykh proizvodstv. Pod red. V.F. Manuylova, Moskva, «Mashinostroyeniye», 1995.(rus.)

[2] Poroshkovaya metallurgiya. Materialy, tekhnologiya, svoystva, oblastiprimeneniya: Spravochnik. / I.M.Fedorchenko, I.N.Frantsevich, I.D.Radomyselskiy i dr. Otv.red. I.M. Fedorchenko.-Kiyev: Naukova dumka,1985. – 624p.(rus.)

[3] Spetsialnyye tekhnologicheskiye protsessy i oborudovaniye obrabotki davleniyem / Golenkov V.A., Dmitriyev A.M. i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 464 p.(rus.)

[4] Gotsiridze A.V., Kuznetsov P.A., Mertens K.K. Elastostaticheskoye pressovaniye detaleyi z poroshkovykh materialov, «Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo», M., 1995.(rus.)

[5] Tekhnologicheskiye vozmozhnosti elastostaticheskogo pressovaniya poroshkovykh materialov.// Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem. 2002, №4.(rus.)

[6] Kuznetsov P.A., Nguyen Toan Tkhang, Demchuk F.A. Metodika vybora ratsionalnogo tekhnologicheskogo varianta elastostaticheskogo pressovaniya kompozitsionnykh sloistykh vtulok iz poroshkovykh materialov, «Metalloobrabotka», Nauchno-proizvodstv. zhurnal №6(54), 2009, 25-27 p.(rus.)

[7] Mertens K.K., Kuznetsov P.A. Pressovaniye izdeliy iz poroshkov podvizhnymi sredami // Metalloobrabotka, Nauchno-proizvodstvennyy zhurnal, №3(63),2011, 25-30 p.(rus.)

[8] Kuznetsov P.A., Nguyen Toan Tkhang, Demchuk F.A. Ustanovka dlya izostaticheskogo pressovaniya izdeliy iz poroshkovykh materialov, Patent № 88604, Rossiyskaya Federatsiya, MPK V28V3/02, Byulleten №19, 2009.(rus.)
[9] Kuznetsov P.A., Gotsiridze A.V., Dymkin D.G. Ustanovka dlya izostaticheskogo pressovaniya izdeliy iz poroshkovykh materialov, Patent № 121 193, Rossiyskaya Federatsiya, MPK V28V3/02.(rus.)
[10] Kuznetsov P.A., Gotsiridze A.V., Dymkin D.G. Spetsializirovannyye ustanovki dlya elastostaticheskogo pressovaniya izdeliy iz poroshkov. Materialy IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye dostizheniya nauki 2013», Praga, 2013.(rus.)
[11] Kuznetsov P.A. Mochalova S. B. Chesnokov P.V. Ustanovka dlya radialno-tortsevoy raskatki osesimmetrichnykh izdeliy, Patent № 123699, Rossiyskaya Federatsiya, MPK V21N1/00(rus.)

УДК 621.77.04

С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов

УПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЕМ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ХОЛОДНОЙ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКИ

Сергей Николаевич Кункин, к.т.н., заведующий кафедрой,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия. Тел. (812) 552-9530
E-mail: kunkin@spbstu.ru

Леонид Борисович Аксенов, д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург,
195251, Россия. Тел. +7 921 931 6786,
E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Аннотация

Использование локальных методов деформирования металлов позволяет расширить возможности технологических процессов при меньшей мощности оборудования. Однако возможности управления течением металла в этом процессе весьма ограничены. В работе рассмотрен основной фактор определяющий направление течения металла – силы трения на контактной поверхности деформируемого металла с раскатным валком. Этими силами можно управлять, изменяя положение валков относительно заготовки. При использовании такого приема технологические возможности процесса существенно расширяются.

Ключевые слова: раскатка, деформирование металла, обжатие, смещение валка, раскатной валок, силы трения, отбортовка.

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 все они не отличаются высоким коэффициентом использования металла (КИМ). Многие технологии производства фланцев основаны на использовании технологии горячей штамповки с последующей дополнительной обработкой [1].

Технология торцевой раскатки предназначена для изготовления осесимметричных деталей из прутковых или трубных заготовок [2,3,4]. Эта технология является представителем процессов с локальной деформацией обрабатываемого металла. При этом в контакте с деформирующим инструментом находится только часть заготовки, что снижает площадь контакта и величину контактных напряжений, и, соответственно, необходимое усилие деформирования.

Наибольшее распространение получили процессы торцевой раскатки в горячем состоянии. 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. 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 [5,6].

В работе исследованы процессы торцевой раскатки на двух машинах. На одной из них используется конический валок с углом наклона валка 10-15^0 (рис. 1, а). В другой машине использованы для формообразования два цилиндрических валка, т.е. валки с наклоном 90^0 к оси заготовки (рис. 1, б).

Наиболее простой тип машины с приводом, вращающим заготовку, и валками, получающими движение от заготовки за счет сил трения на контактной поверхности. Машины, работающие по этому варианту, имеют ряд преимуществ:

- центр масс верхнего инструмента не вращается относительно вертикальной оси и, соответственно, процесс деформирования можно интенсифицировать: путем увеличения скорости вращения заготовки или путем увеличения угла наклона инструмента;
- уменьшаются требования к жесткости станины и к фундаменту;
- снижается уровень шума и опасность усталостных разрушений элементов конструкции ввиду снижения низко- и высокочастотных вибраций.

Взаимное перемещение раскатных валков и заготовки вдоль ее оси вращения может осуществляться путем перемещения под действием осевой силы только раскатных валков, только перемещения заготовки или совместного перемещения.

Раскатную машину можно условно разбить на два технологических узла - верхний и нижний. Нижний узел содержит шпиндель с приводом вращения заготовки, подшипниковые узлы и выталкиватель. Верхний узел имеет:

•привод поперечного перемещения валка относительно оси заготовки;

•привод вращения валков;

•привод изменения угла наклона (для конического валка).

а. б.

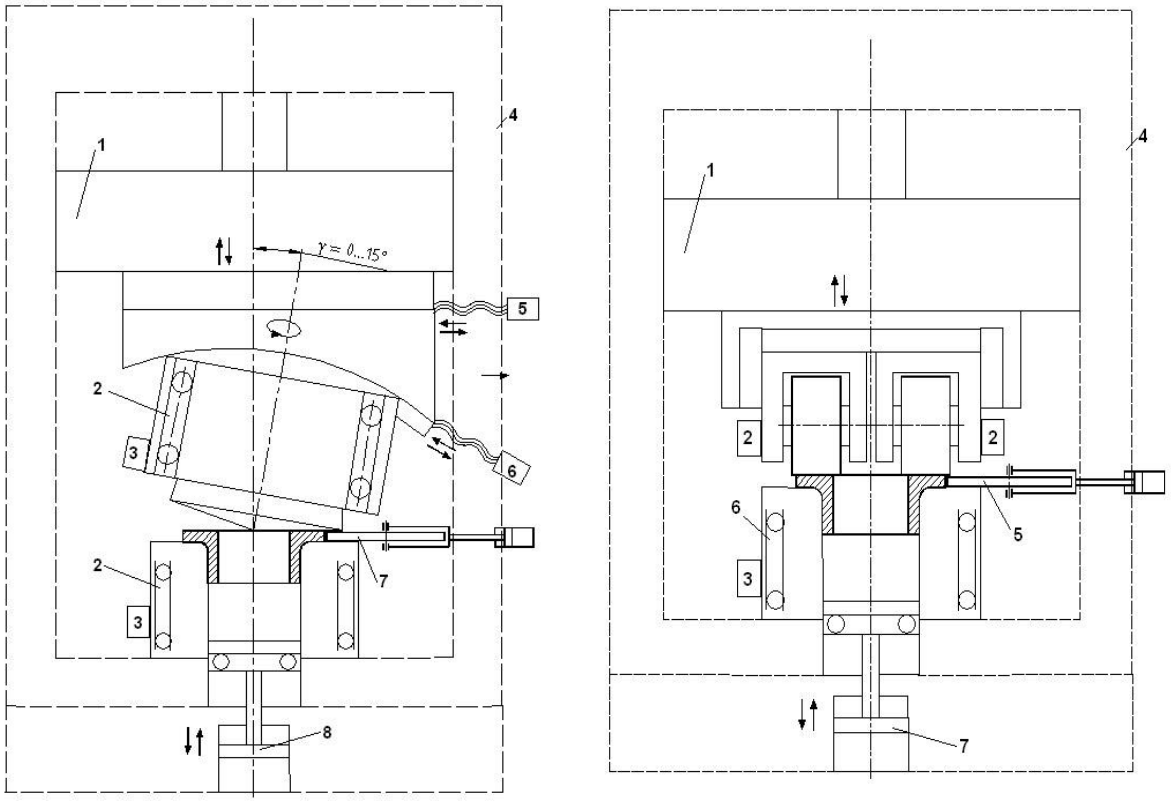


Рис. 1. Схемы машин для холодной торцевой раскатки:
а - с коническим валком (*1* – ползун; *2* – подшипниковый узел; *3* – привод вращения; *4* – станина; *5* – привод перемещения; *6* – привод наклона валка; *7* – поперечный ролик; *8* – выталкиватель)
б - с двумя цилиндрическими валками (*1* – ползун; *2* – подшипниковый узел; *3* – привод вращения; *4* – станина; *5* – боковой ролик; *6* – подшипниковый узел; 7 – выталкиватель)

Привод раскатных валков необходим, когда верхний узел валка (включая шпиндель и подшипниковые узлы) обладает большой массой и инерционностью. В случае раскатки фланцев из тонкостенных труб (например, с толщиной стенки s = 3 мм) небольшого диаметра в начальный момент раскатки площадь контакта валков с такой заготовкой имеет минимальную величину и трение на контакте велико. Данное явление может приводить к двум отрицательным последствиям:

а) процесс раскатки становится невозможным, так как заготовка теряет устойчивость и сминается коническим валком;

б) металл налипает на валок, что приводит к ухудшению поверхности раскатываемой заготовки и снижению стойкости инструмента.

Возможности управления течением металла в процессах раскатки очень ограничены. Различными видами применяемого инструмента (поперечный валок, раскатные валки с ребордой, оправки) удается ограничивать течение металла в определенных направлениях и после заполнения перенаправить металл в направлении, где формирование детали еще не завершилось [7,8]. Такая технология требует значительных усилий, так как большая часть металла в конечной стадии формирования детали представляет собой жесткую зону с напряженным состоянием близким к всестороннему сжатию.

Эффективнее влиять на направление движения металла, используя изменение направления сил трения, действующих на поверхности контакта раскатываемой заготовки с деформирующим валком [9]. Добиться этого можно смещая валки относительно традиционного их расположения. Так для операции получения наружных фланцев отбортовкой требуется течение металла наружу заготовки. Для направления сил трения в требуемую сторону при отбортовке наружных фланцев раскаткой цилиндрические валки следует располагать не соосно, а с некоторым смещением δ относительно поперечной оси заготовки (рис. 2).

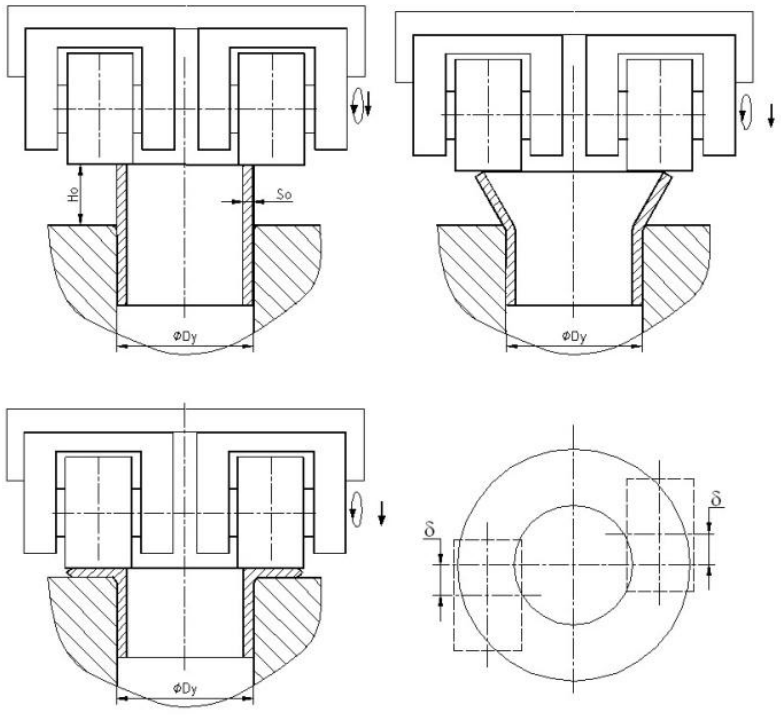


Рис. 2. Отбортовка трубной заготовки раскаткой цилиндрическими валками со смещенными осями

Аналогично, при отбортовке раскаткой трубной заготовки коническим валком, рекомендуется устанавливать вершину конуса валка не по оси симметрии заготовки, а со смещением δ =(0,1-0,3)R (рис. 3).

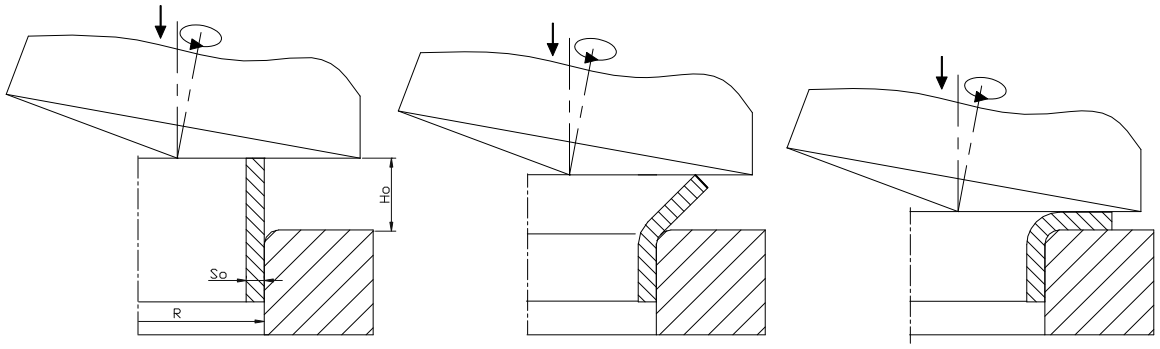


Рис. 3. Отбортовка трубной заготовки раскаткой смещенным коническим валком

Приведенная технология торцевой раскатки со смещенными валками обеспечивает устойчивый процесс отбортовки. Потери устойчивости заготовки и налипания металла на валки не происходит, что позволяет использовать раскатные машины с пассивным движением раскатных валков. При этом фланец получается с толщиной фланцевой части практически не отличающейся от толщины стенки исходной трубной заготовки.

Выводы:

Эффективным способом управления течением металла при операциях торцевой раскатки является изменение направления сил трения на контактной поверхности, достигаемое за счет определенного расположения раскатных валков: несоосного положения цилиндрических валков и смещения конического валка относительно оси заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьюхин В.В.Закрытая штамповка методом высадки с выдавливанием. КШП. ОМД, 2010, № 6 с. 43 – 45.
2. Л.П. Семенова, А.А. Семенов, А.Н. Пасько Формообразование наружных утолщений на стенках трубчатых заготовок. КШП. ОМД, 2010, № 9 с. 33 – 37.
3. Гуринович В.А., Баландин Ю.А., Гурченко П.С., Колпаков А.С., Жарков Е.В., Исаевич Л.А., Сидоренко М.И. Торцовая раскатка деталей фланцевого типа. Журнал «Автомобильная промышленность» 2005. №9.
4. Сурков В. А., Корякин Н. А., Галимов Э. Р. Штамповка обкатыванием кольцевых и фланцевых заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. — 2005, № 7, с. 27-29.
5. Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Елкин Н.М.Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений «Металлообработка», научно-

производственный журнал, №3 (63), 2011 г., стр. 31-36.
6. Аксенов Л.Б., Кункин С.Н. Технология изготовления раскаткой осесимметричных деталей с фланцем. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург.- СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. С. 858-866.
7. J. Nowak, L. Madej, S. Ziolkiewicz, A. Plewinski, F. Grosman, M.Pietrzyk. Recent development in orbital forging technology. Int J Mater Form (2008) Suppl 1:387-390.
8. Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R. Incremental bulk metal forming. Annals of the CIRP, 56, 2007, 635-656.
9. Xinghui Han, Lin Hua. Friction behaviors in cold rotary forging of 20CrMnTi alloy. Tribology International, 55 (2012): 29-39.

S.N. Kunkin, L.B. Aksenov

METAL FLOW CONTROL AT PROCESSES OF COLD AXIAL ROTARY FORGING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Local methods of deformation of metals allow expanding opportunities of technological processes at smaller power equipment. However, the possibility of control of metalflow in this process is very limited. In the paper is considered the main factor in determining the direction of flow of metal. It is friction force at the contact surface of formed metal with forging roll. This force can be controlled by changing the position of rolls with respect to the blank. Using such technological technique process capability is significantly expanded.

Keywords: rotary forging, forming of metal, forging roll, displacement of roll, friction force, outward flanging.

REFERENCES

[1] Tretyuhin V.V.Zakryitaya shtampovka metodom vyisadki s vyidavlivaniem. KShP. OMD, 2010, № 6 pp. 43 – 45 (rus.)
[2] L.P. Semenova, A.A. Semenov, A.N. Pasko Formoobrazovanie naruzhnyih utolscheniy na stenkah trubchatyih zagotovok. KShP. OMD, 2010, № 9 pp. 33 – 37 (rus.)
[3] Gurinovich V.A., Balandin Yu.A., Gurchenko P.S., Kolpakov A.S., Zharkov E.V., Isaevich L.A., Sidorenko M.I. Tortsovaya raskatka

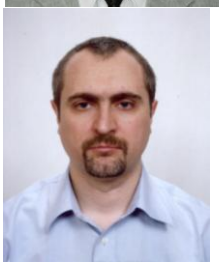
detaley flantsevogo tipa. Zhurnal «Avtomobilnaya promyishlennost» 2005. №9 (rus.)
[4] Surkov V. A., Koryakin N. A., Galimov E. R. Shtampovka obkatyivaniem koltsevyih i flantsevyih zagotovok // Zagotovitelnyie proizvodstva v mashinostroenii. — 2005, № 7, pp. 27-29 (rus.)
[5] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Elkin N.M.Tortsevaya raskatka flantsevyih detaley trubnyih soedineniy «Metalloobrabotka», nauchno-proizvodstvennyiy zhurnal, №3 (63), 2011, pp. 31-36 (rus.)
[6] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Tehnologiya izgotovleniya raskatkoy osesimmetrichnyih detaley s flantsem. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg.- SPb.: Izd-vo Politehn.un-ta, 2013. pp. 858-866 (rus.)
[7] J. Nowak, L. Madej, S. Ziolkiewicz, A. Plewinski, F. Grosman, M.Pietrzyk. Recent development in orbital forging technology. Int J Mater Form (2008) Suppl 1: 387-390.
[8] Groche P., Fritsche D., Tekkaya E.A., Allwood J.M., Hirt G., Neugebauer R. Incremental bulk metal forming. Annals of the CIRP, 56, 2007, 635-656.
[9] Xinghui Han, Lin Hua. Friction behaviors in cold rotary forging of 20CrMnTi alloy. Tribology International, 55 (2012): 29-39.

УДК 621.7.014.3+539.3

В.С. Мамутов, А.В. Мамутов

КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛАСТОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Мамутов Вячеслав Сабайдинович, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru



Мамутов Александр Вячеславович, к.т.н., доцент
приглашенный ученый
Окландский университет
США, Мичиган, Рочестер
E-mail: a.mamutov@yahoo.com

Аннотация

С применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA разработана методика компьютерного моделирования механической части технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки. В результате обработки компьютерного эксперимента получена зависимость эффективности преобразования импульсного давления магнитного поля плоского спирального индуктора в давление в контейнере с полиуретаном от комплекса безразмерных параметров. Данная зависимость позволяет проектировать технологическое устройство, обеспечивающее максимальное давление в полиуретане.

Ключевые слова: магнитно-эластоимпульсная штамповка, технологическое устройство, компьютерное моделирование, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, обработка компьютерного эксперимента, зависимость для проектирования, максимальное давление в полиуретане

Магнитно-эластоимпульсная штамповка (МЭИШ) позволяет на магнитно-импульсных установках (МИУ) с использованием специального технологического устройства получать детали независимо от проводимости материала заготовки. Впервые данный способ был предложен Дэвидом Броувером в 1966 г. [1]. С начала 70-х годов на кафедре МиТОМД ЛПИ начались экспериментальные и теоретические исследования, а также внедрение МЭИШ в промышленное производство

[2–4]. Было установлено, что использование данной технологии для штамповки сложных по форме точных деталей без заусенцев из особо тонколистовых материалов и фольги при изготовлении деталей с размерами в плане менее 100…150 мм и толщиной 0.01…0.2 мм гарантирует снижение в несколько раз трудоемкости изготовления штамповочной оснастки и сроков подготовки производства по сравнению с использованием жестких инструментальных штампов [5–7].

В технологическом устройстве для МЭИШ преобразование импульсного давления может осуществляться механическим концентратором, который представляет собой подвижный элемент с торцевыми поверхностями разной площади. Давление импульсного магнитного поля плоского спирального индуктора действует одну торцевую поверхность, а давление на другой торцевой поверхности определяется сопротивлением эластичной среды. Такой случай достаточно хорошо моделирует трансформацию давления при магнитно-эластоимпульсной вырубке-пробивке тонколистовых материалов [8]. Исходное давление импульсного магнитного поля определяется параметрами плоского спирального индуктора и разрядного контура магнитно-импульсной установки [9].

В работах [10, 11] описан компьютерный расчет преобразования давления в подвижном элементе технологического устройства для МЭИШ с применением оригинальной программы, использующей дифференциально-разностный метод численного решения в 2-х мерной постановке. Однако дальнейшее развитие данный метод не нашел в связи с появлением возможности работы с готовыми конечно-элементными (КЭ) комплексами типа LS-DYNA, позволяющими решать аналогичные задачи с гораздо более удобным интерфейсом и возможностью моделирования комплекса физико-механических процессов при МЭИШ [12]. Поэтому с точки зрения возможности проектирования технологических устройств МЭИШ в последующей практике инженерных расчетов интерес представляет разработка методики расчета элементов технологического устройства для МЭИШ с использованием готовых КЭ комплексов. Разработка такой методики с использованием комплекса LS-DYNA применительно к механическому концентратору давления и проверка методики на основе расчетов, полученных ранее при помощи дифференциально-разностной модели, являлось целью данной работы.

Схема технологического устройства для МЭИШ представлена на рис. 1. При срабатывании разрядника *P* магнитно-импульсной установки 1 происходит разряд конденсаторной батареи *C* на плоский спиральный индуктор *2*. В зазоре между индуктором и подвижным элементом *3*, выполненном из хорошо проводящего материала, возникает сильное импульсное магнитное поле. Электромагнитное усилие, определяемое взаимодействием вихревых токов на поверхности подвижного элемента и

импульсного магнитного поля, действует на подвижный элемент и вызывает его перемещение. В результате в полиуретан *4*, заключенный в контейнер *8*, сжимается, и в нем возникает импульсное давление, за счет которого происходит вырубка-пробивка тонко листовой заготовки *5* в соответствии с формой матричного блока *6*. Подкладная плита *7* вместе с центральным отверстием в контейнере *8* позволяют извлечь готовую деталь и отход после штамповки.

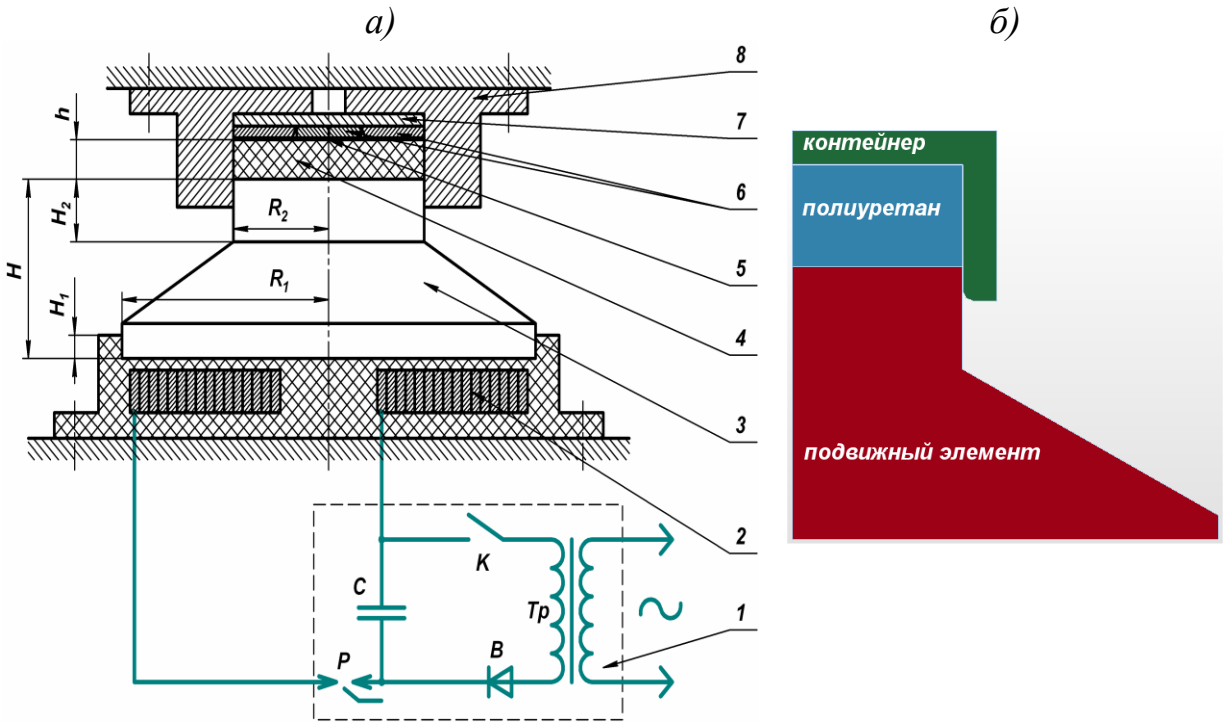


Рис. 1. Схем технологического устройства для МЭИШ (*а*): *1* – блок магнитно-импульсной установки, *2* – плоский спиральный индуктор, *3* – ступенчатый подвижный элемент – механический концентратор давления, *4* – полиуретан, *5* – заготовка из тонколистового металла, *6* – матричный блок, *7* – подкладная плита, 8 – контейнер; (*б*) – геометрическая модель технологического устройства

При компьютерном моделировании полагалось, что импульсная нагрузка на подвижный элемент технологического устройства определяется с одной стороны давлением импульсного магнитного поля спирального индуктора, а со второй стороны давлением полиуретана, заключенного в контейнер. Геометрическая модель устройства с учетом осевой симметрии показана на рис. 1, *б*. Давление в полиуретане определялось сжимаемостью полиуретана и деформацией стенок контейнера.

Для анализа трансформации импульсного давления и расчета напряжений в подвижном элементе применялся конечно-элементный комплекс LS-DYNA 970. Рассматривался случай «жесткого» нагружения,

имеющий место при магнитно-эластоимпульсной вырубке-пробивке тонколистовых материалов, когда податливость отхода деформируемой заготовки искусственно уменьшается специальной конструкцией матричного блока (рис. 1, *а*) для увеличения амплитуды давления и улучшения качества среза. В этом случае податливость системы «эластичная среда – заготовка» определяется преимущественно податливостью эластичного блока.

В примере расчета с учетом осевой симметрии геометрическая модель (рис. 1, *б*) разбивалась на осесимметричные 2D элементы. Полиуретан моделировался вязкой сжимаемой жидкостью с плотностью $\rho = 1265$ кг/м^3 и с модулем динамического объемного сжатия $K = 2.4$ ГПа. Коэффициент вязкого демпфирования равнялся 20. Такая физическая модель полиуретана оправдана с точки зрения моделирования данного процесса, так как обычно длительность импульса давления в полиуретане при МЭИШ находится в пределах 50…500 мкс в зависимости от параметров МИУ и технологического устройства. За это время полиуретан из-за инерционности не успевает затекать в зазор между контейнером и подвижным элементом.

Контейнер и подвижный элемент моделировались идеально упругими изотропными материалами с параметрами: для контейнера: плотностью $\rho = 7800$ кг/м^3, модулем упругости $E = 210$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0.3$ и для подвижного элемента: $\rho = 1740$ кг/м^3, $E = 156$ ГПа, $\nu = 0.3$. Размеры подвижного элемента и контейнера в примере расчета брались следующими: $R_1 = 62.5$ мм, $R_2 = 25$ мм, $H = 40$ мм, $H_1 = 3.5$ мм, $H_2 = 15$ мм, $h = 15$ мм. Толщина стенки контейнера равнялась 5 мм.

Задание параметров электромагнитного давления осуществлялось аналогично, как это сделано в работе [11]. На торец механического концентратора с большим диаметром R_1 (рис. 1, *а*) действует давление импульсного магнитного поля плоского спирального индуктора:

$$p_m(t,r) = p_{m1}(t) \cdot p_{m2}(r).$$

Временная функция $p_{m1}(t)$ определяется известным соотношением, характерным для давления магнитного поля [9]:

$$p_{m1}(t) = p_0 \, [\sin(2\pi t/T_0)]^2 \, \exp(-\delta t/T_0),$$

где p_0 – начальное магнитное давление, T_0 – период, δ – логарифмический декремент. Функция $p_{m2}(r)$ задавалась таблично (таблица) из типовой экспериментальной эпюры распределения магнитного давления для плоского спирального индуктора при частоте разрядного тока 8 кГц [11].

Для примера расчета параметры магнитного давления задавались следующие: $p_0 = 50$ МПа, $T_0 = 120$ мкс, $\delta = 0.9$. Расчетные давления в крайних нижних (1134, 1158) и верхних (1184, 1508) элементах полиуретанового блока представлены на рис. 2.

Для любого момента времени можно определить другие параметры процесса, например интенсивность тензора напряжений для оценки

возможных пластических деформаций технологической оснастки. Например, такое распределение интенсивности напряжения для фиксированного момента времени представлено на рис. 3. Изменяя геометрию подвижного элемента, можно добиться условий, когда возможная пластическая деформация с учетом динамики процесса не приведет к разрушению оснастки.

Таблица

Распределение давления по радиальной координате спирали индуктора

r/R_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
p_{m2}	0.00	0.10	0.24	0.47	0.71	0.91	1.00	0.97	0.86	0.60	0.32

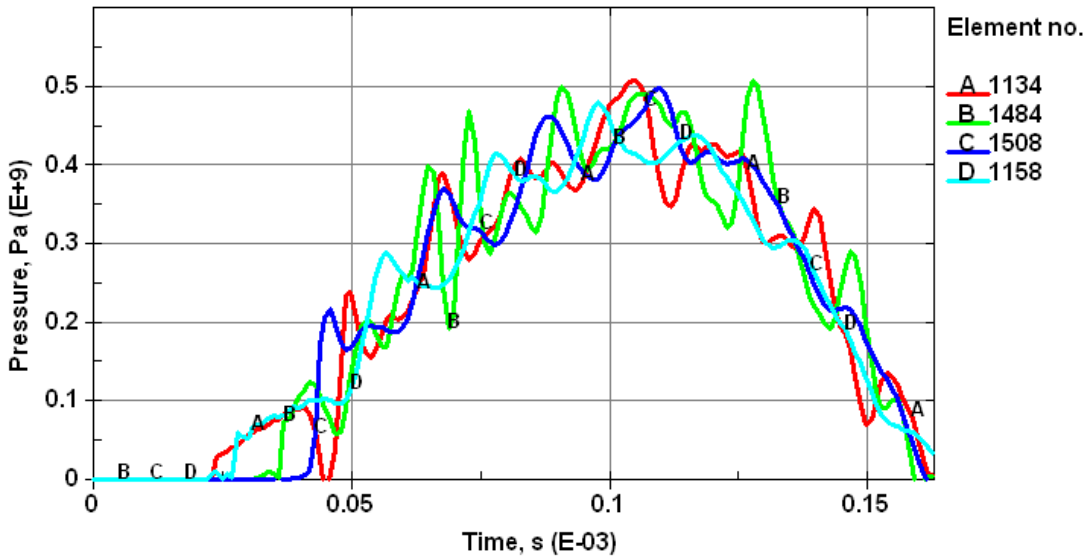


Рис. 2. Зависимость давления в полиуретане от времени

Чтобы сравнить результаты расчета с использованием LS-DYNA с расчетами, представленными в работе [11] при одинаковых исходных данных, стенки контейнера предполагались абсолютно жесткими.

Рассчитывалась эффективность преобразования импульсного магнитного давления в импульсную технологическую нагрузку, которая определялась отношением максимальных по времени усилий на торцах подвижного элемента

$$\eta_p = \frac{\max\limits_t [\int\limits_0^{R_2} \sigma_y(r,t) r dr]}{\max\limits_t p_{m1}(t) [\int\limits_0^{R_1} p_{m2}(r) r dr]},$$

где σ_y – определяемое давлением магнитного поля напряжение на поверхности подвижного элемента радиусом R_1 по направлению оси.

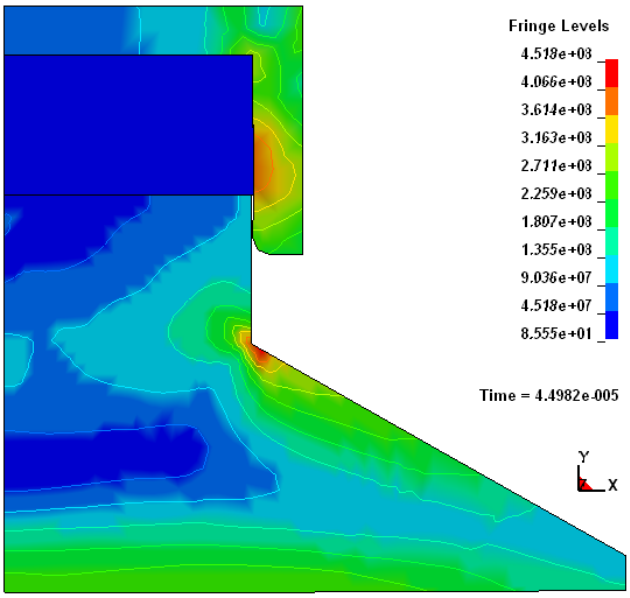


Рис. 3. Интенсивность тензора напряжений
для момента времени $t \cong 45$ мкс

Наибольшее влияние в переходных процессах оказывает безразмерная длительность импульса магнитного давления (отношение длительности импульса нагрузки T_0 к характеристическому времени всей системы)

$$\xi_T = T_0 / [2\pi(H+h)\sqrt{\rho / E_c}],$$

где E_c – эквивалентный модуль упругости всей системы, определенный выражением

$$E_c = (H+h) / \{ R_2^2 \int_0^{H+h} [R^2(y) E(y)]^{-1} dz \}.$$

Здесь функция $E(y)$ определяется соотношением:

$$E(y) = E,\ y < H;\ E(y) = E_e,\ H < z < H + h.$$

Функция $R(y)$ меняется от величины R_1 до величины R_2 по математическому закону, определяемому формой переходного участка механического концентратора. В частности, $R(y)$ линейна для концентратора с конусным переходным участком (рис. 1).

Величина ξ_T варьировалась за счет изменения периода магнитного давления T_0. Остальные параметры численного расчета при этом определялись значениями аналогичными для приведенного выше варианта расчета. Период магнитного давления варьировался в пределах $T_0 \in [10, 1300]$ мкс. Графики зависимости $\eta_p(\xi_T)$ показаны на рис. 4.

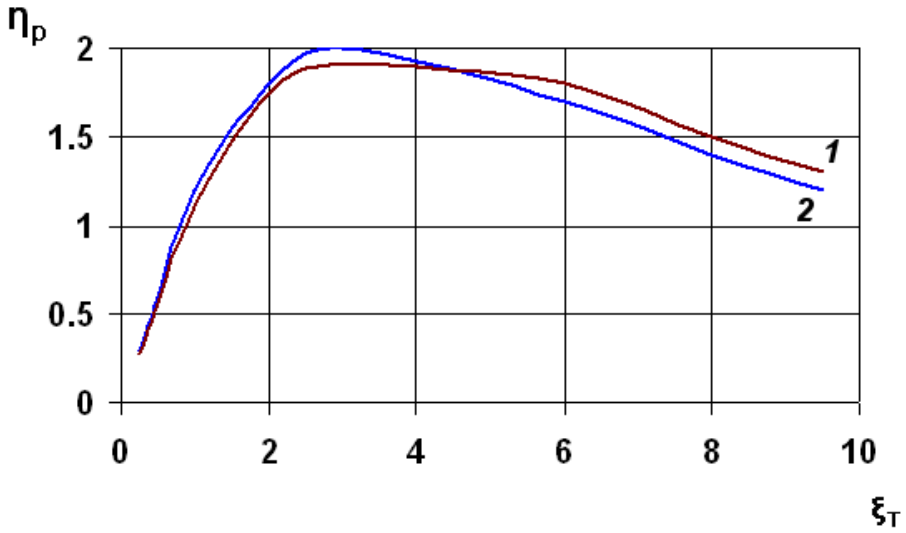


Рис. 4. Зависимость параметра эффективности преобразования импульсного давления от безразмерной длительности импульса магнитного давления: *1* – расчеты LS-DYNA, *2* – данные работы [11]

Можно отметить достаточно хорошую близость расчетных данных для двух весьма разных расчетных методик. Некоторое расхождение может объясняться погрешностью численных методов, лежащих в основе расчетных методик. Также следует отметить наличие максимума на графике $\eta_p(\xi_T)$, который соответствует технологическому устройству, обеспечивающему максимальное давление в полиуретане.

Таким образом, с применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA разработана методика компьютерного моделирования механической части технологического устройства для магнитно-эластоимпульсной штамповки. Выбраны безразмерные параметры, характеризующие процесс трансформации давления импульсного магнитного поля в давление полиуретана. Сделано тестирование расчетных данных при помощи дифференциально-разностной модели процесса. В результате обработки компьютерного эксперимента получена зависимость, позволяющая при проектировании технологического устройства обеспечивать максимальное давление в полиуретане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. US N3279228. Forming device and method / Brower D.F. General Dynamics Corp. Oct. 16, 1966.
2. Использование импульсных методов обработки металлов давлением в технологии машиностроения / Богоявленский К.Н. [и др.] // В кн. «Изготовление деталей пластическим деформированием», под. ред. Богоявленского К.Н., Камнева П.В., Л.: Машиностроение, 1975. – С. 401–414.

3. Мамутов В.С., Фейгин А.П. Магнитно-импульсная штамповка деталей приборов // Вопросы судостроения, серия «Технология судостроения». –1975. – Вып. 7. – С. 65–71.
4. Экспериментальное исследование процесса магнитно-импульсной штамповки деталей через промежуточную эластичную среду / Вагин В.А [и др.] // Вопросы судостроения, серия «Технология судостроения». –1975. – Вып.7. – С. 113–119.
5. Гиндин В.Б., Мамутов В.С., Орешенков А.И. Опыт изготовления деталей из листовых материалов методом магнитно-эластоимпульсной штамповки // Холодная штамповка в мелкосерийном производстве. – Л.: ЛДНТП. –1980. – С. 27–30.
6. Магнитно-импульсная штамповка с применением промежуточных эластичных сред / Богоявленский К.Н. [и др.] // Л.: ЛДНТП. – 1982, 36 с.
7. Мамутов В.С. Вырубка-пробивка особо тонколистовых металлов на магнитно-импульсной установке / Сборнике докладов «Современное машиностроение. Наука и образование», 3 Международная научно-практическая конференция, СПбГПУ, 2013 г. С. 867–874
8. Магнитно-эластоимпульсная вырубка-пробивка тонколистовых материалов / Богоявленский К.Н. [и др.] // КШП № 7. – 1984. –С. 12–14.
9. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. – 320 с.
10. Alexander V. Mamutov, Viacheslav S. Mamutov. Computer simulation of pulse pressure by mechanical consentrator // In International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering, Proceeding of SPIE Vol. 4627, p.239–242 (2001).
11. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Преобразование импульсного давления механическим концентратором с учетом волновых процессов // Доклады национальной академии наук Беларуси. Технические науки. 2002. – Т. 46. – № 3. – С. 115–119.
12. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.

V.S.Mamutov[1], A.V.Mamutov[2]

COMPUTER SIMULATION OF MECHANICAL PRESSURE CONCENTRATOR FOR ELECTROMAGNETIC STAMPING BY POLYURETHANE

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Dr. Alexander V. Mamutov, Ass. Prof. USA, Michigan

Abstract

The computer model of the mechanical part of the tool for the electromagnetic stamping by polyurethane is developed using LS-DYNA finite-element code. Using the developed simulation technique, a computer experiment is conducted. The relation between the efficiency of the transformation of the pulsed pressure of the magnetic field of the flat spiral inductor into the pulse pressure in polyurethane enclosed in the container and the complex non-dimensional parameters is received as a result of processing the computer experiment. The obtained relation enables the design of the optimal technological device that provides maximum pressure in polyurethane.

Key words: electromagnetic stamping by polyurethane, concentrator of mechanical pressure, computer simulation, finite-element LS-DYNA code, computer experiment, maximum pressure in polyurethane, designing technological device

REFERENCES

[1] Pat. US N3279228. Forming device and method / Brower D.F. General Dynamics Corp. Oct. 16, 1966.

[2] Ispolzovanie impulsnyih metodov obrabotki metallov davleniem v tehnologii mashinostroeniya / Bogoyavlenskiy K.N. [i dr.] // V kn. «Izgotovlenie detaley plasticheskim deformirovaniem», pod. red. Bogoyavlenskogo K.N., Kamneva P.V., L.: Mashinostroenie, 1975. – pp. 401–414. (rus.)

[3] Mamutov V.S., Feygin A.P. Magnitno-impulsnaya shtampovka detaley priborov // Voprosyi sudostroeniya, seriya «Tehnologiya sudostroeniya». –1975. – Vyip. 7. – pp. 65–71. (rus.)

[4] Eksperimentalnoe issledovanie protsessa magnitno-impulsnoy shtampovki detaley cherez promezhutochnuyu elastichnuyu sredu / Vagin V.A [i dr.] // Voprosyi sudostroeniya, seriya «Tehnologiya sudostroeniya». –1975. – Vyip.7. – pp. 113–119. (rus.)

[5] Gindin V.B., Mamutov V.S., Oreshenkov A.I. Opyit izgotovleniya detaley iz listovyih materialov metodom magnitno-elastoimpulsnoy shtampovki // Holodnaya shtampovka v melkoseriynom proizvodstve. – L.: LDNTP. –1980. – pp. 27–30. (rus.)

[6] Magnitno-impulsnaya shtampovka s primeneniem promezhutochnyih elastichnyih sred / Bogoyavlenskiy K.N. [i dr.] // L.: LDNTP. – 1982, 36 p. (rus.)

[7] Mamutov V.S. Vyirubka-probivka osobo tonkolistovyih metallov na magnitno-impulsnoy ustanovke / Sbornike dokladov «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie», 3 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, SPbGPU, 2013 g. S. 867–874

[8] Magnitno-elastoimpulsnaya vyirubka-probivka tonkolistovyih materialov / Bogoyavlenskiy K.N. [i dr.] // KShP # 7. – 1984. –pp. 12–14. (rus.)
[9] Belyiy I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov. Harkov: Vischa shkola, 1977. – 320 p. (rus.)
[10] Alexander V. Mamutov, Viacheslav S. Mamutov. Computer simulation of pulse pressure by mechanical consentrator // In International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering, Proceeding of SPIE Vol. 4627, pp.239–242 (2001).
[11] Zdor G.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S. Preobrazovanie impulsnogo davleniya mehanicheskim kontsentratorom s uchetom volnovyih protsessov // Dokladyi natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Tehnicheskie nauki. 2002. – T. 46. – № 3. – pp. 115–119. (rus.)
[12] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006, 498 p.

УДК 681.532.63

Б.Н. Поляков

К 50-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ ПЕРВОГО И САМОГО ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО В МИРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО БЛЮМИНГА 1300

Борис Николаевич Поляков, доктор технических наук, проф.,
США, г. Вашингтон,
E-mail: bpoliakov@hotmail.com

Аннотация

Дана инженерная оценка эпохального проекта XX века в металлургии и тяжелом машиностроении – создания самого высокопроизводительного в мире автоматизированного блюминга 1300 – в связи с 50-летием его пуска в эксплуатацию на Криворожском металлургическом комбинате, который с позиции достижений в автоматизации, новых научных, технологических и конструкторских решений сформировал основу для последующих автоматизированных прокатных станов и установок непрерывной разливки стали, а также проведения унификации оборудования почти всех обжимных станов Советского Союза при их реконструкции. Представлены основные участники проектирования блюминга, наладки автоматики и дальнейшего совершенствования оборудования и автоматических систем – ученые и конструкторы, технологи-прокатчики и научные сотрудники, талант, изобретательность, смелость, мужество и достижения которых дают все основания остаться в памяти широкой инженерной и научной общественности России.

Ключевые слова: прокатные станы, блюминг, автоматизация, управляющие вычислительные машины.

В период конца 50-х и начала 60-х годов прошлого столетия в бывшем Советском Союзе создавался уникальный, эпохальный и грандиозный проект самого высокопроизводительного в мире прокатного стана XX века – блюминга-автомата 1300, с комплексной системой автоматизации всех технологических процессов, механизмов и агрегатов, в том числе и с помощью управляющих вычислительных машин (УВМ). Этот проект по фундаментальности и мощи для отечественной металлургии, тяжелого

электро- и электронного машиностроения приближался к достижениям советской науки, технологии и техники в космонавтике, ракетостроении, в оборонной промышленности и успехам во многих теоретических и прикладных разделах различных научных отраслей.

Для того чтобы ощутить величие, масштабность, научную и практическую значимость огромной работы по автоматизации блюминга 1300, хотелось бы дать фрагментарную и краткую с инженерной точки зрения характеристику того экономического периода, в который создавался проект блюминга-автомата и проводились соответствующие научные исследования.

Период 50-60-х годов – это период интенсивного восстановления колоссальных разрушений в экономике, промышленности и социальных общественных структур после Второй мировой войны, и в то же время – это период “холодной войны” и экономического бума, расцвета науки и мирового значения достижений в промышленности, повышение оборонного потенциала и переход на самые передовые технологии и технику. Именно этот период характеризовался:

- формированием новых научных и промышленных отраслей, работающих на создание и совершенствование атомного оружия, ракетостроения и космонавтику;

- созданием научных основ и промышленных разработок первых отечественных аналоговых и цифровых вычислительных и управляющих машин;

- созданием и достижениями в разработках новых отраслей науки: вычислительной математики (численных методов), теоретической и прикладной механики; появлением и началом интенсивного развития теории программирования, прикладных численных методов в теории упругости и пластичности, математической теории оптимальных процессов и ее численных методов линейного и нелинейного программирования, прикладных разработок в теории управления и теории надежности, развитием и применением новых технологических процессов и машин в металлургии и машиностроении, вызванных потребностями космо-навтики и ракетостроения.

Под стать грандиозным достижениям в отечественной металлургии и тяжелом машиностроении – наиважнейших отраслях советской экономики – был выдвинут уникальный проект создания самого высокопроизводительного в мире прокатного стана параллельно с самыми большими шагающими экскаваторами и другими гигантами машиностроения. “Гигантизм” был не только ведущей идеей, но и содержанием экономической и идеологической политики Союза. Это логично и естественно, последовательно и адекватно корреспондируется с героической Победой советского народа во Второй

мировой войне, это соразмерное желание показать экономическую и научную мощь и преимущества страны и ее коммунистической идеологии, несомненную “победу” в соревновании с капиталистической системой в “холодной войне”. Это была искренняя и честная вера, элемент разума и совести большинства народа, в том числе многочисленного инженерного и научного корпуса.

Проект автоматизированного блюминга сконцентрировал все лучшие на тот период научные и конструкторские достижения в развитии технологических процессов в металлургии, тяжелом и энергомашиностроении, в электроприводе, электронике и вычислительной технике. По-существу, это была одна из первых самостоятельных конструкторских разработок советских инженеров, накопивших к тому времени почти 20-летний практический опыт в проектировании прокатных станов без оглядки на западные разработки.

Параллельно созданию проекта и конструкторским разработкам, а в дальнейшем и в совершенствовании оборудования и автоматических систем, проводились разнообразные теоретические и экспериментальные исследования. А создание таких гигантов техники, механическое и электрическое оборудование которых работает и эксплуатируется на предельных, технологически возможных режимах, в условиях интенсивной силовой, динамической и тепловой нагруженности, требует привлечения современных, самых передовых достижений в широком спектре научных отраслей.

Проектирование прокатного стана – это в высшей степени интеллектуально насыщенный процесс, когда реализуются достижения многих отраслей знаний. Прокатный стан – это сложнейший объект комплексного воплощения самых передовых научных и инженерных идей. Прокатный стан – это конечный и важнейший этап производства металла и металлургической продукции, создаваемый, как минимум, на ряд десятилетий, поэтому так важны прогноз на будущее, интуиция (как следствие большого и плодотворного опыта) и чувство перспективы, смелость, изобретательность и просто фантазия ученых и конструкторов, вкладывающих в свое детище на годы вперед самые передовые технологические и конструкторские решения, которые должны не утратить своей значимости на протяжении десятилетий эксплуатации этого объекта. И тем более, это очень важно в настоящее время, в период реализации принципиально новых, высоких технологий на макро- и микроуровнях, когда изменяются требования к выпускаемой продукции и ее качественные показатели: необходимо производство металла с заданными структурными и механическими свойствами, с обеспечением широкого диапазона

потребительских свойств, металла с памятью, с заданным уровнем напряженного состояния (например, остаточных напряжений) и т.п.

Создание проекта блюминга-автомата сконцентрировало и объединило энтузиастов техники многих научно-исследовательских, проектных и учебных институтов, промышленных предприятий различных министерств и ведомств, замечательных ученых и талантливых инженеров широчайшего диапазона знаний: технологов-прокатчиков, конструкторов-механиков и электриков, конструкторов-технологов, электромехаников, электронщиков, математиков и программистов, специалистов по прочности и надежности и многих других специальностей, которых сближали не только высокие человеческие качества, но и общая увлеченность абсолютно новым (и даже существенно престижного, государственного значения) интересным делом.

Принимая во внимание, что в октябре 2014 г. исполнится 50 лет со дня пуска в эксплуатацию первого автоматизированного блюминга 1300 на Криворожском металлургическом комбинате, цель статьи заключается в том, чтобы хотя бы перечислить (упоминая и поминая) тех неизвестных для многих и забытых замечательных специалистов-энтузиастов, которые значительную часть своей творческой инженерной жизни посвятили этому проекту и которые искренне верили в успех и объективно гордились полученными достижениями (и в последующие годы способствовали их дальнейшему развитию), чтобы инженерной и научной общественностью не были забыты эти незаменимые (!) люди (что не было принято в “коммунистическом” сообществе Союза при абсолютно равнодушном отношении “государственных” руководящих лиц). Ибо непростительно забывать ушедших великолепных специалистов и замечательных людей, их талант, идеи, новаторство, мужество и большие достижения, обеспечившие славу и гордость своей стране.

Перечислю непосредственных участников основных организаций создания и реализации проекта. Прежде всего, это мои коллеги, работники Уралмашзавода: Георгий Лукич Химич – главный конструктор прокатного оборудования, первый инженер проекта блюминга-автомата Кондратий Никитич Валугин, Константин Варфаломеевич Корякин, Олег Петрович Соколовский (преемник К.Н. Валугина), Г.Н. Краузе, В.А. Быков, А.Г. Семовских, С.Н. Красносельских, А.А. Ермаков, Ю.П. Панов, Б.Я. Орлов, Г.И. Белоглазов, Т.Г. Гандыбина, Г.Я. Фомина, М.И. Бакунин, В.С. Щепеткин, П.А. Антонов, Н.К. Манкевич, Л.К. Грабовский, Ю.И. Смирнов, С.И. Уральский, М.И. Анфимов, В.Е. Бушуев, А.И. Загородний, А.А. Яровой, Л.Г. Ярославцев, Ю.Н.Колесов, Т..М. Перлова, Л.А. Фомина, М.И. Калашникова, Н.В. Еремеев, И.Л. Ронин, Ю.Д. Макаров, С.Ф.Аникеев и

многие, многие другие замечательные инженеры-конструкторы и интересные личности.

От ВНИИ электропривода (Москва): Николай Афанасьевич Тищенко (“Отец” советского электропривода), Азар Григорьевич Бирфельд, В.А. Святославский, Ф.Г. Патрунов, С.Н. Байбикова, Г.И. Лызлов, Ю.П. Рыбьев, Б.А. Степанов, Ю.С. Чинаров и многие другие.

От ВНИИ электромеханики (Москва) – З.Б. Вартанов и другие.

От СКБ треста “Уралмонтажавтоматика”(СКБ УЧМА, г. Свердловск): Э.Ю. Гутников, О.Н. Мельников и другие.

От Уральского политехнического института (сейчас технического университета, УГТУ-УПИ): проф. В.А. Тягунов (создатель первой математической модели и методики расчета оптимальных технологических режимов и параметров прокатки на высокопроизводительном блюминге), доц.И.Н. Петров, проф. И.Я. Тарновский, С.Л. Коцарь, В.А. Чичигин, В.А. Воскресенский, О.С. Лехов, В.В. Харламов, Ю.М. Багазеев и многие другие талантливые ученые, экспериментаторы и исследователи.

Все вышеуказанные[1] ученые, конструкторы, инженеры и научные сотрудники внесли весомый вклад в создание и дальнейшее совершенствование технологий, оборудования и автоматических систем блюмингов 1300. Им присущи удивительное вдохновение и энтузиазм, ибо на самом деле “радость познания истины – в природе человека, а истина вдохновляет и бодрит”.

Для технологического оборудования блюмингов 1300, начиная с кольцевой слиткоподачи, были спроектированы локальные системы жесткого программного управления (2-я ступень) и системы на основе УВМ “ВНИИЭМ-3” (3-я ступень). Системы программного управления были построены на бесконтактных логических элементах – магнитных усилителях – и даже на такой аналоговой элементной базе, слишком далекой от современных быстродействующих чипов и микропроцессоров, получили выдающиеся результаты.

Первые три блюминга-автомата были спроектированы для Криворожского (КрМК), Челябинского (ЧМК) и Западно-Сибирского меткомбинатов (ЗСМК). Но именно на КрМК выпала доля первопроходца и инженерного полигона для наладки, освоения и дальнейшего совершенствования первой в Советском Союзе (наверное и в мире)

[1] Искренне прошу прощения у тех многочисленных коллег и товарищей, которых я не назвал в приведенном перечне. Откровенно и искренне объясняю, что это ТОЛЬКО по забывчивости за давностью лет.

комплексной системы автоматизации высокопроизводительного прокатного стана.

Многие творческие люди, талантливые инженеры, руководители комбината и цеха “Блюминг-2” внесли громадный вклад в организацию, внедрение и доводку автоматических систем. Это В.Д. Гладуш (впоследствии – директор комбината), Н.Г. Ильченко, О.В.Филонов, А.Д. Фисенко, В.Т.Ладуба, М.И.Шаропад, И.Т. Гераймович (впоследствии – руководитель Криворожского отделения ВНИИэлектропривод), И.И. Самарский, Э.И. Востриков, В.Т.Крымский, В.Л Гудов, Н.Н.Пунтус, В.Д. Дымчук и многие, многие другие.

Техническая задача комплексной автоматизации, тем более с УВМ, и создания блюминга-автомата, по-существу несущая в себе для периода 50-60-х годов определенную долю авантюризма, была в принципе решена. Несмотря на объективные трудности и часто даже искусственно создаваемые препятствия, на блюминге 1300 КрМК были получены выдающиеся результаты, а именно: впервые в Советском Союзе и в мировой практике были созданы работоспособные автоматические системы жесткого программного управления (с возможностью кратковременного вмешательства операторов) для всей технологической линии, (в том числе и участка рабочей клети) высокопроизводительного обжимного стана.

Было убедительно показано и доказано, что при высоком уровне организации технологии и производства в целом, обеспечивающим стабильную подачу качественно нагретых слитков, системы жесткого программного управления могут реально обеспечить высокий уровень часовой производительности, эквивалентной годовой производительности блюминга в объеме 5,5-5,7 млн. тонн по всаду. В результате проведения огромной и трудоемкой работы по наладке, доводке и совершенствованию оборудования и автоматических систем последние были приняты в опытно-промышленную, а некоторые – в промышленную эксплуатацию в 1974[2] г.

Как результат выполнения широкого спектра научно-исследовательских работ по совершенствованию автоматических систем впервые в металлургии, в том числе и в прокатном производстве были созданы и внедрены:

- программная система автоматизированного сбора и обработки с помощью УВМ технологической информации, системы диспетчеризации и учета и ряд диагностических систем;

- системы программного управления (СПУ) по защите механооборудования от высоких динамических нагрузок и перегрузок,

[2] Если за давностью лет я допустил некоторую неточность, то прошу меня извинить.

повышающих их долговечность, система защиты главного привода от пробуксовок, СПУ кантователем и манипулятором, были показаны возможность и эффективность подобной системы и для ножниц.

Высокая концентрация интеллекта в коллективе ученых и инженеров различных специальностей, сформировавшемся на блюминге 1300 КрМК при проведении пусконаладочных, научно-исследовательских и конструкторских работ, обеспечила успешное решение возникающих задач и проблем на основе современных научных методов. Так впервые в мировой практике в прокатном производстве и в металлургии были применены:

- принципы системного анализа для построения математической модели процесса прокатки на блюминге и поиска их оптимальных параметров;

- методы математической теории оптимального управления для наладки систем регулирования приводами и автоматических систем, а также на их основе с использованием методов линейного и нелинейного программирования впервые была создана программа построения оптимальных технологических режимов прокатки на реверсивных, а впоследствии и на непрерывно-заготовочных станах;

- разнообразные методы теории вероятностей и математической статистики на уровне теории случайных величин и случайных процессов, реализованные в виде программ, версия которых для ЭВМ “Урал-4” являлась одним из первых в Союзе программных обеспечений по статистике; программы были успешно применены при проведении научных и экспериментальных работ, для построения математических моделей автоматизируемых процессов и объектов, идентификации их параметров и оценки чувствительности, достоверности и точности, при выявлении наиболее существенных информативно-управляющих технологических параметров и уставок управления и, в конечном итоге, для построения алгоритмов управления объектами, автоматизации с помощью УВМ;

- строгие методы математического, в том числе и статистического моделирования, статистической теории распознавания образов для анализа, синтеза и отладки параметров структур систем управления и автоматизации.

Применение методов современной научной методологии и последующие конструкторские разработки позволили усовершенствовать и повысить прочность и надежность механооборудования, быстродействие электроприводов и работоспособность автоматических систем, а в дальнейшем унифицировать конструкции деталей, узлов и механизмов комплекса механо- и электрооборудования обжимных станов.

Многие принципиальные положения и инженерные разработки по автоматизации, реализованные и отлаженные на блюминге 1300, были положены в основу (с учетом и негативного опыта) автоматизации других

прокатных станов (на основе современной цифровой элементной базы), в дальнейшем спроектированных и изготовленных Уралмашзаводом (например, универсально-балочный стан НТМК и др.), а также и для машин непрерывной разливки стали. Создание комплексной системы автоматизации блюминга 1300 с УВМ было первым промышленным опытом автоматизации, грандиозной по масштабам страны школой и прообразом для автоматизации последующих металлургических объектов.

Проект создания автоматизированного блюминга, по моему мнению, увенчался успехом, однако он ярко и наглядно показал объективные социально-психологические недостатки организации труда на советских предприятиях, слабую восприимчивость и даже отторжение всего нового и передового в промышленности с плановой экономикой. Но и было показано, что громадные достижения советских ученых и инженеров, их высокий профессионализм, творческий и научный потенциал, возможности тяжелого машиностроения и металлургии, энергетической и электронной промышленности уже в период 60-70-х годов в состоянии (в принципе!) создать высокопроизводительные и автоматизированные прокатные станы.

Таким образом, несмотря на продолжающееся уже на протяжении двух веков существенное отставание российской экономики от наиболее развитых стран Европы и Америки по важнейшему показателю жизненного уровня – производству валового внутреннего продукта на душу населения[3] – в период 50-60-х годов Советский Союз занимал лидирующее положение во многих отраслях науки, технологии и промышленности, что подтверждается не только выдающимися достижениями в ракетостроении и космонавтике, но и впечатляющими успехами в металлургии, машиностроении и автоматизации – были созданы и реализованы уникальный проект самого производительного в мире прокатного стана – блюминга-автомата 1300 и установки непрерывной разливки стали, что убедительно подтверждает высокий уровень научного, инженерного, технологического и промышленного потенциала нашей страны в период 50-х -80-х г.г. прошедшего столетия.

Вдохновители и создатели этого эпохального проекта середины XX-го столетия – вышеперечисленные и многие другие талантливые учёные, креативные конструкторы и инженеры широчайшего диапазона специальностей – это Гордость отечественных металлургии и машиностроения! Вклад ИХ в инженерную науку огромен! ВЕЧНАЯ ИМ СЛАВА!

---

[3] Е.Т. Гайдар. Экономический рост и человеческий фактор. Журнал “ Вестник Европы”. 2004. № 9.

B.N.Poliakov

TO 50TH ANNIVERSARY CREATIONS OF THE FIRST AND THE MOST HIGH-PRODUCTIVE IN THE WORLD OF THE AUTOMATED BLOOMING 1300

Abstract

The engineering assessment of the epochal project of the 20th century in metallurgy and heavy mechanical engineering – creating of the most high-productive in the world of the automated blooming 1300 – in connection with the 50th anniversary of its putting into operation on Krivoroshskom metallurgical complex, which from a position of achievements in the automation, new scientific, technological and design decisions has generated the basis for the subsequent automated rolling mills and installations continuous casting steel, as well as carrying out of unification of the equipment for almost all blooming mills of the Soviet Union at their reconstruction is given. Presented are the main participants in the design of blooming mill automatic control, adjustment and further improvement of the equipment and automatic systems, scientists and designers, technologists, distributors and researchers, talent, creativity, courage and achievements which give every reason to stay in the memory of the engineering and scientific community of Russia.

Keywords: rolling mills, blooming, automation, operating computers

ТРАНСПОРТНЫЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 622.24.054

А.В. Ащеулов[1], А.А. Лобачев[2], А.Е. Хорошанский[3], А.А. Шестопалов[4]

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАШИН № 1

[1]Александр Витальевич Ащеулов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-77-34
E-mail: studgidro@gmail.com

[2]Александр Александрович Лобачев, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 89214427703
E-mail: lobachev.aleksandr.mmf@gmail.com

[3]Артем Евгеньевич Хорошанский, ген. директор
ЗАО «ПромТехИнвест»
Тел.: (812) 591-77-55
E-mail: director@pti.spb.ru

[4]Александр Андреевич Шестопалов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-67-26
E-mail: shestop-37@yandex.ru

Аннотация

Рассматриваются современные механизмы и приводы буровых машин. Формулируются требования и пути совершенствования отечественных систем верхнего привода. Излагаются научные основы, которые могут быть использованы при решении новых задач.

Ключевые слова: буровая установка, система верхнего привода, эффективная мощность, нагрузка, к.п.д.

Настоящее время характеризуется периодом, имеющим тенденцию снижения объемов производства отечественной машиностроительной

продукции (военная техника не рассматривается). Но есть машины, которые нужны нашей стране, потому что они «кормят» всю Россию. Это буровые установки (БУ), используемые в нефтегазовой отрасли. Вот почему авторы назвали их машинами № 1.

Современная буровая установка – это сложный комплекс различных по назначению механизмов, сооружений, приборов, инструмента, с помощью которых осуществляются все процессы, связанные с бурением скважин [1, 2].

Бурение – процесс разрушения горных пород с помощью бурового оборудования. **Способы бурения** выбираются в зависимости от различных условий производства и назначения скважины. Выбор инструмента для разрушения породы определяется условиями производства и физико-механическими свойствами горной породы. Буримость горной породы характеризуется механической скоростью бурения – значением углубления скважины за единицу времени.

Рассматриваемое нами вращательное механическое бурение, применяется для пород с различными категориями прочности по бурению. Оно характеризуется тем, что резец под воздействием осевого усилия подачи и крутящего момента движется поступательно на забой, отделяя по винтовой линии срез стружки, имеющую некоторую толщину. Удаление продуктов бурения из забоя производится различными способами, в том числе и с помощью водных растворов путем прокачки их насосами высокого давления [5, 6].

Преимущества вращательного бурения - это непрерывность процесса, обеспечивающая высокую производительность. При широком диапазоне изменения прочностных свойств буримых пород и установленной мощности главного двигателя, число оборотов рабочего органа – ротора изменяется также в широком диапазоне. Это предъявляет определенные требования к приводу таких механизмов. Регулирование частоты вращения бурового инструмента внутри установленного диапазона может быть ступенчатым и бесступенчатым. Количество рабочих скоростей вращения устанавливается из условия более полного использования приводной мощности по всей глубине скважины. Полное использование мощности главного двигателя обеспечивает достижение высоких технико-экономических показателей буровой установки. Оптимальное число скоростей вращения для бурения алмазным и твердосплавным инструментом обычно составляет не менее 4-6 [3, 8].

Применяемые для механизмов роторов БУ системы бесступенчатого регулирования, позволяют работать в режиме полного использования мощности двигателя. При этом снижается динамика бурильной колонны вследствие плавного изменения скорости вращения, улучшаются условия приработки новых алмазных коронок, обеспечивается более легкая и

быстрая настройка привода ротора на оптимальный режим бурения. Бесступенчатое регулирование частоты вращения ротора увеличивает производительность глубокого бурения, обеспечивая увеличение механической скорости бурения на 30%, а рейсовой – на 20% [3]. Плавно регулируемый привод позволяет создавать автоматизированные системы управления буровым оборудованием, обеспечивающие рациональные режимы бурения и исключающие ошибки оператора [7].

Момент сил сопротивления бурению на приводном валу ротора существенно зависит от подачи режущего инструмента, влияющей на толщину срезаемой стружки. Для подачи бурильной колонны на забой используются грузоподъемные лебедки, имеющий собственный привод, который также выполняется регулируемым и, как правило, бесступенчатым.

Кроме ротора, лебедки и системы охлаждения и промывки бурового инструмента на БУ имеют место различные вспомогательные механизмы для выполнения операций с буровыми трубами. Это важные механизмы с достаточно сложными конструкциями, но со значительно меньшим энергопотреблением.

В конце восьмидесятых, начале девяностых годов прошлого столетия в технологии бурения и конструкции БУ произошла своего рода революция. Традиционная конструкция ротора, расположенная на стационарном рабочем столе БУ, уступила место, так называемым системам верхнего привода (СВП), у которых исполнительный двигатель механизма ротора, вместе с вертлюгом - приводным валом, через который подается промывочная жидкость, подвешен на штропах на траверсе талевого блока лебедки. В новой технологии отсутствует переходник (квадрат) между вертлюгом и буровыми трубами, который нужно было ставить/снимать для наращивания очередной буровой трубы. Новая технология существенно увеличила производительность процесса бурения. Авторами этой технологии являются американские инженеры. В настоящее время на эксплуатационных объектах нашей страны еще можно встретить БУ, работающие по старой технологии, но можно с уверенностью утверждать, что СВП все больше и больше доминируют. Начиная с 2005 года по настоящее время, происходит бурное развитие конструкций СВП, появляются новые производители этого оборудования, оформляются многочисленные патенты. Этот кластер машиностроительной отрасли активно развивается. Любопытно было установить, что между появлением первых патентов в этой области и выходом первых промышленных конструкций на зарубежных предприятиях прошло не более десяти лет. СВП становиться товаром, отдельной продукцией, специальной машиной, которая может использоваться с различными типами БУ: стационарными, мобильными,

морскими и др. [9]. СВП является сложной, мощной, блочно-модульной, компактной конструкцией со своим дизайном. В СВП могут использоваться механические, электрические, гидравлические передачи, а также системы диагностики (мониторинга) и управления. СВП по праву должны быть отнесены к грузоподъемным механизмам, в которых совмещаются поступательные и вращательные движения с большими нагрузками. На основании вышесказанного, СВП заслуживают пристального внимания инженеров и исследователей машин и механизмов, тем более, что они сегодня востребованы отечественной промышленностью.

В 2003 году петербургская промышленная кампания ЗАО «ПромТехИнвест» совместно с ОАО «Электромеханика» выпустила первый в России верхний силовой привод. В настоящее время в номенклатуре этих компаний уже шесть типоразмеров приводов и активно разрабатываются новые проекты. На рис. 1 представлено фото одного из приводов, а в таблице приведены общие технические характеристики продукции ЗАО «ПромТехИнвест».

Рис. 1. Фото общего вида системы верхнего привода

Основным параметром СВП является грузоподъемность. Именно по грузоподъемности потребитель выбирает СВП для определенной БУ. Другим важным параметром является установочная мощность главного двигателя, который является источником энергии для исполнительного двигателя СВП. Главный двигатель выполняется в агрегатном исполнении и располагается на земле, рядом с буровой вышкой (на фото не показан), от которого по специальным магистралям, в зависимости от типа передачи, энергия подается на СВП.

Таблица

Общие технические характеристики систем верхнего привода отечественного производства ЗАО «ПромТехИнвест»

№ п/п	Параметры	ВГС-80	ВГС-100	ПВГ-2000	ПВГ-2000Р	ПВЭГ-225	ПВЭГ-250
1	Грузоподъемность максимальная, т	80	100	160	160	225(250)	250
2	Главный двигатель	дизель	дизель	дизель	дизель	электродвигатель	электродвигатель
3	Мощность главного двигателя, кВт	100	100	243	243	250	250
4	Двигатель привода ротора	Высокомоментный мотор с полым валом	Высокомоментный мотор с полым валом	Высокомоментный мотор с полым валом	Два высокооборотных мотора с редуктором	Высокомоментный мотор с полым валом	Высокомоментный мотор с полым валом
5	Крутящий момент, кН*м						
	- рабочий	8,8 при 80 об/мин	8,8 при 80 об/мин	19,6 при 80 об/мин	19,6 при 80 об/мин	35 при 60 об/мин	45 при 50 об/мин
	- максимальный (режим раскрепления труб на 1,5-2 об/мин)	10,8	9,8	28,4	26,5	48,1	49,05
6	масса, кг	1602	1486	3750	3700	4500	5300
7	Габаритные размеры	2620x725x825	2744x660x581	4275x990x1140	4215x990x1140	5500x1400x1430	5600x1350x1324

Выходным кинематическим параметром привода является частота вращения вертлюга.

У продукции ЗАО «ПромТехИнвест» частота вращения вертлюга изменяется бесступенчато от 0 до 100 об/мин (номинальной частотой вращения при бурении считается 60-80 об/мин). В зависимости от типа и конструкции передачи СВП, в зависимости от к.п.д. передачи, приводы можно представлять по величине крутящего момента на вертлюге. В таблице 1 представлены значения крутящих моментов на вертлюге для двух скоростных режимов: на номинальной частоте вращения бурения и на минимальной частоте при развинчивании (раскреплении) труб. Значения крутящих моментов производитель декларирует для потребителя, при этом надо иметь в виду, что это не расчетные, а подтвержденные измерениями в эксплуатации значения. Не менее важными параметрами для потребителя являются также масса и габаритные размеры приводов, поскольку масса привода влияет на грузоподъемность грузовой лебедки, а размеры привода - на рабочие зоны БУ. В конструкциях СВП ЗАО «ПромТехИнвест» в качестве главных двигателей используются и двигатели внутреннего сгорания авто-тракторного типа, и асинхронные электродвигатели. А в качестве исполнительных двигателей привода ротора используются гидромоторы, причем в основном высокомоментные с полым валом, которые передают вращение на вертлюг непосредственно, без редуктора. Есть модификации приводов с редуктором и низкомоментными гидромоторами. В целом, эти СВП имеют комбинированные гидро-электро-механические передачи. Изготовителем изучаются вопросы применения в качестве исполнительных двигателей ротора современных электродвигателей [7].

Кроме ЗАО «ПромТехИнвест» в РФ также изготавливаются отдельные типоразмеры СВП, но по объемам продаж петербургский производитель является лидером. Лидерство достигается за счет грамотной технической политики, которая опирается на лучший российский уровень машиностроения и непрерывную связь с учеными и специалистами ведущих НИИ и университетов Санкт-Петербурга, в частности СПбГПУ (ИММиТ, каф.ТТС).

Рассматривая технические требования, следует отметить следующие особенности СВП:

- системы характеризуются большой протяженностью магистралей передачи энергии до 50м и должны быть оптимальными по к.п.д.;
- системы имеют дистанционное пропорциональное электроуправление частотой вращения выходного вала в большом диапазоне, а требования эксплуатации ставят на будущее задачи увеличения частоты вращения до 200 об/мин;

- используется самое современное отечественное (главные двигатели, металлоконструкции) и импортное оборудование (электроника, насосы, гидромоторы), к которому предъявляются высокие требования по долговечности (ресурс 5000-7000 часов), безотказности, техническому обслуживанию и ремонтопригодности в условиях отдаленности баз механизации (на выполнение гарантийных обязательств дается не более 20 дней);
- назначенный срок службы СВП должен быть не менее 7 лет;
- высокие требования к алгоритму управления, который должен согласовываться с алгоритмами управления других механизмов БУ;
- сложная конструкция вертлюга - полого вала, по которому подается промывочная жидкость от водяной гидросистемы, в которой может быть давление до 25МПа;
- особые требования по безопасности, выражающиеся в повышенных требованиях по взрывозащите В-1г, пылевлагозащищенности IP54, климатическом исполнении категории ХЛ1, уровню шума на пульте управления не выше 80дБа;
- специальные требования к способам транспортировки и хранения в сложных условиях вновь осваиваемых природных территорий;
- жесткие требования к лакокрасочным материалам, согласно которым покрытия не должны повреждаться в течение всего гарантийного срока.

Анализ конструкций и технических характеристик СВП ЗАО «ПромТехИнвест» показывает, что они в целом соответствуют современным требованиям, но имеются вопросы, которые необходимо будет решать в будущем. Так прямое сравнение характеристик ПВЭГ-250 и привода HMI 475 (250т) фирмы TESCO США показало, что отечественная конструкция уступает по массе, габаритным размерам и к.п.д. В этой связи, перед отечественным производителем стоят следующие задачи:

- поиск оптимальной структуры привода;
- повышение к.п.д. привода;
- применение более надежных высомоментных гидромоторов;
- расширение диапазона частоты вращения ротора и повышение рабочих значений крутящего момента, особенно, обеспечение силового резервирования на режимах раскрепления труб;
- создание систем автоматического регулирования частоты вращения в зависимости от изменения крутящего момента на вертлюге;
- поиск альтернативных типов исполнительных двигателей ротора, в частности, например, применение современных электродвигателей;
- поиск новых материалов.

Решение этих сложных задач возможно на основе использования не только конструкторских методов, которые сегодня превалируют у производителя, но и расчетных методов теории построения приводов машин. В основе этой теории лежат научные работы профессоров СПбГПУ А.И. Тархова, И.Г. Ефимова, А.В. Ащеулова [8,10,11,12]. Для СВП необходимо адаптировать известные методы рационального использования мощности главного двигателя, методы динамических расчетов, методы расчета вероятности безотказной работы, методы САПР, методы использования эксплуатационного мониторинга в методиках инженерных расчетов, методы выбора технических решений на основе теории экономических рисков и др. При адаптации этих методов необходимо рассматривать СВП не просто как некую передачу, а именно передачу основного механизма бурения, с рассмотрением буровых режимов, с приложением внешних нагрузок со стороны буровой колонны БУ, буровой инструмент которой взаимодействует с грунтом.

Решение задачи рационального использования мощности главного двигателя сводиться к составлению баланса мощности относительно эффективной мощности $N_{e\text{э}}$:

$$N_{e\text{э}} = N_{\Sigma\max} + \Delta N_1 + \Delta N_2, \qquad (1)$$

где $N_{\Sigma\max}$ – максимальное значение общей полезной мощности, реализуемой на рабочем органе и других исполнительных механизмах; ΔN_1 – доля эффективной мощности, расходуемая на компенсацию потерь энергии в приводе; ΔN_2 - доля эффективной мощности, рассчитанная из условия изменения энергетических возможностей силовой установки при динамическом приложении внешней нагрузки.

Анализируя уравнение (1) можно отметить, что величина общей полезной мощности $N_{\Sigma\max}$ является сложной функцией прочностных свойств разрушаемой породы, параметров рабочего органа (бура), производительности и режима работы. Чем больше $N_{\Sigma\max}$, тем, при прочих равных условиях, выше техническая производительность бура. Можно установить предельные значения полезной мощности $N_{\Sigma пред}$, при которой, вне зависимости от грунтового фона эксплуатации, техническая производительность будет определяться только возможностями водяного насоса по удалению разрушенной породы, то есть станет во всех случаях максимально возможной.

Однако, из-за большой вариации прочностных свойств горной породы, в которых приходиться эксплуатировать БУ, реализация условия $N_{\Sigma\max} = N_{\Sigma пред}$, технически невозможна и экономически нецелесообразна. Поэтому возникает вопрос отыскания рациональной

величины полезной мощности $N_{\Sigma\max} = N_{\Sigma рац}$ и выбора скоростного режима бурения, обеспечивающего наиболее эффективное её использование. При этом и другие доли мощности ΔN_1 и ΔN_2 должны быть оптимальны по условию: $\Delta N_1 \to \min$ и $\Delta N_2 \to \min$.

Для облегчения последующего анализа можно преобразовать выражение (1) к более удобному виду:

$$N_{еэ} = K_N \cdot N_{\Sigma\max}, \qquad (2)$$

где K_N – коэффициент, который представляет собой долю потерь полезной мощности. Его можно представить как произведение, каждый множитель которого учитывает потери той или иной доли передаваемой энергии:

$$K_N = a_N \cdot в_N, \qquad \text{где } a_N = 1 + \sum_{i=1}^{n} (1-\eta_i)\tilde{N}_i \qquad \tilde{N}_i = \frac{N_i}{N_{\Sigma\max}}$$

Здесь η_i – КПД i – го механизма привода; Ni – мощность, передаваемая i – м механизмом привода при реализации полезной мощности $N_\Sigma = N_{\Sigma\max}$.

$$в_N = 1 + \Delta\tilde{N}_2 \qquad \Delta\tilde{N}_2 = \frac{\Delta N_2}{N_{\Sigma\max}}$$

Ранее отмечалось, что привод БУ представляет сложную разветвленную систему со смешанными связями между отдельными $i-ми$ передаточными механизмами. Тогда непосредственное исследование величины коэффициента a_N при анализе и синтезе конструктивных вариантов привода сопряжено с большими неудобствами. Поэтому выражение этого коэффициента можно упростить. Учитывая, что основным потребителем энергии на БУ является ротор (до 85% от общей потребляемой мощности $N_{\Sigma\max}$), представляется корректным при определении $N_{еэ}$ принимать приближенное выражение:

$$a_N \approx 2 - \eta_p \qquad (3)$$

где η_p - КПД привода рабочего органа на расчетных режимах работы, когда $N_{еэ} = N_{\Sigma\max}$.

После преобразований имеем:

$$K_N \approx (2-\eta_p)(1+\delta\breve{\text{N}}) \qquad (4)$$

При такой замене привод БУ условно представляется «цепной» линейной моделью, в которой потери энергии в остальных ветвях привода как бы приводятся к потерям энергии главного его потребителя – ротора. Такой подход может быть приемлем для дальнейшего исследования определения эффективной мощности $(N_{еэ})$ СВП БУ.

Так в исследованиях и расчетах различных передаточных механизмов, трансмиссий и приводов в целом, как правило, ограничиваются определением потерь энергии при установившемся движении, полагая , что общий КПД (η_Σ) равен статическому КПД $\eta_\Sigma \approx \eta_e$, где (η_e) - статический КПД.

Однако, существует понятие динамического КПД «η_o» и отмечаются факты [8,10] ощутимого снижения величины полезной мощности из-за резкого возрастания потерь энергии при колебательном характере внешней нагрузки. Эта «динамика» является неотъемлемой частью и в работе БУ. Поэтому представляется целесообразным провести соответствующие оценки динамического КПД БУ (СВП), полагая, что $\eta_\Sigma = \eta_e \cdot \eta_o$.

При этом исследование коэффициента « K_N » можно свести к задаче определения параметра $\Delta\tilde{N}_2$. Так установлено[1, 9], что мощность, расходуемая приводом СВП определяется средним уровнем и переменными составляющими сопротивления на рабочем органе. Чтобы получить количественные оценки параметра $\Delta\tilde{N}_2$, характеризующего степень использования мощности силовой установки, необходимо исследовать динамическую модель механической системы СВП в условиях приложения к ней возмущающих и управляющих воздействий, отражающих реальную картину процесса бурения.

Оценка влияния динамических параметров механической системы БУ на нагруженность этой системы, в том числе и на колебательность нагрузки и частоты вращения выходного звена силовой установки удобно отображать случайной функцией времени, пути и скорости [4, 8]. Здесь временные связи характеризуют вариацию прочностных свойств породы, а связи по пути и скорости - особенности процесса бурения (процесса стружкообразования). С учетом вышесказанного, для дальнейших исследований предлагается использовать математическую модель нагрузки на рабочем органе, предложенную авторами [5, 8]. В соответствие с этой моделью, нагрузка отображается случайной нестационарной функцией времени в виде:

$$X(\mathrm{t,h}) = \mathrm{L}_1(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{L}_2(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{L}_3(\mathrm{t}), \qquad (5)$$

где $L_1(t) = (1 + CSin2\pi t / t_0); \mathrm{L}_2(t) = A(\mathrm{t})[1 + \chi_{cp}(\mathrm{t})]; \mathrm{L}_3(\mathrm{t}) = 1 + l(t, h)$.

Здесь C – некоторая константа для данного комплекса (породо-разрушающий инструмент – грунт), определяемая видом и конструкцией рабочего органа; $\mathrm{A(t)}$ – случайная функция времени, ординаты которой распределены по нормальному закону, а коэффициент вариации зависит только от прочности породы; t_0 – период процесса; $\chi_{cp}(\mathrm{t})$ – нормированные стационарно случайные флуктуации; $l(t,h)$ – некоторая функция толщины

стружки h грунта, центрированная относительно нулевого математического ожидания.

При этом можно считать, что при проведении оценки качества привода СВП как системы, функции $L_1(t)$ и $L_2(t)$ – соответственно формируют скорость резания Vр и подачу Vп инструмента, а $L_3(t)$ – некоторая функция, учитывающая изменения толщины стружки. Если предположить, что амплитуды функции $l(t,h)$ относительно малы, то зависимость (5) можно упростить и представить в виде суммы такого вида:

$$X(t,h) \approx X(t,h_0) + x(t;\delta h) \qquad (6)$$

Представленная модель вида (6) широко применяется при исследованиях горных и землеройных машин [1, 5, 8].

Таким образом, пути совершенствования отечественных СВП БУ представляются реализуемыми. Оценить качество проектируемого СВП можно на основе совместного решения представленных аналитических выражений. С одной стороны они характеризуют связь между усилием на режущем элементе рабочего органа и толщиной стружки $h(t)$, которую он срезает, а с другой стороны толщина стружки формируется кинематическими характеристиками: скоростью резания (обороты ротора) и скоростью подачи инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы.– М.: Недра, 1988.– 499с.
2. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин.– Учеб. пособие для вузов.– М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 632с.
3. Белкин Ю.Г. Применение объемной гидропередачи в приводе ротора буровой установки для повышения показателей бурения и снижения аварийности с бурильным инструментом. Автореф. дис: канд. тех. наук.– М., 1984.– 21с.
4. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория.– М.: Мир, 1980.– 536с.
5. Ветров Ю.А., Власов В.В. Результаты исследования вероятного характера силы резания грунтов // В сб.: Горные, строительные и дорожные машины.– Киев: Техника, 1972. – С. 14-19
6. Власов В.В. Исследование вариации силы резания грунтов. Автореф. дис: канд. тех. наук.– Киев, 1971.– 270с.
7. Пейль Н.Г. Обоснование и выбор структур управления электроприводами исполнительных органов горных машин в

энергосберегающих режимах. Автореф. дис: канд. тех. наук.– М., 2007.– 179с.
8. Тархов А.И. Научные основы рационального конструирования приводов траншейных экскаваторов. Автореф. дис: д-ра тех. наук.– М., 1984.– 35с.
9. Composite catalog of Oil field equipment and Services. USA, Texas: World Oil A Gulf Publishing Company Publication. Vol. 1-4, 1993-1996.
10. Ащеулов А.В. Методология проектирования гидравлических подъемных механизмов разводных мостов. Дис: д-ра техн. наук / С-Петербург. гос. политех. университет.– СПб., 2007.– 378с.
11. Ефимов И.Г. Практика приводной техники Т.1. Элекропривод с мотор-редукторами.– СПб.: Изд-во СПб, 2003.– 150с.
12. Ащеулов А.В. Представление сложной транспортной машины, требующей модернизации // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы международной научно-практической конференции 2011 года.– СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011.– С. 137-142.

A.V. Ashcheulov[1], A.A. Lobachev[1], A.E. Khoroshanskiy[2], A.A. Shestopalov[1]

WAYS OF IMPROVEMENT OF DOMESTIC MACHINES № 1

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]CJSC «PromTehInvest», Russia;

Annotation

Explore the current mechanisms and drives of drilling machines. Sets forth requirements and ways of improvement of the domestic top drive systems. Outlines the scientific bases that can be used for solution of new tasks.

Key words: drilling rig, top drive system, effective power, load, and efficiency.

REFERENCES

[1] Bagram R.A. Drilling machines and systems.- M: Nedra, 1988.- 499 p. (rus.)
[2] Basarygin Y.M., A.I. Boulatov, country Roads, Y.M. Drilling oil and gas wells.- Textbook. the manual for high schools.- M: LLC "Nedra-business Center", 2002.– 632 p. (rus.)
[3] Belkin Y.G. Application of volumetric hydraulic transmission in the drive of the rotor drilling rig to enhance the performance of drilling

and reduce accidents with drill tool. Avtoref. thesis: Cand. technical Sciences.- M., 1984.- 21 p. (rus.)
[4] Brillinger D. Time series. Processing of data and theory.- M: Mir, 1980.- 536 p. (rus.)
[5] Winds Y.A, Vlasov V.V. The results of a study of the likely character of the forces of soils // proceedings: Mining, building and road machines.- Kyiv: Tekhnika, 1972.- p. 14-19 (rus.)
[6] Vlasov V.V. Investigation of variations forces of soils. Avtoref. thesis: Cand. technical Sciences.- Kiev, 1971.- 270 p. (rus.)
[7] Pal N.G. justification of the choice of structures electric drives control of Executive bodies of mining machines in a power-saving modes. Avtoref. thesis: Cand. technical Sciences.- M., 2007.- 179 p. (rus.)
[8] Tarkhov A.I. Scientific basis for the rational design of drives trenchers. Avtoref. thesis: Dr. of technical Sciences.- M., 1984.- 35 p. (rus.)
[9] Composite catalog of Oil field equipment and Services. USA, Texas: World Oil A Gulf Publishing Company Publication. Vol. 1-4, 1993-1996.
[10] Ascheulov A.V., the methods for design of hydraulic lifting mechanisms drawbridges. Thesis: Dr. technology. Sciences / S-Petersburg State Polytechnical University.- SPb., 2007.- 378 p. (rus.)
[11] Efimov I.G. Practice in drive technology, Vol. 1. Electroprivod with motor-reducer.- SPb.: Publishing house of SPb, 2003.- 150 p. (rus.)
[12] Ascheulov A.V. Representation of complex transport machines that require modernization // Modern engineering. Science and education: Materials of international scientific-practical conference 2011.- SPb.: Publishing house of St.Petersburg state Polytechnic University, 2011.- p. 137-142. (rus.)

УДК 625 655.3

А.Я.Башкарев[1], Н.Н.Беспалова[2]

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ БИТУМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА

[1] Башкарев Альберт Яковлевич – д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)950-3715, E-mail: bashkarev@spbstu.ru

[2] Беспалова Наталья Николаевна – студентка
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (904)639-3742, E-mail: bespalova91@yandex.ru

Аннотация

В данной статье описана возможность повышения качества дорожного полотна за счет изменения температурно-временным режимом при приготовлении асфальтовой смеси. Разработана методика исследования адгезионных свойств дорожных битумов, и доказано, что применение технологического термостатирование приведет к кратному увеличению прочности асфальтового бетона. Также разработана методика испытания самого битума на прочность, которая показывает зависимость прочности от времени температурного воздействия.

Ключевые слова: адгезия, асфальтобетонная смесь, температура, битум, время.

Известно, что асфальтовый бетон это композиционный материал, состоящий из минеральных частиц размером от десятков миллиметров до нескольких микрон, которые соединены всего несколькими процентами битума [1-3]. Его распределение по поверхности твердых частиц происходит в процессе приготовления горячей асфальтово-бетонной смеси, т.е. во время перемешивания. Конечно, равномерность толщины битумной пленки в композите оценить трудно и скорее невозможно. Абстрактный математический расчет показывает, что в идеале она должна быть около 6 мкм. Наибольшее сомнение должно вызывать перемешивание с битумом входящего в состав асфальтово-бетонной смеси мелкодисперсного минерального порошка, который сам по себе способен к

коагулированию. После окончательной укладки и уплотнения смеси в ней также остается определенное количество воздушных пор, которые в прочности и долговечности играют только отрицательную роль. В них проникает влага, создавая в зимний период в бетоне мощный расклинивающий эффект. Некоторые специалисты предполагают, что небольшой избыток битума может закрыть эти поры от проникновения влаги. Но при этом естественно толщина битумной пленки между минеральными частицами неизбежно будет больше.

Битум является сложным органическим веществом[4,5]. Молекулярное строение его составляющих имеет высокую степень полимеризации. В обычных условиях они практически не образовывают химических связей с другими веществами, поэтому специалисты с определенным основанием считают его нейтральным материалом.

С повышением температуры полимолекулы битума подвергаются термодеструкции, т.е. разрыву, в результате которого образуются химически активные радикалы. Частично они взаимодействуют между собой, образуя в битуме трехмерные молекулярные структуры, что должно приводить к уменьшению его деформационной способности. Другая часть активных радикалов создает связь с минеральными материалами, усиливая прочность их соединения между собой.

Процесс термодеструкции протекает во времени, т.е. количество разрывов полимолекул и число активных радикалов увеличивается. Но процесс этот не приводит к монотонному увеличению прочности соединения битума с минералом и повышению прочности битумной пленки, так как термодеструкции подвергаются и образовавшиеся адгезионные связи, которые имеют свой период существования, продолжительность которого зависит от температуры[6]. Данный процесс развития и последующей деструкции адгезионного соединения авторы представляемой работы описали математически.

Согласно термофлуктуационной теории прочности с использованием критерия Бейли, долговечность материала τ при температуре T и переменных напряжениях $\sigma(t)$ в нем определяется выражением [7-9]

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 exp\dfrac{u-\gamma\sigma(t)}{RT(t)}} = 1,$$

где $\tau_0=10^{-11}\div10^{-13}$c, u – энергия активации процесса разрушения, γ – структурно чувствительный коэффициент, R – газовая постоянная, t – время.

С помощью представленной математической модели был описан процесс термодеструкции молекул битума с образованием адгезионных связей и их термодеструкция при отсутствии нагрузки и при постоянной температуре (что соответствует условиям процесса перемешивания). В

результате было получено выражение для расчета количества связей, сохраняющихся к моменту t_*

$$N_3 = z\frac{t_*}{\tau_0 exp\frac{u_б}{RT}}\left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 exp\frac{u_a}{RT}}\right).$$

Здесь u – энергии активации разрушения битума, u_a - энергия активации процесса деструкции адгезионных связей, z - коэффициент пропорциональности, отражающий долю активных радикалов, которые образовывают адгезию с твердой подложкой.

Прочность адгезионного соединения должна быть прямо пропорциональна N. Если первую производную этого выражения по времени приравнять к нулю, то получится выражение для определения момента, когда прочность соединения будет максимальной, т.к. в это время оно будет обладать максимальным числом адгезионных связей

$$t_*^0 = \tau_0 exp\frac{u_a}{RT}.$$

Таким образом, если иметь график полученной экспериментально зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования при заданной температуре, то по его экстремуму можно найти величину энергии деструкции адгезионных связей - u_a.

Для этой цели в данной работе была изготовлена партия образцов из гранита, изображенных на рис.1, а. После нагревания до температуры 140°С они склеивались с помощью дорожного битума марки БНД 60/90 по схеме, представленной на рис.1, б. Затем они сразу помещались при этой же температуре в термостат, где выдерживались различные периоды времени. После охлаждения до нормальной температуры образцы разрушались на сдвиг (рис.1, в).

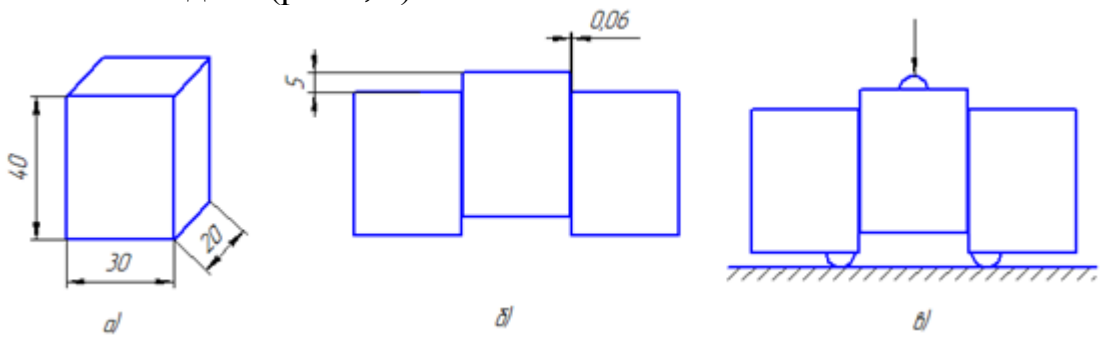


Рис. 1. Образцы для испытания адгезии битума.

Результаты исследований показали, что с увеличением продолжительности термостатирования адгезия битума значительно возрастала, но затем стала снижаться (рис. 2). Таким образом, эксперимент подтвердил предположение о существовании экстремальной

зависимости в температурно-временной зависимости адгезионной прочности.

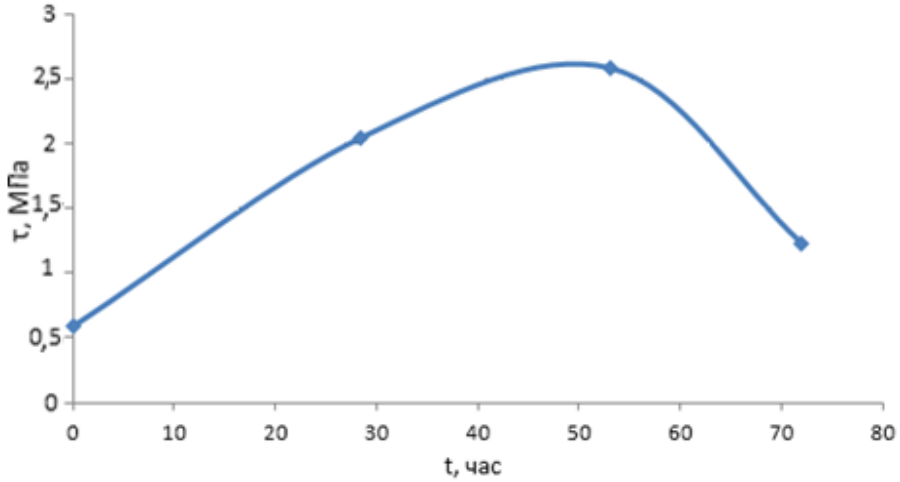


Рис. 2. Зависимость адгезионной прочности от времени термостатирования.

Оптимальное время для примененных в эксперименте материалов при температуре 140°С было около 50 часов, т.е. $18 \cdot 10^4$с. Следовательно, энергия активации разрушения адгезионного соединения для них, рассчитанная с помощью последней формулы, составляет 136 кДж/моль.

Проводя испытания адгезионного соединения на прочность, в данной работе была исследована зависимость деформационной способности склеенного соединения «на сдвиг» от того же времени его термостатирования. Скорость деформирования соединений была постоянна для всех образцов – 0,01 мм/с. На рис. 3 представлен график изменения модуля деформации «на сдвиг» G образцов с теми же режимами термостатирования, которые были приведены выше.

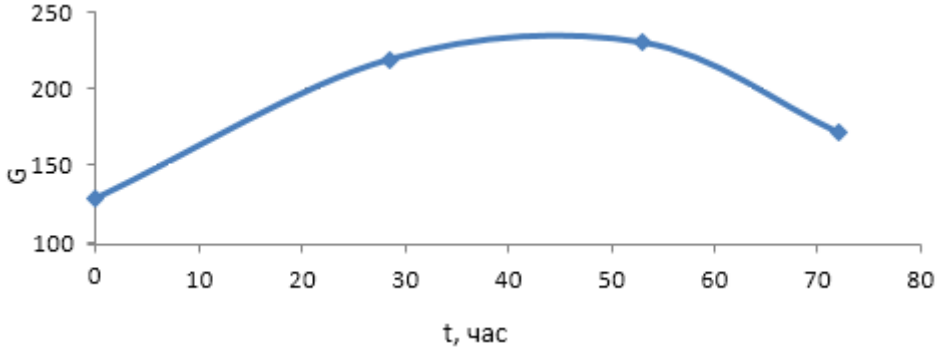


Рис. 3. График изменения модуля деформации на сдвиг.

Анализ результатов показывает, что при термостатировании изменяется не только прочность соединения «битум-гранит», но и его способность деформироваться (хотя и в меньшей степени). Прочность соединения увеличилась в 4 раза, а модуль сдвига примерно в 2 раза.

Осмотр разрушения склеенных образцов показал, что во всех случаях имеет место его когезионный характер, т.е. разрушение шло по самому битуму. В соответствии с этим возник вопрос: что изменилось в процессе термодеструкции: адгезионные возможности битума или его физико-механические свойства. С этой целью была проведена еще одна серия опытов, целью которой было исследовать прочность «на сдвиг» самого битума после тех же условий термостатирования.

Для этой цели изготавливались образцы в форме диска, которые отливались в специальной форме из расплава битума. Перед этим он выдерживался в термостате при той же температуре 140 градусов в течение тех периодов времени, которые соответствовали временным промежуткам термостатирования образцов при испытании адгезионной прочности. Затем они испытывались на прочность при нормальной температуре по схеме, изображенной на рис. 4.

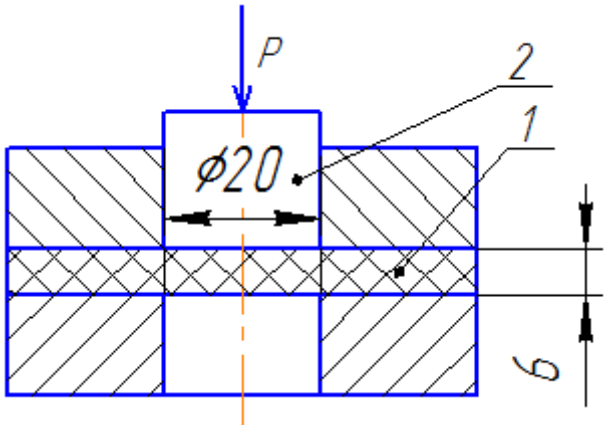


Рис. 4. Схема испытания битумных образцов: 1 - битум, 2 - нагружающий цилиндр.

Для реализации этой схемы разрушения образцов было изготовлено устройство, представленное на рис. 5.

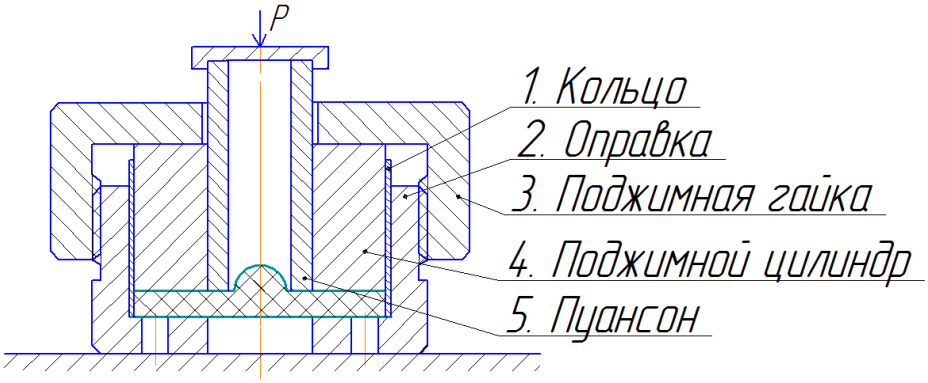


Рис. 5. Устройство для испытания образцов из битума на срез.

Полученные результаты испытания прочности образцов из битума представлены на рис. 6 вместе с результатами испытания прочности его адгезионного соединения с гранитом.

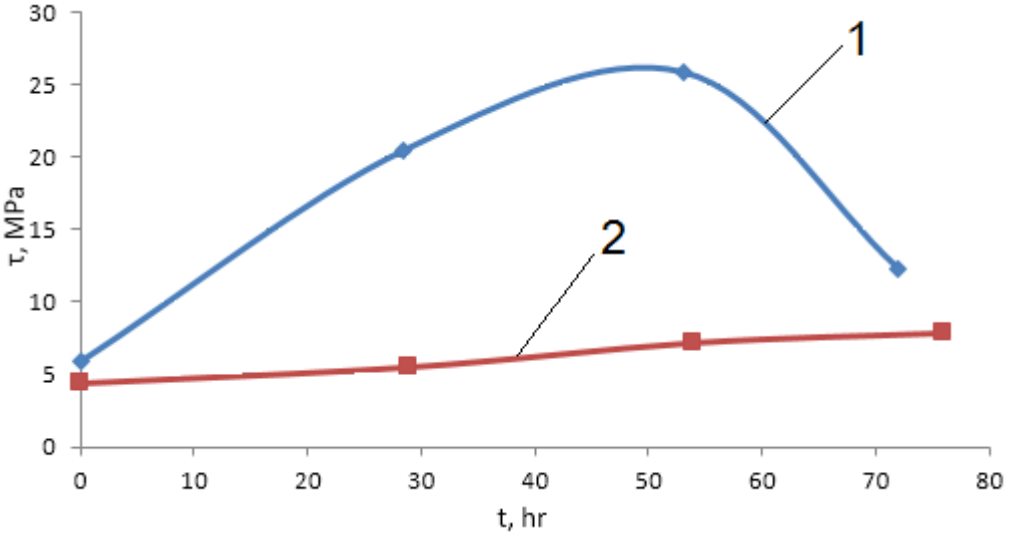


Рис. 6. Зависимость прочности от времени термостатирования: 1 - адгезионного соединения, 2 –битума.

Из графиков видно, что прочность самого битума при тех же условиях хотя и изменилась, но по сравнению с его адгезионной прочностью незначительно. Тем не менее, как говорилось выше, разрушение соединения имело когезионный характер. Следовательно, значительное качественное изменение имеет только тонкий слой битума, который формирует адгезионный контакт с гранитом. Хотя, как говорилось выше, только часть образовавшихся радикалов битума реализуется в создании адгезионных связей. Остальные, взаимодействуя между собой, создают в нем трехмерные структуры, что тоже делает весь объем битума прочнее. Но в меньшей степени.

Асфальтобетонные дорожные покрытия в летнее время работают при повышенной температуре. Именно в это время происходит интенсивный процесс образования дорожной колеи. Способность композита противостоять нагрузке именно при нагреве оказывается определяющей в оценке его качества. В данной работе было проведено сравнительное испытание нетермостатированных адгезионных соединений гранит-битум и термостатированных при тех же 140°С в течение 25÷28 часов. Испытания проводились в диапазоне температур +5 ÷ +40°С. Результаты испытания адгезионной прочности представлены на рис. 7, где кривая 1 – изменение прочности термостатированных образцов, 2 – нетермостатированных.

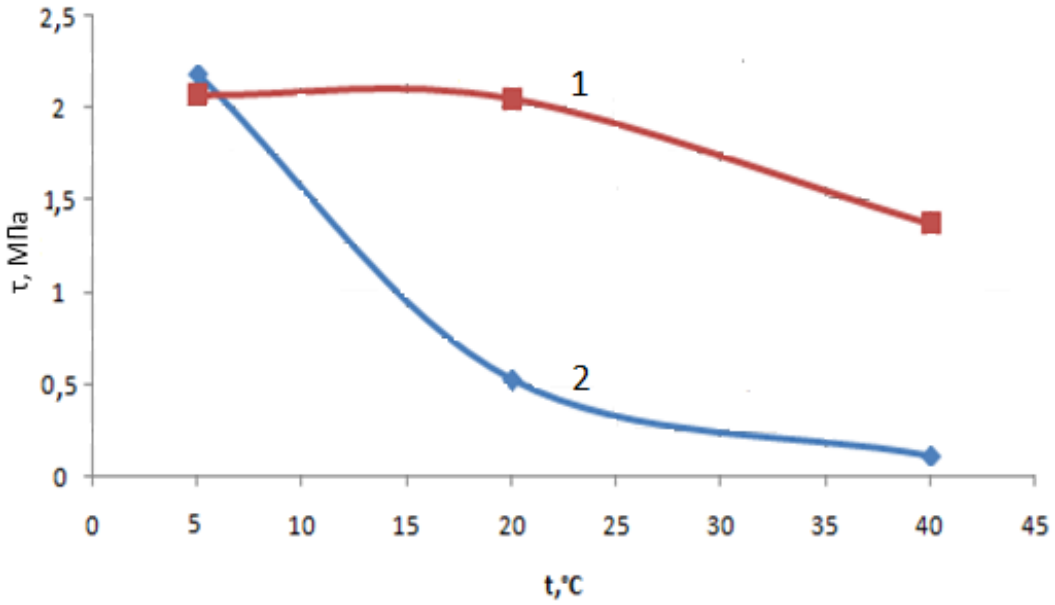
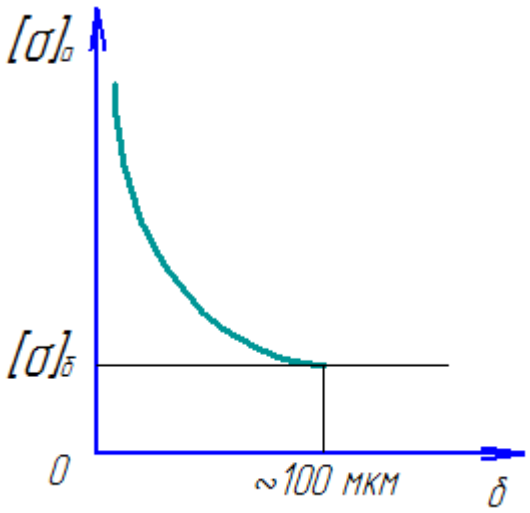


Рис. 7. Зависимость прочности адгезионного соединения от температуры испытания: 1 – термостатированные образцы, 2 – нетермостатированные образцы.

Графики показывают, что обычный асфальтовый бетон уже при температуре 40°С (а летом на солнце дорожные покрытия разогреваются до более высокой температуры) интенсивный процесс образования колеи неизбежен. Термостатирование, почти без затрат на изменение технологии, может существенно уменьшить это отрицательное явление. Но при условии, что толщина битумного слоя между минеральными составляющими асфальтового бетона находится в пределах исследованного значения – 6 мкм.

Как показали спектрометрические исследования, в полимерных молекулах, образующих адгезионное соединение, межатомные связи находятся в сжатом состоянии [10,11], что значительно увеличивает их прочность «на разрыв». В результате между адгезивом (здесь битумом) и подложкой (здесь минеральной составляющей – гранитом) образуются прочные «граничные слои». Толщина таких слоев достигает сотни микрон. Чем ближе к подложке, тем выше его прочность.

В композите, которым является асфальтово-бетонная смесь, битум находится между двумя подложками. Эпюра распределения напряжений сжатия молекул между двумя подложками при разных толщинах адгезивного слоя изображена на рис. 8. Она иллюстрирует вывод, что чем меньше его толщина, тем выше должна быть прочность соединения. Поэтому его разрушение происходит по наименее прочному месту, т.е. где-то посередине.



$[\sigma]_а$ – прочность битума в адгезионном слое,

$[\sigma]_б$ – прочность битума в свободном состоянии,

δ – расстояние от минеральной подложки

Рис. 8. Предлагаемая зависимость изменения прочности адгезива в соединении твердых поверхностей

Согласно результатам экспериментальных исследований молекулы полимера, образующие адгезионные связи, находятся в сжатом состоянии, что увеличивает прочность их связей под нагрузкой. Толщина такого слоя, как отмечалось выше не большая. Менее 100 мкм. Степень сжатия молекул с удалением от контактной плоскости уменьшается. Поэтому, как правило, мы наблюдаем не адгезионное, а когезионное разрушение соединения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Прочность адгезии битума, следовательно, и асфальтового бетона существенно зависит от температуры и времени приготовления, транспортировки и строительства дорожного покрытия.
2. Оптимальная продолжительность зависит от температуры и может быть рассчитана с помощью термофлуктационной теории прочности.
3. Установленные зависимости относятся лишь к адгезии битума. Поэтому при его избытке разрушение асфальтового бетона будет происходить по самому битуму. При этом прочность окажется значительно меньше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.М.Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ, Г.М. Мищенко. Дорожно-

строительные материалы: Учебник для автомобильных дорожных институтов. – М. : Транспорт, 1983 - 383 с.
2. М.С. Мелик-Багдасаров, К.А Гиоев, Н.А. Мелик-Багдасарова. Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий. Учебное пособие – Белгород, 2007 – 163 с.
3. В. А. Золотарев. Битумы, модифицированные полимерами и добавками. – Санкт-Петербург: Славутич, 2013. – с. 96 – 123.
4. А. Б. Соломенцев. Адгезионные добавки для дорожных битумов и асфальтобетонов и оценка их эффективности. Дороги, 2013. – С.80-83.
5. Э.В. Котлярский. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона. Учебное пособие - М., 2004 – 194 с.
6. Н. В. Дементьев. Влияние производственных процессов на качество полимерно-битумного вяжущего. Дорожная держава, 2013. – с. 67-69;
7. Y. Bailey. Glass industry. V.20. №1. 1939. – p. 20-35.
8. В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. – СПб. : Политехника, 1993 – 475 с.
9. С.А. Иваньков, А.Я. Башкарев. О долговечности и прочности композитов. Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб, 2011 – 199 с.
10. Ю. С. Липатов. Коллоидная химия полимеров. Наукова Думка. Киев, 1984 – 344 с.
11. В. П. Привалко, В. В. Новиков, В. Г. Янковский. Основы теплофизики полимерных материалов. Наукова Думка. Киев, 1991 – 232 с.

A.Y.Bashkarev, N.N.Bespalova

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article shows the possibility to improve the quality of road surfaces by controlling the time-temperature modes in the preparation of asphalt mixes. We developed a technique of research the adhesive properties of road bitumen, and proved that the using temperature control technology will lead to multiples increases durability of bituminous concrete. Also we developed a method of testing the strength of bitumen, which shows dependent the strength of durability from the temperature effect.

Key words: adhesion, bituminous mixture, temperature, bitumen, time.

REFERENCES

[1] I. M. Grushko, I. V. Korolev, I. M. Borshch, G. M. Mishchenko. Dorozhno- stroitelnyye materialy: Uchebnik dlya avtomobilnykh dorozhnykh institutov. – M. : Transport, 1983. - 383 p. (rus.)

[2] M. S. Melik-Bagdasarov, K. A Gioyev, N. A. Melik-Bagdasarova. Stroitelstvo i remont dorozhnykh asfaltobetonnykh pokrytiy. Uchebnoye posobiye – Belgorod, 2007. – 163 p. (rus.)

[3] V. A. Zolotarev. Bitumy, modifitsirovannyye polimerami i dobavkami. – Sankt-Peterburg: Slavutich, 2013. – p. 96 – 123. (rus.)

[4] A. B. Solomentsev. Adgezionnyye dobavki dlya dorozhnykh bitumov i asfaltobetonov i otsenka ikh effektivnosti. Dorogi, 2013. – p. 80-83. (rus.)

[5] E. V. Kotlyarskiy. Stroitelno-tekhnicheskiye svoystva dorozhnogo asfaltovogo betona. Uchebnoye posobiye - M., 2004 – 194 p. (rus.)

[6] N. V. Dementyev. Vliyaniye proizvodstvennykh protsessov na kachestvo polimerno-bitumnogo vyazhushchego. Dorozhnaya derzhava, 2013. – p. 67-69. (rus.)

[7] Y. Bailey. Glass industry. V.20. №1. 1939. – p. 20-35.

[8] V.A. Petrov, A.Ya. Bashkarev, V.I. Vettegren. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov. – SPb. : Politekhnika, 1993 – 475 p. (rus.)

[9] S.A. Ivankov, A.Ya. Bashkarev. O dolgovechnosti i prochnosti kompozitov. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. – SPb, 2011 – 199 p. (rus.)

[10] Yu. S. Lipatov. Kolloidnaya khimiya polimerov. Naukova Dumka. Kiyev, 1984 – 344 p. (rus.)

[11] V. P. Privalko, V. V. Novikov, V. G. Yankovskiy. Osnovy teplofiziki polimernykh materialov. Naukova Dumka. Kiyev, 1991 – 232 p. (rus.)

УДК 621.791.927

В.С. Бурлуцкий[1], К.П. Позынич[2], Е.К. Позынич[3]

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ КРАНОВЫХ СТРЕЛ С ПЛАСТИЧЕСКИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ ПО ПАРАМЕТРАМ ТВЁРДОСТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕСУРСА

[1]Виктор Степанович Бурлуцкий, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
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

Приведены результаты исследования по выявлению и установлению взаимосвязи напряженно-деформированного состояния материала и его твердости для получивших остаточную пластическую деформацию телескопических стрел стреловых кранов с жесткой подвеской стрелы в условиях циклического упруго-пластического деформирования при нормальной длительной эксплуатации, с целью создания исходной информации для оценки остаточного ресурса кранов, отработавших нормативный срок службы.

Ключевые слова: телескопическая крановая стрела, твёрдость, пластическая деформация, остаточный ресурс, оценка.

Оценка возможности дальнейшей эксплуатации грузоподъемных кранов в соответствии с требованиями промышленной безопасности включает и расчет их остаточного ресурса. Безопасность эксплуатации грузоподъемных кранов всех типов зависит от многих факторов, одним из важнейших из которых является техническое состояние их базовой части (несущих или расчетных металлических конструкций). Оценка соответствия крана требованиям промышленной безопасности выполняется в соответствии с

нормативными документами [1].

Для стреловых кранов с жесткой подвеской стрелы элементную структуру базовой части как показано в работе [2] образуют:

- стрела;
- рама поворотной платформы, включая опорные листовые стойки стрелы;
- ходовая рама с аутригерами и опорно-поворотным кругом.

При оценке остаточного ресурса рассматриваемых кранов состояние базовой части может оцениваться состоянием наиболее дорогого ее элемента – телескопической стрелы. Следует отметить отсутствие в нормативных документах регламентации способ оценки остаточного ресурса рассматриваемых стрел. Допускаются расчетный, экспериментальный и экспертный подходы.

Секции стрелы состоят из основания (корневой секции) и выдвижных секций и представляют собой коробчатые сварные конструкции из листового проката. Возможно исполнение секций стрелы коробчатого сечения из листового и углового проката (далее по тексту – уголковых), гнутых из двух полукоробов с разным числом граней, овоидных и др.

В процессе длительной нормальной эксплуатации телескопические стрелы и их отдельные секции подвергаются малоцикловым нагрузкам, вызывающим их общую остаточную деформацию (отклонение осей секций от прямолинейности), что в числе других причин приводит к деградации стрел в целом – отклонению вниз от прямолинейности осей стрел в вершине в рабочем положении без груза (рис. 1, а).

а) б)

Рис. 1. Вид деградации телескопических стрел – отклонение в вершине осей стрел от прямолинейности вниз

Действительно, при телескопировании стрел, независимо от срока их эксплуатации, происходит отклонение оси стрелы от прямой линии в плоскости её качания. Проведённые нами экспериментальные исследования

показали, что по мере увеличения длины стрелы при выдвижении секции (секций) многократно растёт интегральный показатель их деградации – отклонение оси от прямой линии в вершине (прогиб), а вершина стрелы описывает близкую к параболе траекторию [3].

В связи с этим деформации стрел при нагружении возрастают настолько (рис. 1, б), что возникла необходимость учитывать их в расчетах прочности и устойчивости кранов [4].

При расчете конструкций важно знать, как будет деформироваться тот или иной элемент под действием нагрузки, при каких условиях его деформация не будет влиять на работу машины в целом, при каких нагрузках наступает разрушение элемента и т.д. [5].

Точность определения ресурса зависит от определения в той или иной мере влияние на него условий работы конструкции, ее свойства и дефектность ее материала. Одним из процессов, оказывающих значительное влияние на состояние материала металлоконструкции, является процесс пластической деформации [6]. Так, например, в предложенную нами элементную модель определения показателей деградации телескопической стрелы [3] в числе прочих входят такие составляющие отклонения от прямой линии оси стрелы в вершине как отклонение оси, вызванное местной деформацией верхнего пояса в вершинах охватывающих секций над верхними опорными элементами (скользунами или каретками) охватываемых секций; отклонение оси, вызванное начальным остаточными искривлениями секций; отклонение оси, вызванное остаточной деформацией секций в плоскости качания при нормальной эксплуатации.

Пластическая деформация может появляться при нормальных условиях работы технического объекта, которые, как правило, не предполагают пластического деформирования элементов его металлических конструкций, а также при перегрузках и малоцикловой усталости в металлоконструкциях подъемных кранов, землеройных машин, автомобилей и т.д. [7,8]. Оценка структурных изменений, происходящих в материале при пластической деформации, и определение влияния этих изменений на ресурс конструкции является актуальной задачей [9,10]. Основным механизмом холодной пластической деформации металлов и сплавов является внутризеренное сдвиговое перемещение одних частей кристалла относительно других, осуществляемое с помощью многочисленных видов движения дислокации по плоскостям скольжения. С накоплением деформации дислокации размножаются, взаимодействуют между собой и другими дефектами кристаллического строения, в результате чего их движение затрудняется, а напряжение пластического течения и твердость металла растут. Для каждого материала имеется такое значение накопленной деформации, при превышении которого произойдет существенное снижение ресурса пластичности металла и, как следствие, снижение эксплуатационных характеристик металлоконструкции. Степень деформационного упрочнения металла при

этом определяется приращением твердости и зависит от накопленной деформации.

Как известно, деформации неразрывно связаны с упрочнением, благодаря которому физико-механические свойства и структура приобретают более высокие показатели. Так, в зависимости от степени деформации предел текучести может увеличиться в 2...4 раза, предел прочности в 1,5…2 раза. Для оценки текущей степени накопленных повреждений элементов металлоконструкции и возможности разработки на этой базе метода оценки остаточного ресурса металлоконструкций телескопических стрел были исследованы закономерности изменения некоторых физических свойств крановой стали с целью установления зависимости фактической твёрдости от величины деформации.

Пластическая деформация может возникнуть и как следствие внешних механических воздействий, когда на отдельных участках возникают локальные пластические деформации, что также снижает ресурс конструкций.

На рис. 2 приведена схема работы телескопической двухсекционной стрелы, характерной для автомобильных кранов грузоподъёмностью до 16 т.

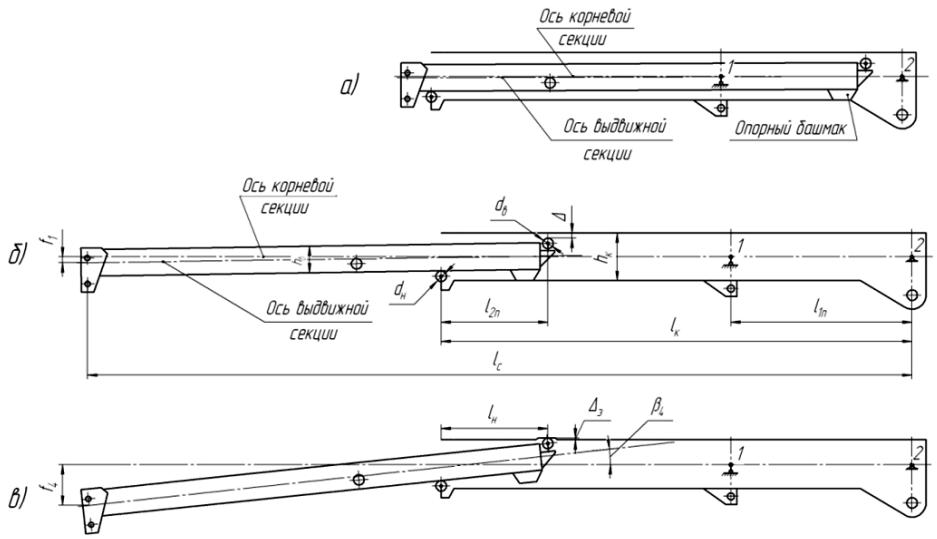


Рис. 2. Схема работы телескопической стрелы [3]:
а – полностью сложенная стрела; б – процесс телескопирования выдвижной секции; в – положение выдвижной секции при выборке местной деформации верхнего пояса, образующейся на верхнем поясе в вершине корневой секции

При телескопировании выдвижная секция нижним поясом опирается на ролики неподвижной каретки, установленной в вершине корневой секции, а роликами каретки, установленной в своей корневой части, контактирует изнутри с верхним поясом корневой секции (рис. 3).

а)

б)

в)

Рис. 3. Общая остаточная деформация ненагруженной стрелы (а), местная пластическая деформация нижнего (б) и верхнего (в) пояса выдвижной секции телескопической стрелы автомобильного крана

Верхний пояс стрелы работает на растяжение и его поясные уголки, в частности, участвуют во взаимодействии с опорными роликами выдвижной секции стрелы. Пластические деформации полок уголков и поясного листа в результате механического воздействия роликов выдвижной секции стрелы вызывают изменение твердости уголков. Верхний пояс получает пластическую деформацию (выгиб вверх, рис.3, в). В верхней части корневой секции на верхнем поясе возникает локальная зона перегрузки, которая нарастает при выдвижении внутренней секции, что приводит к образованию на верхнем поясе зоны пластической деформации (рис.2, в). На нижних поясных уголках также образуются участки пластической деформации от контакта с опорными роликами в вершине корневой секции (рис.3, б).

Рассмотрим результаты исследований применительно к двухсекционным уголковым телескопическим стрелам коробчатого сечения, характерным для автомобильных кранов КС-3577-2, КС-3577-3, КС-3574, КС-3576 и др., учитывая, что при циклическом нагружении пластически деформируется прежде всего поверхностный слой конструкции [5].

При исследовании был проведён неразрушающий контроль получивших сверхнормативное отклонение от прямолинейности стрел автокрана

КС-3577-2-1 и автокрана КС-3574, эксплуатировавшихся около 15 лет каждый, т.е. по полтора нормативных срока службы. В целом общее состояние стрел было оценено как неудовлетворительное из-за сверхнормативного отклонения осей стрел в вершине от прямолинейности, хотя при этом и отсутствовали другие видимые повреждения, влияющие на ресурс. Каждая из секций обеих стрел также приобрела при длительной эксплуатации без ремонтов остаточную деформацию недопустимой величины.

Измерение твердости металлоконструкции корневой секции стрелы проводилось электронным малогабаритным переносным программируемым твердомером динамического действия ТЭМП-4 на уровне обушков верхних поясных уголков стрелы (рис. 4), так как верхний пояс работает на растяжение, а его уголки, кроме того, взаимодействуют изнутри с роликами кареток, установленных в корневых частях выдвижных секций. Этим учитывалось наличие дополнительных местных пластических деформаций полок уголка в результате трения качения роликов выдвижной секции.

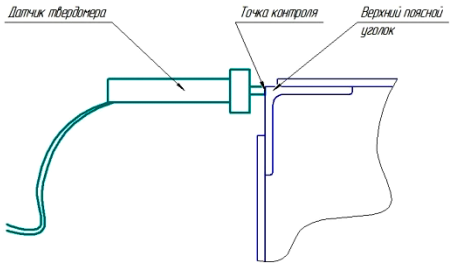


Рис. 4. Схема проведения измерений твердости корневой секции стрелы

При контроле механических свойств использовался метод индентирования. Этот метод, известный под названием "безобразцовый метод", позволяет определять не только характеристики твердости, но и показатели других механических свойств металла, таких как предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_в$ и др. В основе безобразцового метода лежат корреляционные связи характеристик твердости с характеристиками прочности.

Расположение точек измерений на корневых секциях стрел кранов показано на рис. 5.

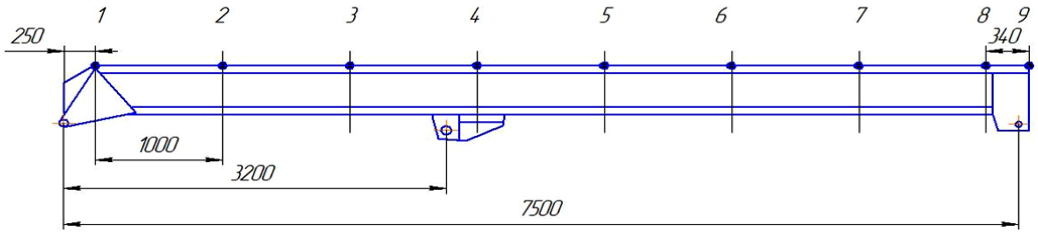


Рис. 5. Расположение точек измерений на корневых секциях стрел кранов КС-3574 и КС-3577-2: 1,2,3…9 – точки контроля

По данным паспортов кранов секции стрел изготовлены из металла марки 10ХСНД-12 по ГОСТ 19281-89 с пределом текучести $\sigma_т$=390 Н/мм^2. Подготовка поверхности для проведения контроля выполнялась шлифовальной машинкой со снятием защитного лакокрасочного покрытия на площади 2×2 см с зашлифовкой металла до обеспечения шероховатости поверхности R_a не более 2,5. Результаты трёх измерений твердости верхнего пояса корневой секции стрелы на уровне обушка его правого верхнего поясного уголка представлены на рис. 6. На данном рисунке также можно наблюдать разброс результатов измерений твёрдости в каждой точке контроля.

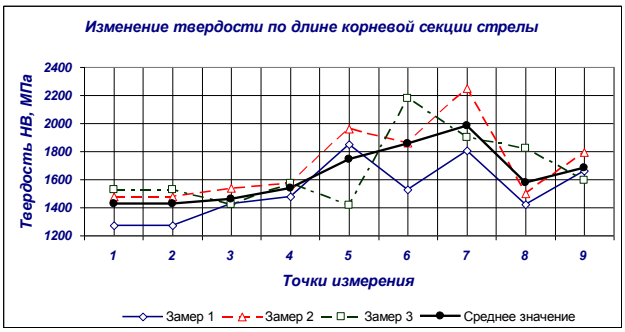


Рис. 6. Результаты измерения твердости корневой секции стрелы автокрана КС-3574

На рис. 7 представлен характер изменения по длине твёрдости стали корневой секции стрелы автокрана КС-3574.

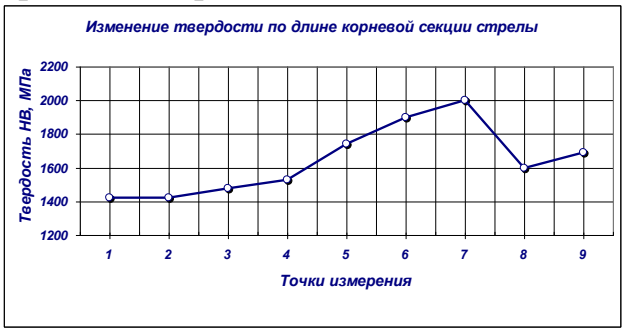


Рис. 7. Изменение среднего значения твердости по длине деформированной корневой секции стрелы автокрана КС-3574

Анализ данных, представленных на рис. 7, показал следующее.

1. Накопленная в результате циклического нагружения при нормальной эксплуатации деформация влияет на твердость сталей.
2. С увеличением величины деформации секции растёт величина твёрдости стали секции, т.е. чем больше отклонение оси секции от прямой линии (прогиб секции), тем больше измеренная твёрдость.
3. Максимальной величине деформации секции соответствует максимальная величина твёрдости. Максимальная величина твёрдости соответствует зоне верхнего пояса корневой секции, где кроме общей

остаточной деформации образовался участок с максимальной местной пластической деформацией поясных уголков от их постоянного контакта с роликами каретки выдвижной секции, когда эта секция максимально выдвинута.

4. Малые значения твёрдости в корне и вершине соответствуют участкам секции, где с поясными уголками нет контакта роликов выдвижной секции, т.е. участкам, подвергшимся только общей деформации от изгиба стрелы, на которых отсутствует дополнительная пластическая деформация.
5. Подтверждается связь деформации с упрочнением стали.
6. Пластическая деформация оказывает влияние на процесс накопления повреждений в крановых металлических конструкциях.
7. Полученные величины твердости металла в большинстве точек контроля не соответствует нормативной величине. Средние значения твердости согласно Приложению 2 ГОСТ 22761-77 соответствуют значениям предела прочности от 553 до 707 МПа, что в большинстве случаев превышает нормативную величину предела прочности для стали 10ХСНД-12.
8. Результаты проведённых замеров позволяют оценить напряженно-деформированное состояние секций стрелы при прогнозировании её остаточного ресурса и, следовательно, оценить остаточный ресурса крана.

Данные замеров твердости корневой секции стрелы крана КС-3577-2, представленные на рис. 8, практически подтвердили вышеизложенные выводы для стрелы крана КС-3574.

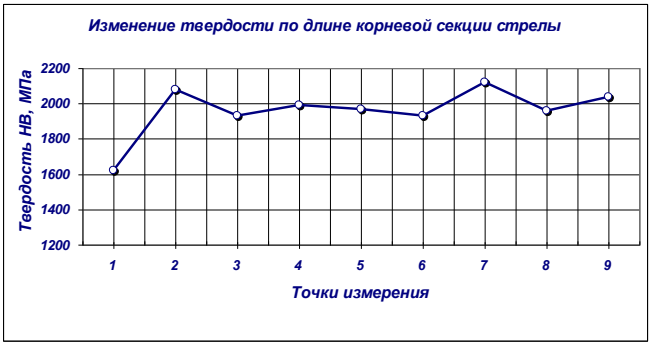


Рис. 8. Изменение среднего значения твердости по длине дефор-мированной корневой секции стрелы автокрана КС-3577-2

Поскольку физическая природа твердости определяется зависимостя-ми, связывающими ее с характеристиками прочности, пластичности и раз-рушения, можно утверждать, что контроль твердости при незначительных затратах позволит определить без повреждения изделия ряд его основных механических характеристик и получить данные для оценки его ресурса.

Установленные в работе зависимости и характеристики изменения структуры и свойств исследуемых сталей после малоциклового нагружения, позволяют оценивать величину приобретённой деформации металлоконструкций путем измерения комплекса соответствующих параметров непосредственно на эксплуатируемом объекте, без вырезки образцов. Рассмотренный подход может иметь практическую значимость при оценке величины деформации металлоконструкций на основе комплексной оценки параметров структуры и свойств сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 10-112-96 Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 1. Общие положения.
2. Позынич Е. К., Позынич К. П. Анализ элементной структуры для обоснования определяющих параметров технического состояния автомобильных кранов с жесткой подвеской стрелы, отработавших нормативный срок службы. Вестник института тяги и подвижного состава: труды 44-й Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности», 25-26 января 2006 года/ под ред. В. Г. Григоренко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – Вып. 3. С. 233-234.
3. Элементная модель определения показателей деградации крановых телескопических стрел при их нормальной длительной эксплуатации/ Позынич Е. К., Позынич К. П. Клигунов Е. С., Петров Е. Е.// Механики XXI веку. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009.– 250 с.: ил. С. 17-23
4. Берштейн М.Л. Структура деформированных металлов. М.: Металлургия, 1977. 431 с.
5. В. С. Бурлуцкий, К. П. Позынич, Е. К. Позынич. Определение упругих отклонений от линейности деформаций при практическом расчёте телескопических крановых стрел // 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. 933 – 942.
6. Лахова Е. Н., Носов В. В. Моделирование процесса перестройки структуры при пластической деформации сварных соединений металлоконструкций // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Междунар. науч.-практ. конференции. 14-15 июня 2011 г., Санкт-Петербург. – Спб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 301 – 309.
7. Е. Н. Лахова, В. В. Носов. Оценка состояния критически нагружен-

ных конструкций // 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. 445 – 453.
8. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. 2-е изд. испр. и доп.- СПб: Изд-во «Лань», 2012.- 384 с.: ил.
9. Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский. Оценка деградации ответственных металлоконструкций по механическим, структурным и магнитным характеристикам // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 2012. – Т.78. – № 11.– С. 57 – 60.
10. Н. В. Овчинников. Методика оценки технического состояния сварных несущих металлоконструкций грузоподъёмных кранов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПбГАСУ.: 2010. – 23 с.

V. Burlutskiy[1], C. Pozynich[2], E. Pozynich[3]

ASSESSMENT OF EXTENT OF DEGRADATION OF TELESCOPIC CRANE ARROWS WITH PLASTIC DEFORMATIONS IN HARDNESS PARAMETERS WHEN FORECASTING RESOURCE

[1]St. Petersburg Polytechnical University, Russia;
[2]Pacific National University, Russia;
[3]Far Eastern State Transport University, Russia

Abstract

Results of research on identification and establishment of interrelation intense the deformed condition of a material and its hardness for the telescopic arrows which have received residual deformation of boom cranes with a rigid suspension bracket of an arrow in the conditions of cyclic elasto-plastic deformation at normal long operation, for the purpose of creation of initial information for an assessment of a residual resource of the cranes which have fulfilled standard service life are given.

Key words: telescopic crane boom, plastic deformation hardness, residual strain, the residual resource estimate, assessment.

REFERENCES

[1] RD 10-112-96 Guidelines for examination of lifting machines with expired service life. Part 1. General. (rus.)
[2] Pozynich E.K., Pozynich K.P. Analysis of the elemental structure to justify defining parameters of technical condition of truck cranes with

rigid suspension arrows used standard life. Bulletin of the Institute of traction and rolling stock: the works of the 44-th All-Russian scientific-practical conference "Modern technologies - Rail Transport and Industry ", January 25-26, 2006 // ed. V.G. Grigorenko . – Khabarovsk, Univ DVGUPS, 2006 . - Vol. 3. P. 233-234. (rus.)

[3] The element model for determining degradation indicators crane telescopic booms in their normal continuous operation // Pozynich E.K., Pozynich K.P., Kligunov E.S., Petrov E.E. // Mechanics of XXI century. VIII All-Russian Scientific Conference with international participation: summary reports. – Bratsk: HPE " BrGU ", 2009 . - 250 P . : P. 17-23. (rus.)

[4] Bernstein M.L. Structure of deformed metals. Moscow: Metallurgy, 1977. 431 P. (rus.)

[5] Burlutskiy V.S., Pozynich K.P., Pozynich E.K. Definition elastic deflection from linear deformation at practical calculations telescopic crane arrow // Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 3-rd Intern. scientific-practical. Conference. / Ed. Radkevich M.M. and Evgrafova A.N. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2013 . - P. 933 - 942. (rus.)

[6] Lakhova E.N., Nosov V.V. Modeling process restructuring during plastic deformation welds metal structures / / Modern engineering. Science and education: Proceedings Intern. scientific-practical. Conference. 14-15 June 2011, St. Petersburg. - SPB. Univ Polytechnic. University Press, 2011. - P. 301 - 309. (rus.)

[7] Lakhova E.N., Nosov V.V. Assessment of the state of critically loaded constructions // Modern engineering. Science and Education: Proceedings of the 3rd Intern. scientific-practical. Conference. / Ed. Radkevich M.M. and Evgrafova A.N. - St. Petersburg. Univ Polytechnic. University Press, 2012 . - P. 445 - 453. (rus.)

[8] Nosov V.V. Diagnostics of machines and equipment: Textbook. 2-nd ed. Corr. and add. - St. Petersburg: Izd " Lan ", 2012 . - 384 P. : il. (rus.)

[9] Panteleenko F.I., Snarskii A.S. Evaluation of degradation of critical metal in mechanical, structural and magnetic characteristics // Factory laboratory. Diagnosis of metals. - 2012. - Vol. 78 . - N 11. - P. 57 - 60. (rus.)

[10] Ovchinnikov N.V. Methodology to evaluate the technical condition of bearing metal welded hoisting cranes // dissertation for the degree of candidate of technical sciences. - St. Petersburg.: 2010. - 23 P . (rus.)

УДК: 631.3.03

А. С. Князьков[1], В. Ф. Купряшкин[2], Н. И. Наумкин[3]

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА РЕЗАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ФРЕЗ

[1]Алексей Сергеевич Князьков, преподаватель кафедры основ конструирования механизмов и машин
Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (8-8342) 254396, E-mail: knjazkovaleksejj@rambler.ru

[2]Владимир Федорович Купряшкин, к.т.н., доцент кафедры основ конструирования механизмов и машин
Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (8-8342) 254400, E-mail: kupwf@ mail.ru

[3]Николай Иванович Наумкин, д.п.н., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой основ конструирования механизмов и машин
Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (8-8342) 254396, E-mail: naumn@yandex.ru

Аннотация

Проводится анализ изменение угла резания рабочих органов малогабаритных почвообрабатывающих фрез в зависимости от типа заточки ножа, кинематических и технологических режимов работы.

Ключевые слова: почвообрабатывающая фреза, рабочие органы, угол резания, тип заточки.

Применение почвообрабатывающих фрез обеспечивает высокое качество измельчения и заделки растительных остатков, рыхления (крошения) почвы, перемешивание почвы с минеральными удобрениями. Однако при этом их работа сопровождается большими затратами энергии, которые, как показывают исследования [1, 2, 3] зависят от конструктивных параметров их рабочих органов и от выбранных технологических режимов функционирования. Одним из главных технологических параметров

наряду с кинематическим режимом работы является угол резания почвы ножом, который в значительной степени влияет на энергоемкость фрезерования почвы [1].

В материалах статьи предлагается анализ изменения угла резания рабочих органов малогабаритных почвообрабатывающих фрез с учетом их конструктивных особенностей и кинематических режимов функционирования машины.

В конструкциях современных малогабаритных почвообрабатывающих фрез большое количество разновидностей рабочих органов определяемых как правило их назначением и технологическими режимами их работы. Фрезы с Г-образными ножами (рис. 1, а, б) – основные рабочие органы малогабаритных почвообрабатывающих фрез. С их помощью можно выполнять как глубокое рыхление почвы, так и мелкое, создавать крупно, либо мелкокомковатую структуру почвы, уничтожать сорняки.

а) б) в) г) д)

Рис. 1. Фрезерные рабочие органы: а, б – секция с Г- образными ножами, в – фреза «Целина», г – фреза «Гусиные лапки», д – «Активный ротор»

Оригинальную конструкцию имеет фреза «Целина» (рис. 1, в), которая представляет не просто обычные ножи, которые режут почву лезвиями, а набор небольших мотыг, которые входят в почву носками. Даже при небольших оборотах 80-120 об/мин, эта фреза обрабатывает почву на глубину 25-30 см открывая доступ влаги и воздуха и разрушая кладки вредителей. Такой тип рабочих органов предназначены для рыхления почвы с измельчением сорняков и равномерным перемешиванием почвы при внесении минеральных удобрений.

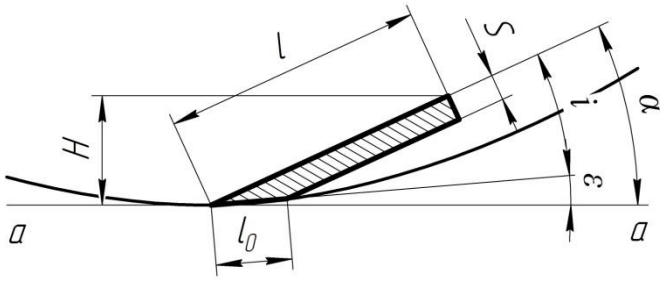
Фрезы «Гусиные лапки» (рис. 1, г) предназначены для обработки не паханой земли. Принцип работы фрез – резка земли на небольшие кусочки. При этом вес мотоблока давит на режущие ножи, увеличивая глубину рыхления почвы. В некоторых случаях можно использовать фрезы

«Гусиные лапки» вместо плуга. Во время вспашки почвы, разность резкого перехода с мягкой почвы в более твердую не ощущается.

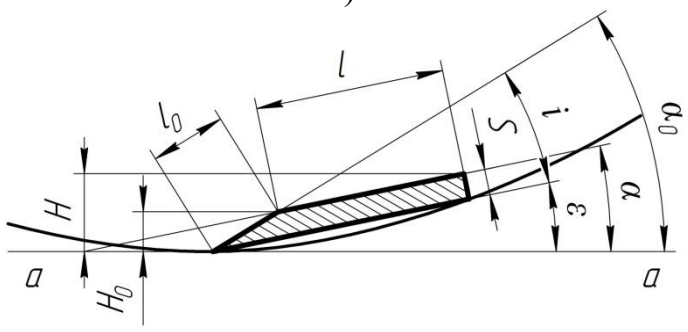
Особенность «Активных роторов» (рис. 1, д) – это бочкообразная форма и винтовые планки, которые выполнены в виде ножей, расположенных не к поверхности почвы, как мы привыкли это видеть у обычных роторов, а плашмя. Служат для уничтожения больших масс сорняков на запущенных участках, измельчения сидератов перед запахиванием в почву, мульчирования почвы и растительных остатков и выравнивания поверхности почвы.

Чаще всего на малогабаритных фрезерных культиваторах ставятся Г-образные ножи, которые более универсальны, хорошо подрезают сорняки и интенсивно рыхлят почву.

Данный тип рабочих органов, как правило, имеют асимметричную заточку, так как по сравнению с симметричными они создают наименьшее сопротивление резанию. Ножи с ассиметричной заточкой бывают двух видов. Нижняя заточка (рис. 2, а) обеспечивает самозаточку ножей, поскольку давление на нижнею грань почвенного монолита больше, чем на верхнюю, где стружка давит на грань в основном силой инерции и своим весом. Практика показывает также, что износ происходит в большей степени с нижней стороны ножа. При верхней заточке (рис. 2, б) происходит перезаточка ножей. Но при этом угол резания α у ножа с нижней заточкой больше чем с верхней, следовательно, больше сопротивление на резание и перемещение по нему почвы.



а)



б)

Рис. 2. Разрез лезвия ножа: а – нижней заточкой (с наружной стороны); б – верхней заточкой (с внутренней стороны)

Выбор толщины ножа S и ширины крыла l ножа зависит от его прочности и определяется из соответствующих расчетов на прочность. Для обеспечения прочности лезвия ножа угол заострения необходимо делать в диапазоне 15-20°.

Проведенные испытания [1, 4] по установки заднего угла резания ε ассиметричного ножа показали, что наименьшее сопротивление возникает при ε равным 3-5°. При уменьшении угла ε до 0° возникает большое сопротивление трение затылочной частью ножа о стенку борозды, не обработанной почвы. При увеличении угла ε от 5° до 15° происходит резкое увеличение трения отрезанной почвы о переднюю грань ножа в линейной зависимости от угла резания.

При резании, почва вследствие упругости, немного приподнимается вслед за режущей кромкой ножа, поэтому при установке заднего угла резания ε равного 2-3° происходит задевание почвы о нижнюю кромку. В этом случае происходит постоянный износ ножа, следовательно, нельзя устанавливать задний угол резания меньше 7°. Г. Н. Синеоков [1] рекомендует для устойчивого резания почвы ножом задний угол резания ε принимать не меньше 10°. Поэтому, для ножей почвообрабатывающих фрез, в среднем задний угол резания рекомендуется принимать в пределах 8-12°. Из анализа влияния угла заточки с учетом особенности его работы [1, 4] следует, что с целью обеспечения самозаточки ножей на навесных почвообрабатывающих фрезах в основном используется нижняя заточка, при этом в конструкциях малогабаритных фрез с целью уменьшения энергоемкости целесообразнее использовать верхнею заточку. Учитывая неоднозначное решение при выборе того или иного способа заточки ножа, приведем более подробный анализ влияния угла резания на основные кинематические и энергетические параметры. Для этого предварительно рассмотрим кинематику рабочего органа.

В процессе фрезерования угол резания α изменяется в зависимости от угла поворота фрезбарабана φ (рис. 3), значения которого можно определить с помощью расчетной зависимости [1, 5]:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi - \gamma \pm arctg\left(\frac{sin\varphi}{\frac{1}{\lambda} \pm \cos\varphi}\right),$$

где γ – минимальный угол установки ножа; λ – кинематический показатель; φ – угол поворота фрезбарабана, град.

Одним из главных условий для значений угла резаний является гарантированное отсутствие возникновения смятия почвы затылочной частью ножа, которое имеет следующий вид:

$$90° - \alpha - \gamma > 0.$$

Данное условие имеет практическую ценность не только для анализа эффективности работы существующих почвообрабатывающих фрез, но и

при проектировании новых машин с учетом определенных заданных условий.

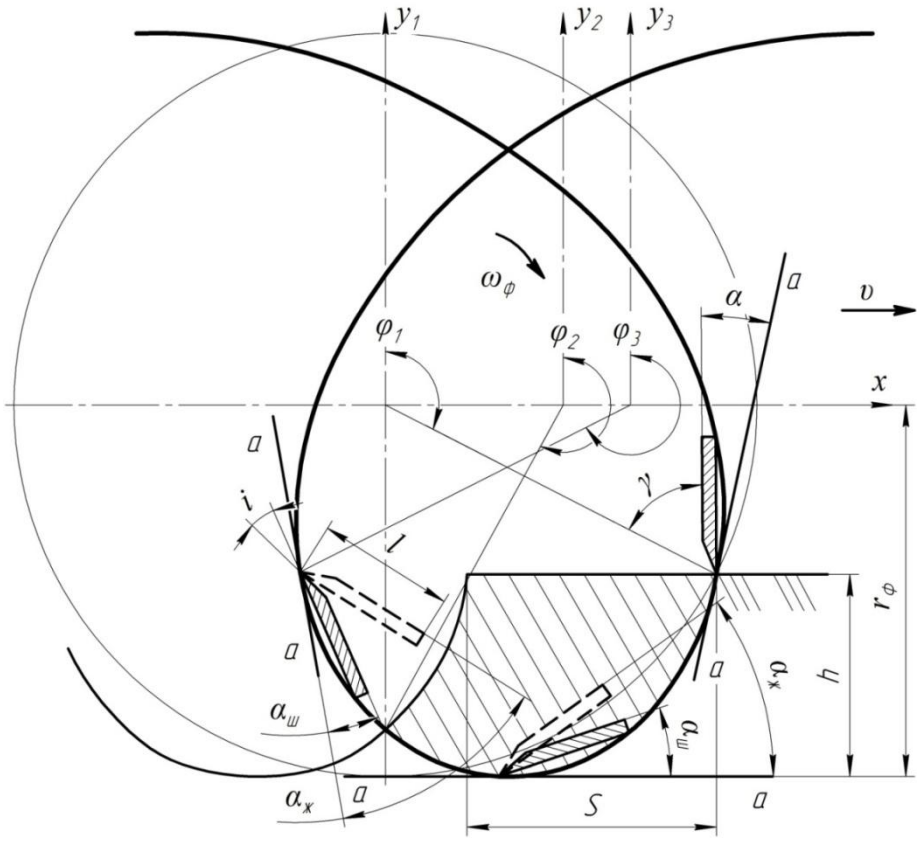


Рис. 3. Кинематика рабочего органа почвообрабатывающей фрезы

Практическое использование условия подразумевает предварительное определение углов начала φ_1, конца φ_2 резания ножом почвенной стружки и выхода ножа из обработанной почвы φ_3 (рис. 3). Угол входа и выхода ножа при одной глубине обработки будет постоянный, а угол конца резания будет зависеть от подачи на нож.

Значение углов φ_1, φ_2 и φ_3 будут в этом случае определяться следующими зависимостями:

$$\varphi_1 = \arcsin\left(1-\frac{h}{r_\text{ф}}\right)+90°;$$

$$\varphi_2 \approx \arcsin\frac{S}{2r_\text{ф}}+180°;$$

$$\varphi_3 \approx 270° - \arcsin\left(1-\frac{h}{r_\text{ф}}\right),$$

где h – глубина фрезерования почвы, м; S – подача на один нож, м.

Для более наглядного анализа изменения угла резания построим его графические зависимости от угла поворота ножа с учетом определенных конструктивных и технологических параметров (h = 0,12м, l = 0,05м,

$r_ф$ = 0,21м, v_{min} = 1км/ч (λ =22,5), v_{max} = 4км/ч (λ = 5,7) функционирования почвообрабатывающей фрезы с жестко закрепленными ножами (рис. 4).

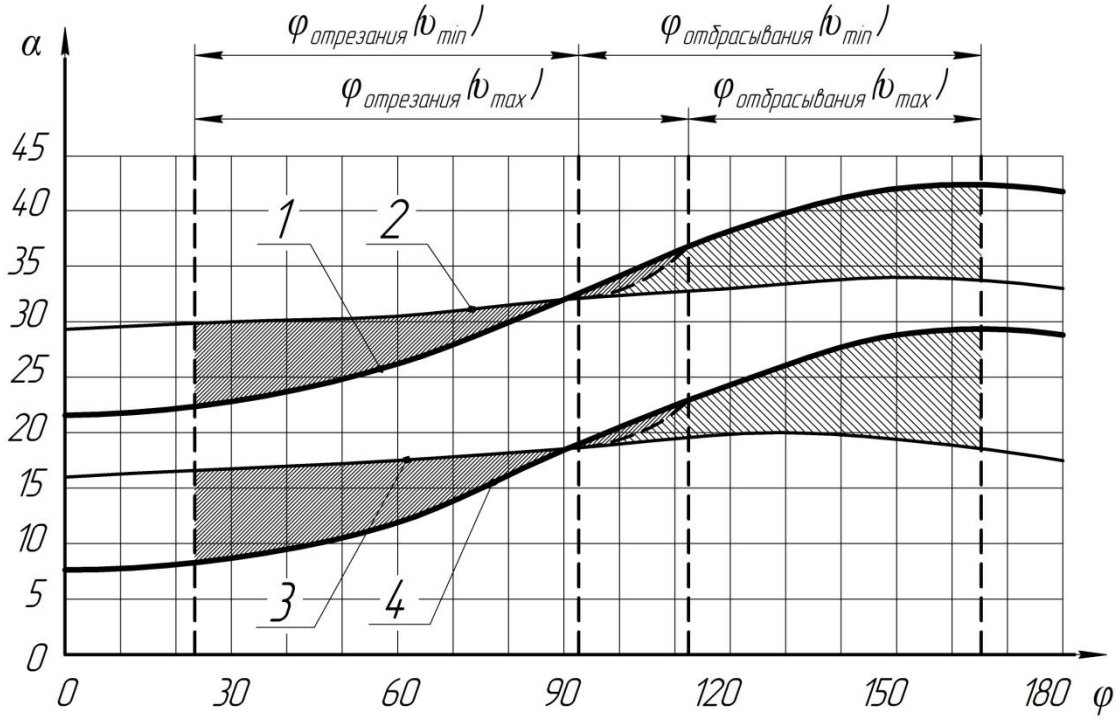


Рис. 4. Изменение угла резания α от угла поворота ножа φ в зависимости от типа заточки ножа: 1 и 2 – при минимальной v_{min} и максимальной v_{max} поступательной скорости с нижней заточкой ножа; 3 и 4 – при минимальной v_{min} и максимальной v_{max} поступательной скорости с верхней заточкой ножа.

Из рис. 4 следует, что угол резания α в процессе фрезерования изменяется в зависимости от угла поворота фрезбарабана φ в пределах от 22° до 43° и от 29° до 34° для ножа с нижней заточкой соответственно при минимальной v_{min} и максимальной v_{max} поступательной скорости фрезы и от 7° до 29° и от 16° до 20° для ножа с верхней заточкой при v_{min} и v_{max}.

Во всех случаях величина угла резания α минимальна при подходе ножа к поверхности почвы и максимальна при выходе из почвы. Так же видно, что у ножа с верхней заточкой угол резания при максимальной и минимальной поступательной скорости фрезы будет наименьший по сравнению с ножом с нижней заточкой. Это приводит к значительному разбрасыванию обработанной почвы и повышению расхода энергии, а иногда и к выталкиванию фрезбарабана из почвы и нарушению ее курсовой устойчивости [6, 7] поэтому, учитывая особенности конструкции и применения малогабаритных почвообрабатывающих фрез [2, 8] в качестве их рабочих органов ножи с верхней заточкой являются наиболее предпочтительнее. Однако, в любом случае разброс значений угла резания от момента входа ножа в почву до его выхода приводит к дополнительным затратам мощности. Эти дополнительные потери можно избежать, если в конструкциях рабочих органов применять механизмы, обеспечивающие

постоянство заданного угла резания [9, 10, 11]. Применение рабочих органов почвообрабатывающих машин с постоянным углом резания позволяет дополнительно снизить энергозатраты при фрезеровании почвы до 30% [12].

Таким образом, на основании проведенного анализа следует, что в конструкциях рабочих органов малогабаритных почвообрабатывающих фрез, с точки зрения обеспечения наименьших энергозатрат при фрезеровании почвы и соблюдения условий курсовой устойчивости машины, целесообразнее использовать ножи с верхней заточкой. Кроме этого, для получения наибольшего эффекта снижения энергозатрат рекомендуется применять рабочие органы с постоянным углом резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
2. Купряшкин В.Ф. Повышение эффективности функционирования самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы оптимизацией конструктивно-технологических параметров (на примере фрезы ФС-0,85): автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Ф. Купряшкин. – Саранск, 2011. – 20 с.
3. Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И., Чаткин М.Н. Энергоемкость фрезерования почвы малогабаритными фрезами с приводными колесами // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – №8. – С. 39 – 41.
4. Сенин М.Ф. Технологические и технические основы совмещения фрезерования почвы с посевом. – М.: Изд-во МСХА, 1991. – 184 с.
5. Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И., Князьков А.С. Теоретические основы проектирования почвообрабатывающих фрез с изменяемым углом резания. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 115 с.
6. Анализ устойчивости движения самоходной малогабаритной почвообрабатывающей фрезы при ее качании относительно ходовых колес / Купряшкин В.Ф. [и др.] // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011.– Т.11. – №11. – С. 12 – 14.
7. Динамические условия обеспечения равномерного движения самоходных малогабаритных почвообрабатывающих фрез с ходовыми колесами / Купряшкин В.Ф. [и др.] // Нива Поволжья. – №4. – 2011. – С. 52 – 56.
8. Купряшкин В. Ф. Самоходная малогабаритная фреза. Сельский механизатор. – №12. – 2013. – С. 4 – 7.
9. Метод снижения энергоемкости фрезерования грунтов за счет регулирования угла резания ножей / Н. И. Наумкин [и др.] // Современное машиностроении. Наука и образование: Материалы

Междунар. Науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 992 – 998.
10. Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И., Князьков А.С. Теоретические основы проектирования почвообрабатывающих фрез с изменяемым углом резания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №2. – С. 62 – 63.
11. Синтез планетарных рабочих органов высокотехнологичных почвообрабатывающих машин методом конвертации / Наумкин Н. И. [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 315 – 319.
12. Наумкин Н.И., Князьков А.С., Купряшкин В.Ф. Эффективность почвообрабатывающих фрез с изменяемым углом атаки ножа // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – №10. – С. 36 – 38.

A.S. Kniazkov, V.F. Kupryashkin, N.I. Naumkin

THE ANALYSIS OF CHANGE OF THE CUTTING ANGLE OF THE WORKING BODIES OF THE SMALL CUTTERS TILLAGE

Mordovian state University named after N.P. Ogarev, Russia.

Abstract

The analysis of change of the cutting angle of the working bodies of the small cutters tillage depending on the type of sharpening of a knife, kinematic and technological mode/

Key words: tillage cutter, working tools, the cutting angle, type of sharpening.

REFERENCES

[1] Sineokov G.N., Panov I.M. Teoriya i raschet pochvoobrabatyvayutcshih mashin. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 328 p. (rus.)
[2] Kupryashkin V.F. Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya samohodny malogabaritny pochvoobrabatyvayutcshy frezy optimizatsy konstruktivno-tehnologicheskih papametrov (na primere FS-0,85): avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk / V.F. Kupryashkin – Saransk, 2011. – 20 p. (rus.)

[3] Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Chatkin M.N. Energoemkosty frezerovanya pochvy malogabaritnymi frezami s privodnymi kolesami // Traktory i selhozmashyny. – 2013. – N 8. – P. 39 – 41. (rus.)
[4] Senin M.F. Tehnologicheskie i tehnicheskie osnovy sovmeshcheniya frezerovaniya pochvy s posevom. – M.: Izd-vo MSKHA, 1991. – 184 p. (rus.)
[5] Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Kniazkov A.S. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya pochvoobrabatyvayutcshikh frez s izmenyaemym uglom rezaniya. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 115 p. (rus.)
[6] Analiz ustoychivosti dvizheniya samokhodnoy malogabaritnoy pochvoobrabatyvayutcshey frezy pri eyo kachanii otnositelno khodovykh koles / Kupryashkin V.F. [i dr.] // Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo unyversiteta. – 2011.– Vol.11. – N11. – P. 12 – 14. (rus.)
[7] Dinamicheskie usloviya obespecheniya ravnomernogo dvizheniya samokhodnykh malogabaritnykh pochvoobrabatyvayutcshikh frez s khodovymi kolesami / Kupryashkin V.F. [i dr.] // Niva Povolzhjya. – N4. – 2011. – P. 52 – 56. (rus.)
[8] Kupryashkin V.F. Samokhodnaya malogabaritnaya freza. Selsky mechanizator. – N12. – 2013. – P. 4 – 7. (rus.)
[9] Metod snizheniya energoemkosti freserovaniya gruntov za schet regulirovaniya ugla rezaniya nozey / Naumkin N.I. [i dr.] // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka I obrozovanie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-prakt. konferentcii. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – P. 992 – 998. (rus.)
[10] Kupryashkin V.F., Naumkin N.I., Kniazkov A.S. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya pochvoobrabatyvayutcshikh frez s izmenyaemym uglom rezaniya // Mezhdunarodny zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovany. – 2013. – N2. – P. 62 – 63. (rus.)
[11] Sintez planetarnykh rabochikh organov vysokotekhnologichnykh pochvoobrabatyvayutcshikh mashin metodom konvertatcii / Naumkin N.I. [i dr.] // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka I obrozovanie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-prakt. konferentcii. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. – P. 315 – 319. (rus.)
[12] Naumkin N.I., Kniazkov A.S., Kupryashkin V.F. Effektivnostj pochvoobrabatyvayutcshikh frez s izmenyaemym uglom ataki nozha // Traktory i selhozmashyny. – 2013. – N10. – P. 36 – 38. (rus.)

УДК 625. 655.3

Н. А. Кондрашов[1], Д. Ю.Таиров[2], А. А. Шестопалов[3]

КОНСТРУКЦИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДОРОЖНОГО КАТКА

[1]Никита Александрович Кондрашов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-67-26, E-mail: nikita.kondrashov@gmx.de

[2]Дмитрий Юрьевич Таиров, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-67-26, E-mail: tairov92@mail.ru

[3]Александр Андреевич Шестопалов, д.т.н, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-67-26, E-mail: shestop-37@yandex.ru

Аннотация

Предложена конструкция и обоснованы основные параметры универсального дорожного катка, позволяющего в широких пределах изменять давление вальцов на уплотняемый материал и ширину укатки. Конструктивные особенности этого катка позволила предложить новую технологию уплотнения конструктивных слоев дорожных покрытий, устраиваемых из горячих асфальтобетонных смесей, полностью автоматизировать этот процесс, гарантировать качество и повысить производительность работ.

Ключевые слова: дорожные катки, асфальтобетонные покрытия, технология уплотнения.

Существующая технология устройства дорожных покрытий не отвечает высоким темпам строительства и качеству производства работ. Так производительность отряда машин, состоящего из одного асфальтоукладчика и звена дорожных катков определяется суммарной производительностью этой диады. Если асфальтоукладчик позволяет относительно легко регулировать свою долю производительности, то темпы роста производительности звена уплотняющих машин ограничены, что обусловлено рядом дополнительных обстоятельств [1], [2], [8].

Так, дорожное покрытие устраивается в основном из горячей асфальтобетонной смеси. Температурный диапазон её уплотнения находится в пределах от 140°С-130°С до 70°С-75°С. Если учесть, что скорость остывания смеси для средних условий составляет 1 градус в 1 минуту, то время, отведенное для уплотнения смеси звеном дорожных катков, составляет порядка 60-65 минут. При температурах ниже указанного технологического диапазона уплотнение смеси до требуемой плотности существующими средствами практически невозможно. Из практики известно, что для достижения требуемой плотности слоя смеси, уложенного асфальтоукладчиком в покрытие, звену катков необходимо произвести в сумме 20-24 проходов по следу, равномерно по всей площади дорожного полотна. При этом уплотнение начинают в определенной последовательности от края уложенной полосы к центру, а затем снова от другого края снова к центру, рис. 4, а [5], [7]. Это связано с тем , что край полосы остывает быстрее её центральной части.

Проблема заключается в том, что количество катков в звене составляет 3-4 и более шт., рис. 1. Причем они различаются по типу и массе. Величина и характер силового воздействия со стороны рабочих органов катков на уплотняемый материал должны изменяться в широких пределах плавно, в соответствие с изменяющимися прочностными характеристиками уплотняемого материала.

Рис. 1. Строительство магистрали А1 в Польше 2007-2013 гг.

Такая технология устройства и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей существует во всем мире и имеет ряд недостатков. Во-первых, невысокая производительность отряда (асфальтоукладчик – звено катков), во-вторых, невысокое качество работ по уплотнению, связанное с неравномерной плотностью по ширине и длине укладываемой полосы, что приводит в дальнейшем к локальным разрушениям дорожного полотна. Это обстоятельство вызвано тем, что

практически невозможно четко организовать вышеописанный технологический процесс в заданные временные рамки вследствие наличия большого количества дорожных машин на ограниченной площади и необходимости регулирования силового воздействия на уплотняемый материал в строго определенной последовательности.

Ведущие мировые фирмы выпускают дорожные катки, снабженные системами контроля качества уплотнения и с изменяемыми параметрами силового воздействия на уплотняемый материал. Однако для выполнения всего технологического цикла процесса уплотнения обязательным условием является наличие нескольких катков различного типа и массы. Наличие нескольких машин обусловливает влияние человеческого фактора и не позволяет полностью автоматизировать весь процесс, приводит к сбоям в процессе производства работ.

Для оптимального ведения процесса уплотнения, соответствующего скорейшему достижению требуемой плотности и обладающего высокой производительностью, необходимо плавное изменение контактных давлений под рабочими органами в соответствие с нарастанием прочности уплотняемого материала [3], [6], [11], [12].

Поэтому на практике используется технология последовательного введения в процесс уплотнения того или иного типа катка. По мере выполнения предыдущим катком определенного количества проходов, после которых воздействие его на материал уже не эффективно, то есть уплотнения слоя не происходит, производится смена катка другим катком, с более высокими силовыми параметрами.

Однако момент смены одного катка другим не определен. Это осуществляется по технологическим условиям и соответствующим контролем человека – другими словами под влиянием человеческого фактора. Это обстоятельство является существенным недостатком существующего процесса и источником некачественной работы с низкой производительностью.

Кроме того, неравномерное остывание смеси по ширине дорожного покрытия дополнительно выдвигает определенные требования к технологии уплотнения. Каждый из последующих катков с соответствующими силовыми параметрами должен начинать уплотнение с краев уплотняемого слоя к его середине с перекрытием предыдущего следа от катка, в соответствие со схемой рис.1.

На кафедре ТТС ИММиТ СПбГПУ предложена и разработана конструкция универсального дорожного катка [6], [9], [10], позволяющая исключить влияние негативных факторов существующей технологии, повысив производительность и минимизировав влияние человеческого фактора.

Конструктивные особенности этого катка позволяют впервые полностью автоматизировать весь технологический процесс от начала до

конца с использованием соответствующего программного продукта. При этом появляется возможность гарантировать качество производства работ по уплотнению дорожного покрытия, существенно повысить производительность работ, уменьшить людские и энергетические затраты.

Универсальный каток состоит из основной рамы с кабиной оператора и двух уплотняющих модулей, присоединенных к основной раме через опорно-поворотные устройства (рис. 2, а, б).

Уплотняющий модуль состоит из гладкого металлического вибрационного и пневматического вальцов, шарнирно присоединенных к основной раме катка через опорно-поворотный круг (рис. 2, в, г). Благодаря такой конструкции каждый модуль имеет возможность выполнять повороты в горизонтальной плоскости в пределах 360°. Кроме того, внутренние и наружные вальцы модулей могут попарно перемещаться в вертикальной плоскости с помощью гидроцилиндров, вывешивая те или иные вальцы относительно опорной поверхности.

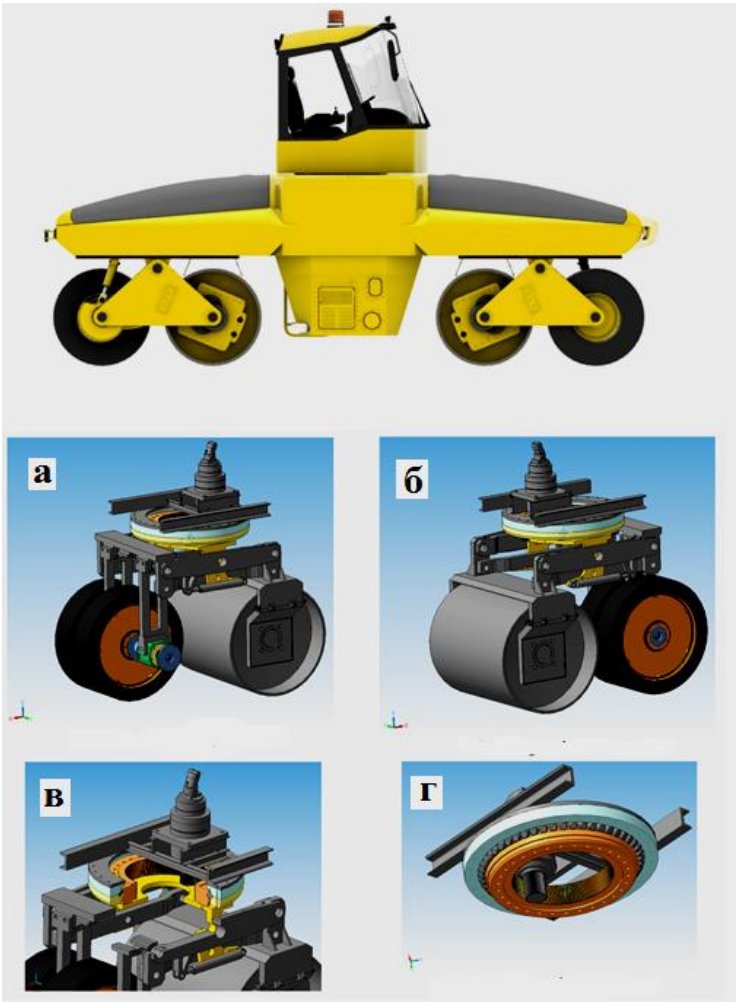


Рис. 2. Общий вид и уплотняющий модуль дорожного катка: а, б – вид на рабочие органы; в, г – вид на опорно-поворотное устройство модуля.

Тем самым, перераспределяя общую массу катка и изменяя давление на уплотняемый материал. Изменение силового воздействия осуществляется также и за счет изменения параметров вибрации: амплитуды и частоты колебаний (рис. 3, б). Эти конструктивные возможности универсального катка позволяют полностью автоматизировать процесс уплотнения дорожных покрытий на всем температурном диапазоне работ, заменяя собой звено дорожных уплотняющих машин.

Кроме регулирования силового воздействие на уплотняемый материал на всем этапе производства работ также появляется дополнительная возможность повышения производительности за счет снижения времени, затрачиваемого на выполнение необходимого количества проходов для получения требуемой плотности.

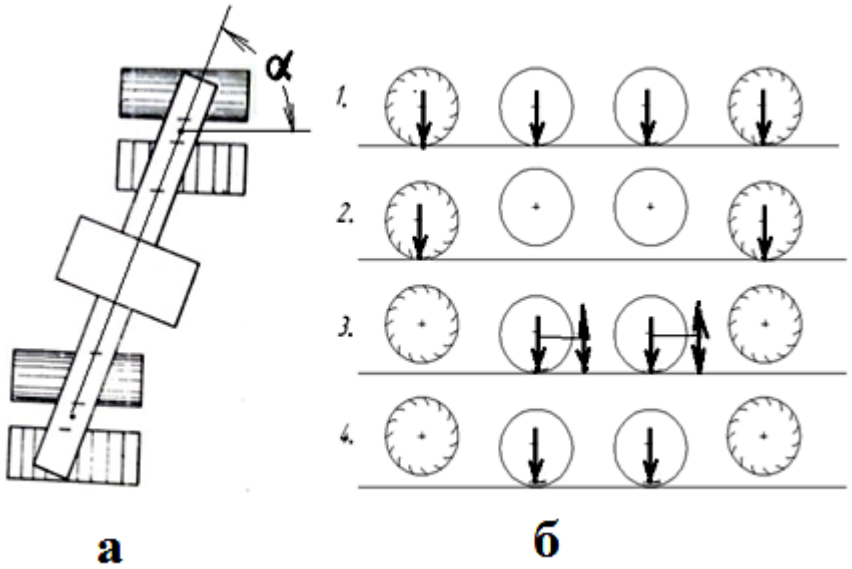


Рис. 3. Схема конструктивных возможностей универсального дорожного катка: а – изменение положения уплотняющих модулей в горизонтальной плоскости; б – изменение силового воздействия на уплотняемый материал за счет вывешивания вальцов и регулирования величины вынуждающей силы вибратора.

Это достигается путем поворота каждого модуля в горизонтальной плоскости относительно рамы так, что появляется возможность первый проход производить одновременно с двух сторон уплотняемой полосы. Далее выполнять последующие проходы от края к центру, последовательно сближая модули разворачивая их относительно рамы на соответствующий угол (рис. 3, а; рис. 4, б). При этом количество необходимого число проходов для получения требуемой плотности сокращается в 1,5 – 2 раза (рис. 4, б).

Основные параметры этой машины, такие как масса, диаметр и ширина вальца, база модулей, база катка и его габариты, выбирались из условий корреляционных связей этих параметров в глобальной выборке машин, выпускаемых ведущими фирмами-производителями. В соответствие с этими условиями общая масса катка составляет 12тс. База катка выбиралась с соблюдением оптимального режима его работы по ширине полосы уложенного слоя дорожного покрытия. При этом ширина полосы укладки определялась из условия рационального режима работы асфальтоукладчика. Такой режим соответствовал его работе с минимальными уширителями и составил 5,2 метра. Эта полоса укладки с другой стороны соответствует кратности ширины дорожного полотна для дорог класса «Автомагистраль» и «Скоростная дорога». Эти условия позволяют выполнять оптимальный режим работы универсального катка при его базе равной 4,15 м.

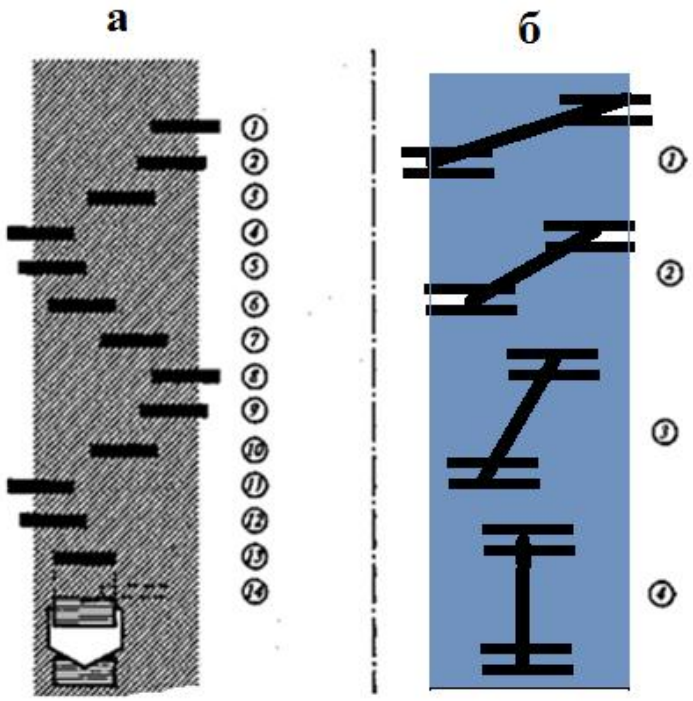


Рис. 4. Схема уплотнения уложенной полосы дорожного покрытия:
а – традиционным катком; б – универсальным дорожным катком.

Разработаны алгоритмы согласованного поворота модулей в горизонтальной плоскости для выполнения процесса уплотнения слоя смеси в зависимости от ширины укладываемой полосы, а также изменения параметров силового воздействия универсального катка на уплотняемую поверхность.

Это дает возможность предложить новое средство и технологию уплотнения дорожных покрытий значительно повышающих

производительность и качество работ, а соответственно и срок службы дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костельов М.П., Перевалов В.П. Новая усовершенствованная технология устойчиво обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника. – 2005. – С. 120-132.
2. Костельов М.П. Как выбирать дорожный каток для уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника. – 2000. – С.52-55.
3. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками. – Ярославль: изд-во ЯГТУ, 2012. –140 с.
4. Шестопалов А.А. К вопросу об уплотнении дорожно-строительных материалов // Мир дорог. – 2012. – № 60. – С. 23.
5. Строительные нормы и правила. СНиП 3.06.03-85. Автомобильные дороги. М: 1989.
6. Деникин А.И., Шестопалов А.А. Дорожный каток. Патент СССР 1401097. – Л: 1988.
7. Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А. Строительство и ремонт асфальтобетонных дорожных покрытий. – М: изд-во МАДИ, 2007. – 215с.
8. Ложечко В.П., Шестопалов А.А. Инновационное оборудование для формирования структуры асфальтобетонных дорожный покрытий с высокими эксплуатационными показателями // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 846 с.
9. Шестопалов А.А. Повышение прочности и устойчивости композитных материалов, используемых в дорожном строительстве // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 1205с.
10. Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Рекомендации по выбору параметров машин и технологии уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – СПб: Изд-во Политехнич. ун-та, 2013. – 1205с.
11. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. – 1989. – №5. – С.12-13.

12. Перспективы развития конструкций асфальтоукладчиков и дорожных катков / Захаренко А.В. [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2012 .– №2 – С.19-23.

N.A.Kondrashov, D.U Tairov, A.A. Shestopalov

CONSTRUCTION AND PARAMETER JUSTIFICATION OF THE UNIVERSAL ROAD ROLLER

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Design of a universal road roller with adjustable in wide range contact pressure and compaction width is suggested. Its major characteristics are corroborated. A new compaction method of the hot mix asphalt pavements is proposed with regard to the new constructive features of the roller. Entire automation of the compaction process, quality guarantee and enhancement of the work efficiency are obtained.

Key words: road roller, pavement, compaction technology.

REFERENCES

[1] Kosteljov M.P., Perevalov V.P. Novaja usovershenstvovannaja tehnologija ustojchivo obespechivaet vysokoe kachestvo uplotnenija asfaltobetona // Dorozhnaja tehnika. – 2005. – pp.20-132. (rus.)
[2] Kosteljov M.P. Kak vybirat dorozhnyj katok dlja uplotnenija asfaltobetona // Dorozhnaja tehnika. – 2000. – pp.52-55. (rus.)
[3] Tjuremnov I.S., Ignatjev A.A. Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami. – Jaroslavl: izd-vo JaGTU, 2012. –140p. (rus.)
[4] Shestopalov A.A. K voprosu ob uplotnenii dorozhno-stroitelnyh materialov // Mir dorog. – 2012. – № 60.– p.23. (rus.)
[5] Stroitelnye normy i pravila. SNiP 3.06.03-85. Avtomobilnye dorogi. M: 1989. (rus.)
[6] Denikin A.I., Shestopalov A.A. Dorozhnyj katok. Patent SSSR 1401097. L: 1988. (rus.)
[7] Melik-Bagdasarov M.S., Gioev K.A. Stroitelstvo i remont asfaltobetonnyh dorozhnyh pokrytij. – M: izd-vo MADI, 2007. – 215p. (rus.)
[8] Lozhechko V.P., Shestopalov A.A. Innovacionnoe oborudovanie dlja formirovanija struktury asfaltobetonnyh dorozhnyj pokrytij s vysokimi jekspluatacionnymi pokazateljami // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 2-oj Mezhdunarodnoj nauchno-

prakticheskoj konferencii. – SPb: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – 846p. (rus.)
[9] Shestopalov A.A. Povyshenie prochnosti i ustojchivosti kompozitnyh materialov, ispolzuemyh v dorozhnom stroitelstve // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.– SPb: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – 1205p. (rus.)
[10] Kondrashov N.A., Shestopalov A.A. Rekomendacii po vyboru parametrov mashin i tehnologii uplotnenija asfaltobetonnyh smesej v dorozhnyh pokrytijah // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 3-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.– SPb: Izd-vo Politehnich. un-ta, 2013. – 1205p. (rus.)
[11] Permjakov V.B., Zaharenko A.V. Obosnovanie velichiny kontaktnyh davlenij dlja uplotnenija asfaltobetonnyh smesej // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 1989.– №5. – pp.12-13. (rus.)
[12] Perspektivy razvitija konstrukcij asfaltoukladchikov i dorozhnyh katkov / Zaharenko A.V. [i dr.] // Stroitelnye i dorozhnye mashiny. – 2012. – №2. – pp.19-23. (rus.)

УДК 621.88.084.4

А.В. Кущенко[1], А.Я. Башкарев[2], В.Ф. Корелин[3]

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРЕССОВЫХ ПОСАДОК.

[1]Александра Владимировна Кущенко, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921) 4460637, E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

[2]Альберт Яковлевич Башкарев, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921) 9503715, E-mail: bashkarev@stu.neva.ru

[3]Владимир Федорович Корелин, к.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921) 9558969, E-mail: korelin41@rambler.ru

Аннотация

Прессовые посадки в конструкциях строительных машин подвергаются износу и разрушению в результате фреттинг-коррозии. Одним из способов борьбы с этим явлением может стать применение тонкослойных полимерных покрытий. В работе исследовалась величина коэффициента трения покоя тонкослойного полиамидного покрытия по стали. Установлено, что он уменьшается с ростом давления в зоне трения.

Ключевые слова: строительные машины, прессовые посадки, полиамидные покрытия, коэффициент трения покоя.

Неподвижные прессовые посадки благодаря своей технологичности при изготовлении и сборке нашли широкое применение во многих узлах машин. Например, в конструкциях гусеничного хода строительных и дорожных машин. Однако, несмотря на отсутствие скольжения, их цилиндрические пары подвергаются износу и разрушению в результате фреттинг-коррозии, которая имеет место при любых условиях эксплуатации даже в безвоздушном пространстве. Сущность ее, как известно, заключается в том, что имеющиеся на металлических поверхностях микрошероховатости под воздействием переменных нагрузок отделяются от основного материа-

ла. Накапливаясь в локальных зонах, они приводят к появлению в этих местах большого числа микротрещин, которые при своем развитии вызывают уже более объемное отделение материала, что и сопровождается разрушением прессовых посадок [10, 12].

В 80-е годы в Ганноверском университете на кафедре «Детали машин» по заказу фирмы «Фольксваген» проводились исследования по изучению возможности применения для защиты от фреттинг-коррозии покрытий из тефлона. По утверждениям разработчиков, ими был получен значительный эффект. Это вполне объяснимо, если учитывать эластичность применяемого материала. Опасение вызывает лишь тот факт, что сам тефлон фактически не способен к адгезии с металлами [9, 13]. Поэтому не известно, как его покрытие будет удерживаться на металлической подложке во время создания прессовой посадки. Кроме того, его прекрасные антифрикционные свойства - низкий коэффициент трения (особенно в условиях покоя) может не обеспечить достаточно высокую прочность соединения. С этих позиций гораздо более обещающим могут быть полиамидные материалы.

Положительным свойствам полиамидных материалов, которые относятся к группе термопластов, является способность создавать прочные адгезионные соединения со сталью. Прочность таких соединений на сдвиг достигает 40-50 МПа [6]. Технологические свойства полиамидов делают их легкодоступными для применения в любых производственных условиях, в том числе ремонтных предприятий и мастерских. Их фрикционными свойствами довольно просто управлять с помощью различных наполнителей, с которыми они также могут прочно соединяться.

Полиамидные материалы включены в группу эластомеров, деформация которых, происходит лишь за счет перераспределения объема, т.е. для инженерных расчетов эти материалы считаются практически несжимаемыми с коэффициентом Пуассона равным 0,5. Это значит, что традиционные методы расчета напряжений в них с помощью теории упругости и приводимыми в справочниках значениями модуля упругости здесь неприменимы [5, 15].

Возможность применения полимерного покрытия в прессовой посадке должна определяться, прежде всего, по оценке прочности соединения на сдвиг, которая зависит от величины радиальных напряжений в зоне контакта сопрягаемых поверхностей и коэффициента трения между ними. Чем выше коэффициент трения покоя, т.е. при нулевой скорости, тем прочнее неподвижное сопряжение. Однако известно, что полиамидные материалы, как и тефлон, в технике применяются, прежде всего, как антифрикционные материалы, т.е. обладают невысоким коэффициентом трения по стали. Но его величина зависит от многочисленных факторов, в том числе давления, шероховатости поверхности и температуры [3, 14]. Пока влияние всех этих факторов исследовалось главным образом применительно к условиям

скольжения, а не покоя. Это же относится и к подбору составов наполнителей, которые рекомендовались для снижения коэффициента трения. К их числу относятся графит, дисульфид молибдена, порошки цветных металлов и другие. Исследования, направленные на поиск путей повышения коэффициента трения полиамидных материалов, нам пока неизвестны.

В данной работе была поставлена задача, исследовать зависимость коэффициента трения покоя тонкослойного полиамидного покрытия применительно к условиям работы неразъемных сопряжений в узлах строительной техники, когда помимо остаточных напряжений прессовой посадки, действующих равномерно со всех сторон, на соединение передаются и значительные рабочие нагрузки, как это имеет место, например, в соединениях гусеничных траков. Эти нагрузки передаются с помощью сил трения возникающих в соединении.

Поскольку в прессовых посадках на слой полимера действуют значительные давления, представляется важным выяснить, существует ли связь величины коэффициента трения покоя с давлением на поверхности трения и каково значение коэффициента трения покоя при действующих давлениях реальных посадок в узлах строительных машин.

Для оценки величины давлений, возникающих в прессовых посадках для деталей из стали, был выполнен теоретический расчет минимальных действующих напряжений применительно к посадке H7/s7 ($Пр1_{2а}$) для диаметров сопряжения от 20 до 200 мм. Такие посадки и такие диаметры сопряжений наиболее часто применяются в конструкциях строительных машин, например, при установке пальцев крепления элементов рабочего оборудования.

Расчет выполнялся известными методами теории упругости применительно к толстостенным цилиндрам [7].

Известно, что в прессовых посадках одновременно создаются как нормальные, так и касательные деформации. Поэтому в соответствии с законом Гука для плоского напряженного состояния абсолютная радиальная деформация втулки в прессовой посадке, т. е. величина натяга может быть определена как:

$$N = C_1 \cdot R + \frac{C_2}{R}, \qquad (1)$$

где N – натяг в прессовой посадке, т.е. разница полей допуска вала и отверстия,

R – номинальный размер радиуса посадочного отверстия,

C_1 и C_2 - коэффициенты.

В свою очередь:

$$C_1 = \frac{(1-\mu)}{E} \cdot \frac{1}{(\frac{R_1^2}{R^2} - 1)} \cdot P, \qquad (2)$$

$$C_2 = \frac{(1+\mu)}{E} \cdot \frac{1}{(\frac{R_1^2}{R^2} - 1)} \cdot P$$

где μ – коэффициент Пуассона материала детали,

E – модуль нормальной упругости материала детали,

R_1 – наружный радиус втулки,

P – давление на внутренней поверхности втулки.

После подстановки (2) в (1) и учета того, что для расчета нагрузок передаваемых прессовой посадкой необходимо знать минимальное давление в сопряжении, т.е. давление, возникающее при минимальных натягах:

$$P_{\min} = \frac{N_{\min} \cdot E \cdot (\frac{R_1^2}{R^2} - 1)}{2 \cdot [R \cdot (1-\mu) + \frac{(1+\mu)}{R}]}, \qquad (3)$$

где N_{min} – величина минимального натяга в сопряжении в соответствии с действующими допусками на размеры,

P_{min} – величина минимального давления, действующего по поверхности.

Если принять, что для стали - μ = 0,3; E = 210 ГПа; а $R_1 = R + 50$ мм, то минимальное внутреннее давление по внутренней поверхности втулки в прессовой посадке H7/s7 ($Пр1_{2а}$) для стальных деталей будет меняться в зависимости от номинального диаметра сопряжения в соответствие с представленным на рис. 1.

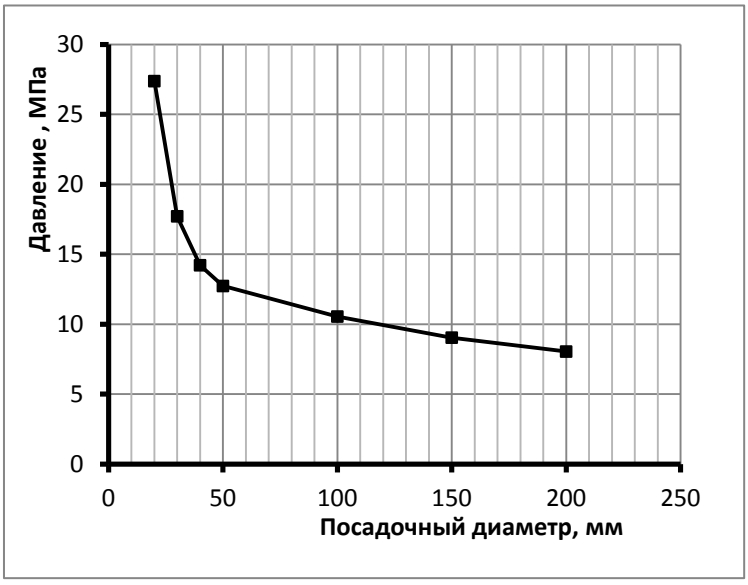


Рис. 1. Изменение минимального давления по внутренней поверхности стальной втулки при прессовой посадке H7/s7 от номинального диаметра.

Из расчетов следует, что изучение изменения коэффициента трения покоя полиамидного покрытия по стали необходимо проводить в диапазоне давлений в зоне трения от 5 до 25-30 МПа.

Для этого была применена следующая методика экспериментальных работ.

Испытания проводились на образцах имеющих тонкослойное полиамидное покрытие, сжатых двумя стальными пластинами с помощью специального нагружателя (рис. 2). Нагружатель представляет собой разрезное кольцо с двумя винтами, создающими нагрузку. Величина приложенной силы определялась с помощью стрелочного индикатора, которым измерялась деформация кольца. Предварительно была проведена тарировка нагружателя, т.е. определялась связь величины деформации кольца с величиной приложенной силы. Усилие нагружения менялось в диапазоне от 0 до 4,5 кН, что при заданных параметрах образца позволяло создать давление в зоне трения до 25 МПа.

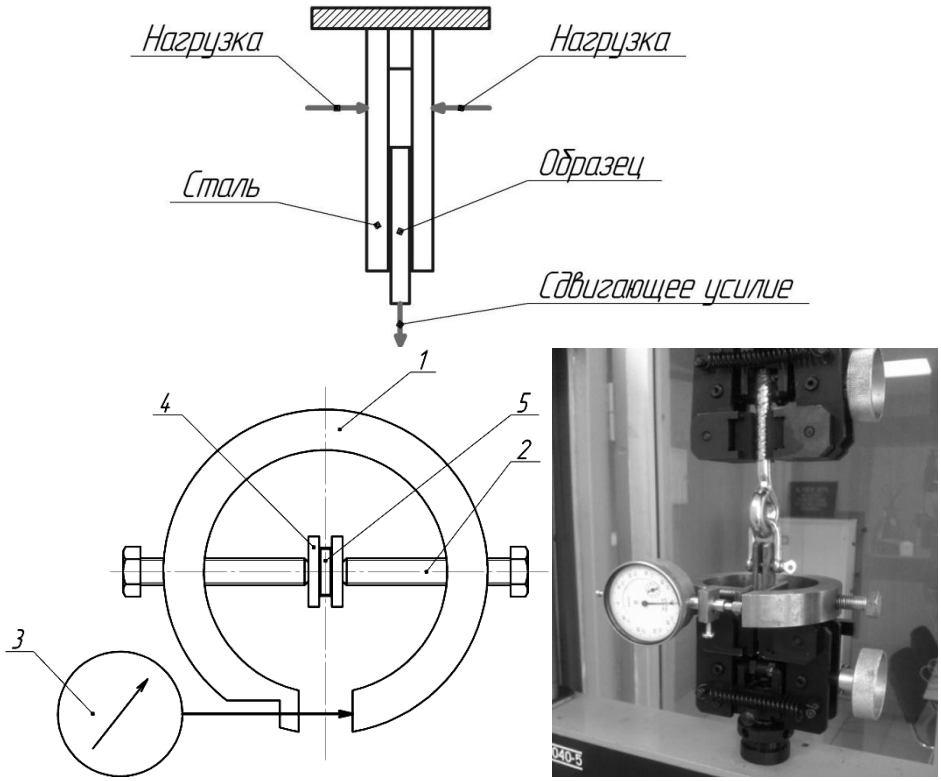


Рис. 2. Схема нагружения и установка образцов на испытательной машине.
1 - разрезное кольцо, 2 - нагружающие болты, 3 - стрелочный индикатор, 4 - стальные пластины, 5 - образец

Образцы для испытаний представляли собой пластины из Ст3 шириной 17 мм и толщиной 3,6 мм, покрытые слоем полиамида П-6 (рис.3). Полиамид наносился в виде полосы шириной 11 и 15 мм. Толщина слоя по-

лиамида составляла от 0,2 до 0,5 мм. Для нанесения полиамида стальные пластины нагревались до температуры 230 ^{0} С, после чего неоднократно погружались в псевдоожиженный слой полиамидного порошка, который оплавлялся на поверхности за счет аккумулированного в них тепла. После механический обработки поверхности полиамидного слоя его шероховатость составляла R_a=1,25 мкм.

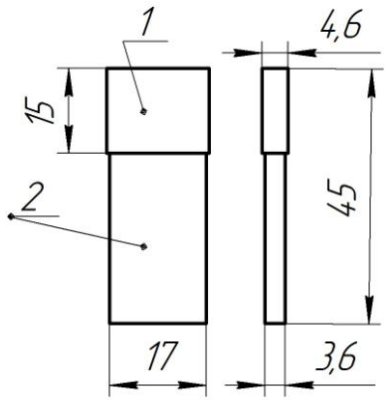


Рис. 3. Образцы для испытаний
1 - полиамидное покрытие, 2 - стальная пластина.

Измерение величины коэффициента трения покоя проводилось на испытательной машине ИР 5047-50-11 с максимальным усилием 5 кН при скорости перемещения траверсы 0,0067 мм/сек. В ходе испытаний записывалась диаграмма усилий необходимых для начала перемещения образца.

Величина усилия трения покоя соответствует максимальному усилию сдвига на диаграмме (рис. 4).

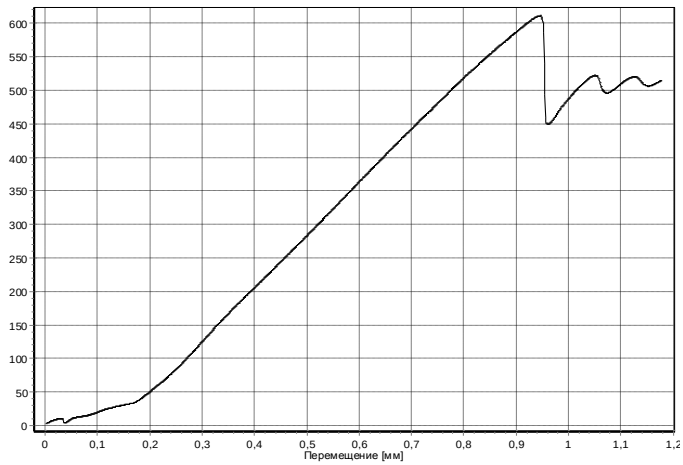


Рис. 4. Диаграмма нагружения
образца с полиамидным
покрытием.

Для обеспечения максимальной достоверности каждый эксперимент повторялся шесть раз.

Результаты испытаний представлены на рис. 5.

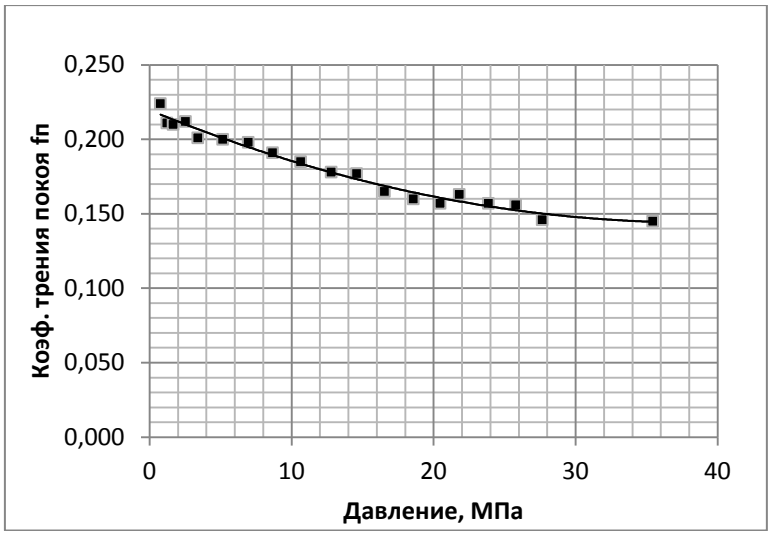


Рис. 5. Изменение коэффициента трения покоя полиамида П-6 по стали в зависимости от давления в зоне трения.

Из данных испытаний следует, что коэффициент трения покоя полиамида по стали не является постоянной величиной, а уменьшается с ростом давления. Предварительно это изменение с доверительной вероятностью β= 0,98 может быть аппроксимировано выражением [2, 8]:

$$f_n = 0{,}22 - 0{,}0039P + 0{,}00005P^2, \quad (4)$$

где f_n - коэффициент трения покоя полиамида П-6 по стали,

P – давление в зоне трения, МПа.

Величину силы трения при скольжении можно определить как произведение касательных напряжений на площадь фактического контакта поверхностей трения.

$$F_{тр} = \tau_{сдв} \cdot S_{ф} \quad (5)$$

Предварительно можно предположить, что площадь фактического контакта трущихся поверхностей сталь-полиамид меняется нелинейно от роста давления. Причины снижения коэффициента трения покоя полиамида по стали при росте давления, а также влияние температуры на величину коэффициента трения покоя, являются предметом дальнейших исследований. Кроме этого целесообразно также исследовать изменение адгезионной прочности полимерного слоя на сдвиг в зависимости от различных технологических факторов, в том числе от температуры.

Выводы

1. Для прессовой посадки H7/s7 стальных деталей минимальное давление в сопряжении меняется от 27,0 до 8,0 МПа при изменении номинального посадочного диаметра от 20 до 200 мм.
2. Коэффициент трения покоя полиамида П-6 по стали не является постоянной величиной, а уменьшается с ростом давления в зоне трения.
3. При давлениях, действующих в прессовых сопряжениях коэффициент трения покоя полиамида П-6 по стали составляет 0,15 - 0,20, что меньше коэффициента трения покоя стали по стали. Это обстоятельство может потребовать применения присадок в полиамид для повышения коэффициента трения. В первую очередь это относится к посадкам малого диаметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости, М. Изд. Книга по требованию, 2012. - 159 с.
2. Боровиков В.П., Боровиков И.П. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows., М., Изд. дом «Филин», 1997. - 608 с.
3. Билик Ш.М., Протасова Р.Н. Износостойкость пластмасс при реверсивном трении и малых скоростях скольжения в отсутствии смазки. //Трение, изнашивание и качество поверхности, М., Наука, 1973. - с. 140-146
4. Верещагин Л.Ф., Шапочкин В.А. Влияние гидростатического давления на сопротивление сдвигу в твердых телах // Физика металлов и металловедение, 1960. т. 9., № 2. - с. 258 – 264
5. Гонца В.Ф. Влияние слабой сжимаемости на решение задач теории для несжимаемых материалов //Вопросы динамики и прочности, №20, 1970. - с 181-193
6. Иваньков С.А., Башкарев А.Я., О долговечности и прочности композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, №4 (110), СПб, Изд. СПбГПУ, 2011. – с. 196 -199 .
7. Казакевич Г.С., Рудской А.И. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности. Учеб. пособие, СПб, Изд. СПбГПУ, 2003. - 263 с.
8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1982. - 320 с.
9. Логинов Б.А. Удивительный мир фторополимеров, М., Мир, 2008. - 128 с.
10. Мур Д. Основы применения трибоники, М., Мир, 1978. - 487 с.
11. Навасардич Г.Г., Березников В.В. Перспективы применения полимерных материалов при ремонте сельскохозяйственной техники //

Пластические массы, 1973. № 11. - с. 71-73.
12. Основы трибологии. А.В.Чичинадзе [и др.]; под ред. А.В.Чичинадзе, М., Машиностроение, 2001. - 663 с.
13. Паршин Ю.А., Малькевич С.Г., Дунаевская Ц.С., Фторопласты, Л., Химия, 1978. - 231 с.
14. Платонов В.Ф. Подшипники из полиамидов, М., Машгиз, 1961. - 112 с.
15. Раевский А.Н. Полиамидные подшипники, М., Машиностроение, 1967. - 138 с.
16. Шестаков Б.М. Работоспособность тонкослойных полимерных покрытий. М.: Машиностроение, 1973. - 160 с.

A.V. Kushchenko, A.Y. Bashkarev, V.F. Korelin

THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF POLIAMIDE COATINGS WHEN RESTORING PRESS-FIT CONNECTIONS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Abstract

Press-fit connections in construction machinery are subject to fretting wear and tear as a result the fretting-corrosion. One of ways of struggle against this phenomenon could be the application of thin-layer polymer coating. We investigated the value of the coefficient of friction of rest thin-layer polyamide coatings for steel. Established that it decreases with increase of pressure in the friction zone.

Key words: construction machinery, press-fit connections, polyamide coating, the friction coefficient.

REFERENCES

[1] Ambardzumyan S.A. Raznomodulnaya teoriya uprugusty, M., Izd. Kniga po trebowaniyu, 2012. - 159 p., (rus.)
[2] Borovikov V.P., Borovikov I.P. Statistichesky analis i obrabotka dannich v srede Windows, M., Izd. «Filin», 1997. - 608 p., (rus.)
[3] Bilik Sh.M., Protasov R.N, Iznosostoikost plastmass pri reversivnom trenii i malih skorostyach skolzhenia // Treniye, iznashivaniye i kacestvo poverchnosty M., Nauka, 1973, - p. 140-146., (rus.)
[4] Vereshchagin L.F., Shapochkin V.A. Vliyanie gidrostaticheskogo davleniya na soprotivlenie sdvigu v tverduch telach // Physika metallov i metallovedenie, 1960, So 9., № 2, - p. 258-264., (rus.)
[5] Gonta V.F. Vliyanie slaboy szhimaemosti na resheniye zadach teorii dlya neszimaemich materialov //Voprosi dinamiki i prozhnosti, №20,

1970, - p.181-193., (rus.)
[6] Ivankov S.A., Bachkarev Y.A. O dolgovechnosti i prochnosti kompozitov // Nauchno-technicheskiye vedomosti SPbSPU, №4 (110), SPb, Izd. SPbSPU, 2011. - p. 196-199, (rus.)
[7] Kazakevich G.S., Rudskoy A.I. Mechanica sploshnich sred. Teoriya uprugosti i plastichnosti., SPb., Izd. SPbSPU, 2003. - 263 p., (rus.)
[8] Linnik U.V. Metod naimenshich kvadratov i osnovi matematiko - statisticheskoy obrabotki nabludeny. M., Fizmatgiz, 1982. - 320 p., (rus.)
[9] Loginov B.A. Udivitelny mir ftoropolimerov, M., Mir, 2008. - 128 p., (rus.)
[10] Moore D. Osnovi primenenia triboniki, M, Mir, 1978. - 487 p., (rus.)
[11] Navasardich G.G., Bereznikov V.V. Perspectivi primeneniya polimernich materialov pri remonte selskochzyaistvennoy techniki // Plasticheskiye massi, 1973. № 11. - p. 71-73., (rus.)
[12] Osnovi tribology. A.V. Chichinadze [and other]; edited by A.V. Chichinadze, M, Mashinostroeniye, 2001/ - 663 p., (rus.)
[13] Parshin Y.A, Malkevich S.G., Dunaevskaya C.S., Ftoroplasti, L., Chimia, 1978. - 231 p., (rus.)
[14] Platonov V.F. Podshipniki iz poliamidov, M, Machgiz, 1961. - 112 p., (rus.)
[15] Raevsky A.N. Poliamidnie podshipniki, M, Mashinistroenie, 1967. - 138 p., (rus.)
[16] Shestakov B.M. Rabotosposobnost tonkosloynich polimernich pokrity. M., Mashinostroenie, 1973. - 160 c.

УДК 62-408.64:67.019

К.П. Манжула

О ПАРАМЕТРАХ КРАЕВОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Константин Павлович Манжула, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)-552-8401, E-mail: manshula@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается развитие краевой полуэллиптической трещины в зоне концентратора напряжений и при наличии остаточных напряжений. Получены уравнения, связывающие большую и малую полуоси трещины на пэрисовском участке подрастания с учетом закрытия трещины. Графической иллюстрацией показано, что по мере продвижения трещины в глубину ее длина имеет опережающий рост.

Ключевые слова: механика разрушения, полуэллиптическая трещина, остаточные напряжения, рост трещины

Краевые усталостные трещины, формирующиеся у концентраторов, на первоначальном этапе развития имеют форму, определяемую зоной пластичности и, как правило, близкую к полуэллиптической по контуру. Первоначальная глубина l_f сформировавшейся макротрещины равна размеру зоны циклически неупругой деформации у концентратор а [1], а ее длина составляет 2а (рис. 1). Дальнейшая форма фронта трещины зависит от градиента напряжений внешней нагрузки, а при наличии в конструкции остаточных напряжений – от градиента и знака остаточных напряжений [2]. В сварных соединениях остаточные напряжения поперечные к шву в зоне сопряжения основного металла с наплавленным являются растягивающими, если эта зона не подвергалась наклепу, оплавлению и пр. Поэтому в плоских лабораторных образцах, испытываемых на усталость, фронт трещины вначале движется вдоль шва, а затем распространяется в глубину. В реальной конструкции конфигурация фронта трещины будет определяться соотношением эпюр остаточных напряжений и от внешней нагрузки.

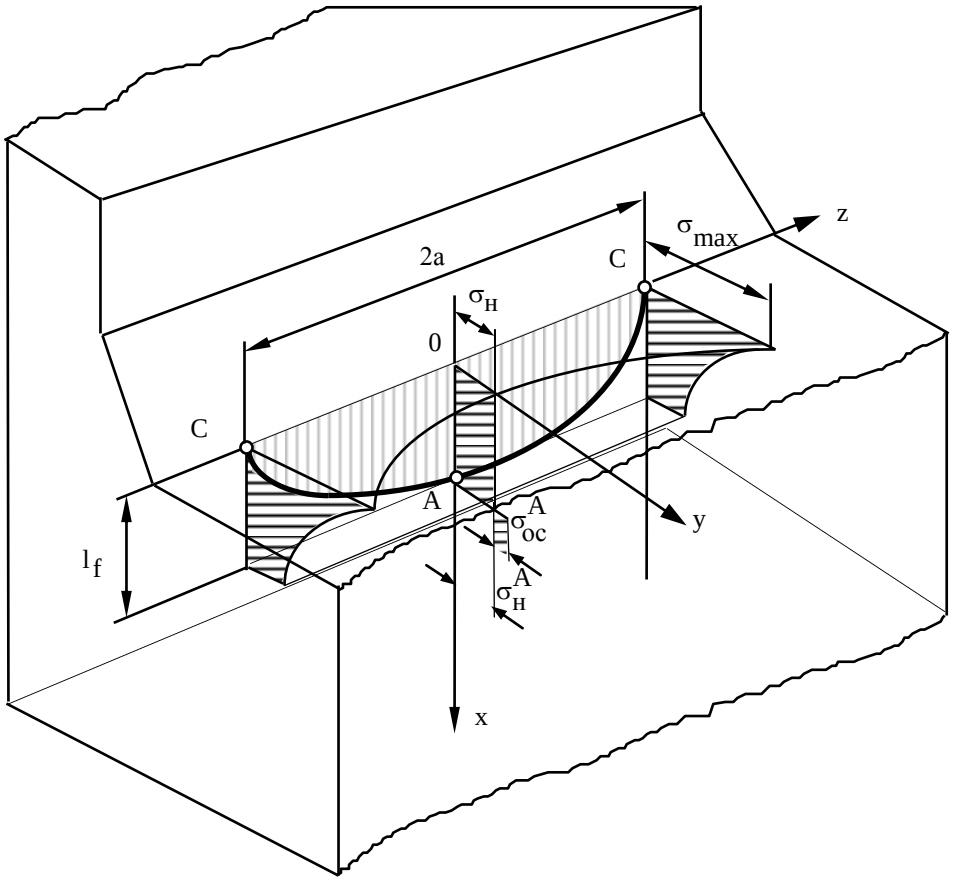


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние на берегах трещины при растяжении сварного соединения вдоль оси 0-Y

В данной работе рассматривается первоначальная форма усталостной макротрещины, образующаяся под действием внешнего растяжения и сварочных остаточных напряжений. Остаточные напряжения в зоне раскрытия трещины от т. 0 к т. А снимаются, а ниже точки А суммируются с напряжениями от внешней нагрузки. У точек С эпюры остаточных и действующих напряжений равны сумме σ_{max} . Будем полагать, что между точками А и С вдоль фронта трещины уровень остаточных напряжений сохраняется одинаковым (рис.1). Для расчета долговечности соединения с полуэллиптической трещиной интегрирование ведется по двум полуосям и при этом могут быть использованы различные уравнения скорости роста трещины, обзор которых содержится в [3]. Однако наиболее простым, распространенным и достаточно точным является уравнение предложенное Пэрисом и Эрдоганом [4], в соответствии с которым долговечность в форме числа циклов по глубине трещины выражается как

$$N = \int_{\ell_f}^{\ell_{fc}} \frac{\Delta K^{-n}}{C} d\ell \ , \qquad (1)$$

где C и n – экспериментальные параметры, однако в конструкции для определения степени повреждаемости часто необходимо связать видимую поверхностную длину трещины с ее глубиной. Это также необходимо знать в момент прорастания трещиной толщины элемента и переходу распространению ее вдоль шва. В этом случае пределы интегрирования в зависимости (1) заменяются на a_0 и a_{fc} в верхнем и нижнем пределах, а значит введение конкретного значения a_0 становится актуальным.

В работе [5] длина a_0 определялась на основе экспериментальных замеров фронта трещины, видимого на усталостном изломе сварного образца. Первоначальное отношение полуосей определено как l_f/a_0= 0,4...0,6. Получим аналитическое выражение для соотношения полуосей начальной макротрещины.

Уравнение роста трещины относительно малой полуоси запишем в виде, полученном в работе автора [6]

$$\frac{d\ell}{dN} = C_{eff}\left[\left(K_{I,A} + K_{oc,A}\right)\frac{1 - R_{\sigma,A}}{1{,}5 - R_{\sigma,A}}\right]^{n_{eff}}, \qquad (2)$$

где C_{eff} и n_{eff} - параметры уравнения Элбера [7], учитывающего закрытие трещины;

$K_{I,A}$ и $K_{oc,A}$ - коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) в т. А от действующих $\sigma_н^A$ и остаточных σ_{oc}^A напряжений;

$R_{\sigma,A}$ - коэффициент асимметрии цикла внешнего нагружения в т. А.

Относительно большой полуоси оно запишется в виде

$$\frac{da}{dN} = C_{eff}\left[\left(K_{I,C} + K_{oc,C}\right)\frac{1 - R_{\sigma,C}}{1{,}5 - R_{\sigma,C}}\right]^{n_{eff}}, \qquad (3)$$

где $K_{I,C}$ и $K_{oc,C}$ - коэффициенты интенсивности напряжений в т. С от действующих и остаточных напряжений; $R_{\sigma,C}$ - коэффициент асимметрии цикла внешнего нагружения т . С.

Из системы этих двух уравнений получим одно

$$\frac{d\ell}{da} = \left[\frac{K_{I,A} + K_{oc,A}}{K_{I,C} + K_{oc,C}} \cdot \frac{\left(1 - R_{\sigma,A}\right)\cdot\left(1{,}5 - R_{\sigma,C}\right)}{\left(1{,}5 - R_{\sigma,A}\right)\cdot\left(1 - R_{\sigma,C}\right)}\right]^{n_{eff}}. \qquad (4)$$

Аналитические зависимости для КИН в полосе с полуэллиптической трещиной известны для случаев растяжения [8, 9] и изгиба полосы [9].

Для определения КИН воспользуемся решением, полученным И.П.Васькивым и Р.В.Ризнычуком и приведенным в [10] для полосы, ослабленной полуэллиптической трещиной и растягиваемой равномерными напряжениями $\sigma_н$

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi \cdot l}\left(\cos^2 \vartheta + \frac{l^2}{a^2}\sin^2 \vartheta\right)^{1/4} M\left(\frac{l}{\delta}, \frac{l}{a}\right) \cdot f\left(\frac{l}{\delta}, \vartheta\right)}{E(R)}, \qquad (5)$$

где $$M\left(\frac{l}{\delta}, \frac{l}{a}\right) = \frac{E(R)}{\sqrt{\frac{l}{a}}} - \left(\frac{E(R)}{\sqrt{\frac{l}{a}}} - 1 - \frac{0{,}12}{1+\left(\frac{l}{a}\right)^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-1{,}48\left(\frac{l}{\delta}\right)^2}{1+6\left(\frac{l}{a}\right)^3}\right);$$

$$f\left(\frac{l}{\delta}, \vartheta\right) = 1 + \left[0{,}1 + 0{,}53\left(\frac{l}{\delta}\right)^3\right] \cdot \left(\frac{2\vartheta}{\pi}\right)^3;$$

$$E(R) = \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8}\left(\frac{l}{a}\right)^2.$$

Обозначения в зависимости (5) соответствуют рис. 2.

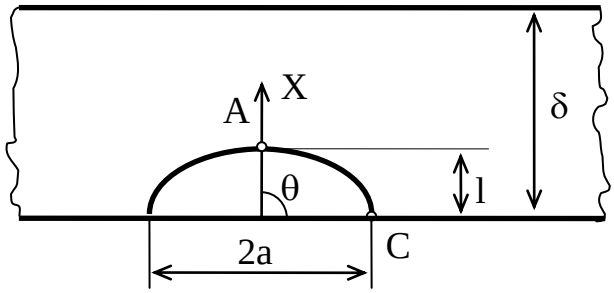


Рис. 2. Схема полуэллиптической трещины

На рис. 3 построены по уравнениям работы [9] графики изменения КИН в точках А и С фронта полуэллиптической трещины в полосе толщиной 10 мм при ее растяжении и изгибе. При глубине трещины менее 1,5 мм вид нагружения мало влияет на значения КИН. Видно, что изгиб является мене опасным видом нагружения по сравнению с растяжением и трещина при изгибе растет преимущественно в длину, а не в глубину.

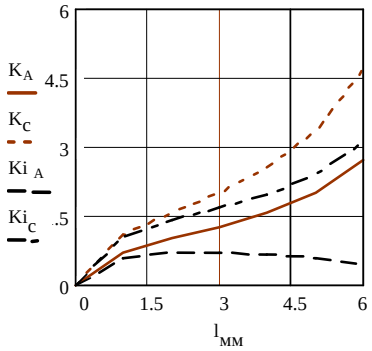


Рис. 3. КИН в точках А и С фронта полуэллиптической трещины для растягиваемой ($К_А$ и $К_С$) и изгибаемой полосы ($К_{iA}$ и $К_{iC}$)

Обозначения соответствуют рис. 2, а угол θ определяет положение любой точки на фронте трещины. Учитывая, что в точке А угол θ=0, а в точке С θ=π/2 и, принимая, что выражение для K_{oc} также имеет форму (5), получим уравнение (4) с учетом (5) в виде

$$\frac{a^{n/2}}{\sigma_{\Sigma C}^{n}}\left(\frac{1-R_{\sigma C}}{1{,}5-R_{\sigma C}}\right)^{n} da=\frac{l^{n/2}}{\sigma_{\Sigma A}^{n}}\cdot\left\{\left[1{,}1+0{,}53\left(\frac{l}{\delta}\right)^{3}\right]\frac{1-R_{\sigma A}}{1{,}5-R_{\sigma A}}\right\}^{n} dl, \qquad (6)$$

где $\sigma_{\Sigma A}=\sigma_{max}=K_t\sigma_н+\sigma_{oc.,A}$; $R_{\sigma A}=\dfrac{K_{IA\,min}+K_{IocA}}{K_{IA\,max}+K_{IocA}}$;

$\sigma_{\Sigma C}=\sigma_н+\sigma_{oc,C}$; $R_{\sigma C}=\dfrac{K_{IC\,min}+K_{IocC}}{K_{IC\,max}+K_{IocC}}$;

$\sigma_A=\sigma_C=\sigma_н$ - напряжения от внешней нагрузки в точках А и С;

K_t - теоретический коэффициент концентрации напряжений в околошовной зоне;

σ_{ocA}, σ_{ocC} - сварочные остаточные напряжения в точках А и С.

Экспериментально определяемые значения показателя степени n_{eff} уравнения Элбера незначительно отличаются от показателя степени n уравнения Пэриса и поэтому для компактности написания в (6) принято $n_{eff}=n$.

Коэффициенты асимметрии цикла R_σ в точках А и С определяются через напряжения или через КИН, которые пропорциональны соответствующим напряжениям. С незначительной погрешностью (на разницу знакопостоянной составляющей цикла - остаточными напряжениями - между точками А и С) можно положить, что коэффициенты асимметрии напряжений R_σ в точках А и С примерно равны. Это приводит уравнение (6) к более простому виду, которое после разделения переменных и интегрирования запишется

$$\int_0^{a_f}\frac{a^{n/2}}{\sigma_{\Sigma C}^{n}}da=\int_0^{l_f}\frac{l^{n/2}}{\sigma_{\Sigma A}^{n}}\cdot\left[1{,}1+0{,}53\left(\frac{l}{\delta}\right)^{3}\right]^{n} dl. \qquad (7)$$

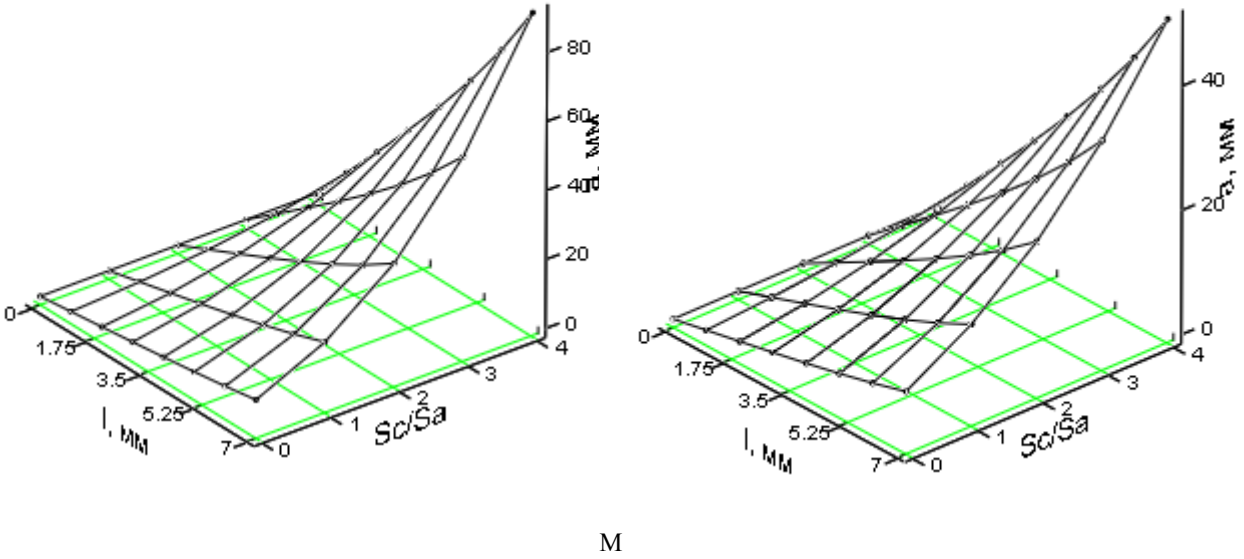
Решение этого уравнения при наиболее типичных значениях показателя n=3 и 4 дает:

при n=4

$$a_f=1{,}442\left(\frac{\sigma_{\Sigma C}}{\sigma_{\Sigma A}}\right)^{4}\left(0{,}488\cdot\ell^{3}+5{,}26\cdot10^{-3}\frac{\ell^{15}}{\delta^{12}}+5{,}459\cdot10^{-2}\frac{\ell^{12}}{\delta^{9}}+0{,}2266\frac{\ell^{9}}{\delta^{6}}+0{,}4703\frac{\ell^{6}}{\delta^{3}}\right)^{1/3} \qquad (7)$$

при n=3

$$a_f = 1{,}442\left(\frac{\sigma_{\Sigma C}}{\sigma_{\Sigma A}}\right)^3\left(5{,}115\cdot10^{-9}\cdot\ell^{\frac{5}{2}} + 2{,}635\cdot10^{14}\frac{\ell^9}{\delta^9} + 2{,}132\cdot10^{7}\frac{\ell^6}{\delta^6} + 6{,}839\cdot10^{7}\frac{\ell^3}{\delta^3}\right)^{2/5} \quad (8)$$



M M

а) б)

Рис. 4. Зависимость длины a (полуоси) трещины от ее глубины l и отношения напряжений $\sigma_{\Sigma C}/\sigma_{\Sigma A}$ (S_C/S_A), $\delta = 10$мм ; а) - при n=4; б) - при n=3

Анализ уравнений (7) и (8) представлен на рис. 4. Несмотря на разный вид уравнений, характер поверхностей показывает их качественную идентичность. При показателе степени n=3 большая полуось эллипса с ростом уровня напряжений растет медленнее. Соотношение между большой и малой полуосью при n=3 колеблется от двух до семи. Аналогичное соотношение при n=4 составляет 2...11 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циклические деформации и усталость металлов. В 2-х т. Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов. Т.2. Циклические деформации и усталость металлов./ Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Покровский В.В. и др. Под ред. Трощенко В.Т.- Киев: Наук. думка, 1985.- Т.1. 216 с. - Т.2. 224 с.
2. Манжула К.П., Петинов С.В. Прочность и долговечность конструкций при переменных нагрузках. Учебное пособие. - СПб.: СПбГТУ, 2001. - 76 с.
3. Механика разрушения и прочность металлов. Справочное пособие:

4т./ Под общ. ред. Панасюка В.В. - Киев: Наук. думка, 1988-1990. Т4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов/ Романив О.Н., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. - 1990.- 680 с.
4. Paris P.C., Erdogan F.A critical analysis of crac propagation laws//Tans ASME. J. Basic.Eng. – 1963/- 85, №4.- P. 528-534.
5. Соколов С.А. Методологические основы прогнозирования долговечности металлических конструкций грузоподъемных машин: дис.… д-ра техн. наук: 05.05.05/Соколов Сергей Алексеевич.- СПб, 1995.- 332 с.
6. Манжула, К.П. Теория и методы расчета сопротивления усталости металлических конструкций грузоподъемных машин: дис. … д-ра техн. наук: 05.05.05 / Манжула Константин Павлович. – СПб., 1997. – 356 с.
7. Elber W. Fatique crack closure under cyclic tension// Eng. Fract. Mech.- 1972.- 2, ¹ 1.- P. 37-45.
8. Панасюк В.В., Осташ О.П., Костык Е.М. О связи характеристик циклической трещиностойкости материалов на стадии зарождения и роста трещины// Физ.-хим. механика материалов.- 1986.- № 6.- С. 46-52.
9. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах./ Под ред. Ю.Мураками.-М.: Мир, 1990.- 1016 с.
10. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов.- АН УССР. Физико-механический ин-т.- Киев: Наук. думка, 1991.- 411 с.

K.P. Manzhula

PARAMETERS OF EDGE CRACK UNDER THE ACTION OF EXTERNAL LOADING AND RESIDUAL STRESS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper considers development of semi-elliptical edge crack in the zone of a stress concentrator and the presence of residual stresses. Equations are obtained linking major and minor semi-axis crack on a plot of Perisa grow up considering crack closure. Graphic illustration shows that when the crack moves into the depth of, its length is anticipating growth.

Key words: fracture mechanics, semi-elliptical crack, residual stresses, crack growth

REFERENCES

[1] Cyclic deformation and fatigue of metals. In 2 volumes Vol.1. Low-cycle and high-cycle fatigue of metals. V.2. Cyclic deformation and fatigue of metals. / Troshchenko V.T., Khamaza L.A., Pokrovsky V.V., et al, Ed. Troshchenko V.T. - Kiev Sciences. Dumka, 1985. - Vol.1. 216. - V.2. 224. (rus)

[2] Manzhula K.P., Petinov S.V. The strength and durability of structures under variable loads. Textbook. - St. Petersburg.: SPbGTU 2001. - 76. (rus)

[3] Fracture mechanics and strength of metals. Handbook: 4t. / Under total. Ed. V.V. Panasyuk - Kiev: Science. Thought, 1988-1990. T4.: Fatigue and cyclic fracture toughness of structural materials / Romaniv O.N., Yarema S.Y., Nikiforchin G.N. et al -1990. - 680. (rus).

[4] Paris P.C., Erdogan F.A critical analysis of crac propagation laws//Tans ASME. J. Basic.Eng. – 1963/- 85, №4.- P. 528-534.

[5] Sokolov SA Methodological basis of forecasting durability of metal structures hoisting machines : dis .... Dr. tehn. Sciences: 05.05.05/Sokolov Sergey . - St. Petersburg , 1995 . – 332 (rus).

[6] Manzhula , K.P. Theory and methods of calculating the fatigue resistance of metal structures hoisting machines : dis . Dr. ... tehn. Sciences: 05.05.05 / Manzhula Konstantin Pavlovich . - St. Petersburg. , 1997 . – 356 (rus).

[7] Elber W. Fatique crack closure under cyclic tension // Eng. Fract. Mech. - 1972 . - 2 , ¹ 1 . - P. 37-45.

[8] Panasiuc V.V., Ostash O.P., Kostyk E.M. On the connection characteristics of cyclic crack resistance of materials at the stage of nucleation and growth of cracks // physico-chemical . Mechanics of Materials . - 1986 . - № 6. - S. 46-52 (rus).

[9] Spravochnik Stress intensity factors : In 2 vols . / Ed. Yu.Murakami. - M . : Mir, 1990 . - 1016 .

[10] Panasyuk V.V. Quasibrittle fracture mechanics of materials . - Ukrainian Academy of Sciences . Physicomechanical Inst . – Kiev, Sciences. Dumka , 1991 . – 411 p. (rus).

УДК 624.014.078.45

Э.И. Мансырев[1], О.М. Мельников[2]

ОЦЕНКА ДЛИНЫ ТРЕЩИНЫ В ЗАЩЕМЛЕННОМ SENT-ОБРАЗЦЕ МЕТОДОМ ПОДАТЛИВОСТИ

[1]Энвер Ибрагимович Мансырев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
М. тел.: (921)907-6853, E-mail: enver.mansyrev@yandex.ru

[2]Олег Михайлович Мельников
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)492-0015, E-mail: mom846@gmail.com

Аннотация

Методом наименьших квадратов определены коэффициенты полинома 5-ой степени, аппроксимирующего зависимость безразмерной длины трещины в SENT-образце от безразмерной податливости образца. Исследована возможность применения этой зависимости для оценки характеристик трещиностойкости с помощью *R*-кривых ("однообразцовый" метод) в соответствии с международным стандартом Offshore Standard DNV-OS-F101 (Recommended Practice DNV-RP-F108). Выполнена проверка точности согласования полученной зависимости с экспериментальными данными.

Ключевые слова: испытания на трещиностойкость, метод определения длины трещины, SENT-образец, инженерная оценка критического состояния трубопровода.

1. Введение

Современные стандартные методы оценки трещиностойкости металлов [1-4] с привлечением критических величин параметров трещиностойкости предполагают проведение ряда испытаний образцов стандартной формы, наиболее распространенными из которых являются испытания на растяжение компактных образцов (CT) и испытания на 3-х точечный изгиб образцов с односторонним надрезом (SENB). Образцы такого типа обычно используются и для оценки параметров процесса докритического стабильного роста трещин, которая основана на экспериментальном определении кривых сопротивления стабильному росту трещин (*R*-кривых) [1,3].

Стандартные процедуры построения *R*-кривых предполагают применение как многобразцового метода (Multiple specimen test procedure), так и однообразцового метода (Single specimen test procedure). В последнем случае построение *R*-кривой производится по результатам нагружения одного образца с серией промежуточных разгрузок, в каждой из которых определяется достигнутая величина параметра трещиностойкости (обычно раскрытие в вершине трещины CTOD или величина *J*-интеграла) в зависимости от величины увеличения длины трещины Δa (в действительности используются три образца, испытания первых двух из которых необходимы для корректного выбора диапазона изменения Δa). Определение увеличения длины трещины, которое при использовании многобразцового метода производится прямым измерением оптическим прибором на поверхности доведенного до разрушения образца в плоскости развития трещины, в случае однообразцового метода производится косвенным способом, – по изменению податливости образца. Преимущество однообразцового метода очевидно, – для достижения результата требуется меньший объем испытаний, однако этот метод предполагает использование более прецизионных средств измерений, чем в случае многобразцового метода. В соответствии со стандартами [1,3], результаты, полученные однообразцовым методом считаются удовлетворительными, если финальная величина увеличения длины трещины (увеличение длины трещины при последней разгрузке), определенная методом податливости, отличается от результата непосредственного измерения не более чем на 15%.

Изменяющуюся за счет увеличения длины трещины податливость образца при его разгрузке удается установить по показаниям силоизмерителя и показаниям навесного датчика раскрытия устья трещины (экстензометра CMOD). Таким образом, если известна аналитическая зависимость между податливостью образца, его геометрическими размерами, упругими постоянными материала и длиной трещины, то она в конечном итоге предоставляет возможность определить изменяющуюся длину трещины и ее увеличение в процессе испытания без разрушения образца. Указанные зависимости для типовых стандартных образцов, имеющие вид полиномов 5-ой степени или табличный вид, как правило, приведены в соответствующих стандартах [1,3,4].

Инженерная оценка критического состояния магистральных трубопроводов (ECA), и особенно подводных магистральных трубопроводов, в международной практике регламентируется преимущественно стандартами [5,6]. Необходимые для оценки трещиностойкости данные в соответствии с этими стандартами должны быть установлены по результатам испытаний SENT-образцов на растяжение, как наиболее адекватные с точки зрения напряженно-деформированного состояния в трубопроводе при его монтаже и эксплуатации. Однако, приведенный в этих стандартах метод обработки экспериментальных данных основан на полученном Ж. Ахма-

дом [7] решении для *J*-интеграла в области упругопластического деформирования и не содержит зависимости между длиной трещины и податливостью SENT-образца. В работах С. Краверо и К. Руджиери [8], Ж. Шена [9], Л. Матиаса [10], М. Верстрата [11] и других приведены результаты исследований податливости SENT-образцов в более широком диапазоне длин трещин, чем это регламентируют стандарты [5,6]. Полученные в этих работах результаты несколько различаются и не содержат анализа их точности.

Поэтому основной целью настоящей работы является получение указанной зависимости, а также проведение анализа точности и возможности ее использования в случае применения однообразцового метода построения *R*-кривых с помощью SENT-образцов в соответствии со стандартами [5,6].

2. Численное решение

Достоверное экспериментальное определение податливости любого механического объекта связано с податливостью оборудования, на котором проводятся испытания, и податливостью оснастки, находящейся в непосредственном контакте с испытуемым объектом. С этой точки зрения защемленные в захватах по концам SENT-образцы (рис. 1.) представляются наиболее привлекательными, так как не требуют дополнительной оснастки для их фиксации, которая может повлиять на результаты измерений.

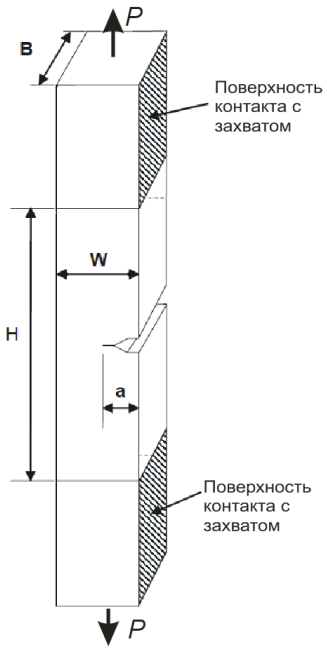


Рис. 1. Схема SENT-образца

Численное моделирование деформирования образцов производилось в объемной постановке в пределах упругости. Вследствие двойной симметрии образца (рис. 2.1) моделировалось деформирование только одной его

четверти, форма образца задавалась с регламентируемыми стандартом [6] геометрическими пропорциями: $H/W = 10$ (в исследовании С. Краверо [8] отмечено, что для защемленных SENT-образцов наблюдается зависимость безразмерной длины трещины от безразмерной длины образца H/W, для шарнирно закрепленных SENT-образцов эта зависимость отсутствует); $B/W = 1{,}0 – 5{,}0$; $a/W = 0{,}2 – 0{,}5$, где H - длина рабочей части образца; B - ширина образца; W - его толщина; a - длина трещины. Поскольку стандарт [3] рекомендует определять R-кривые по результатам испытаний образцов с боковыми проточками, обеспечивающими большую точность плоскости развития трещины и прямолинейности ее фронта (в стандарте [6] требований о присутствии или отсутствии таких проточек нет), расчеты выполнялись как для "гладких" образцов, так и образцов со стандартными по [3] боковыми проточками.

В выполненных расчетах моделировалось деформирование, вызванное взаимным перемещением поверхностей контакта образца с захватами испытательного оборудования на заданную величину в направлении продольной оси образца (то есть *LLD* - Load Line Displacement), результатом расчетов являлись величины растягивающего усилия P и величины перемещения края надреза V, то есть величины, соответствующие показаниям экстензометра CMOD - Crack Mouth Opening Displacement. Полученные результаты однократного расчета при заданной величине длины трещины предоставляли возможность вычислить унифицированную в международных стандартах безразмерную податливость растянутого образца

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{E'\Delta V\, B_{ef}}{\Delta P}}} \quad , \tag{2.1}$$

где $\Delta V = V$; $\Delta P = P$;

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \tag{2.2}$$

– приведенный модуль нормальной упругости в условиях плоской деформации; E – модуль нормальной упругости материала; ν – коэффициент Пуассона;

$$B_{ef} = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \tag{2.3}$$

– эффективная ширина образца; B_N – "нетто" ширина образца (ширина образца с учетом боковых проточек).

По завершении каждой серии из 6 расчетов для одного типоразмера образца, отличающихся длиной трещины, методом наименьших квадратов выполнялось вычисление коэффициентов полинома 5-го порядка для аналитической зависимости безразмерной длины трещины a/W от безразмер-

ной податливости образца U

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U + C_2 U^2 + C_3 U^3 + C_4 U^4 + C_5 U^5 \qquad (2.4)$$

Полученные результаты для 8-ми серий расчетов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Образец №	Размеры образца W x B, мм	B/W	Коэффициенты полинома (2.4)					
			C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1	22 x 22	1,0	1,00602	-0,40061	-14,30242	47,84420	-67,41730	36,94446
2	22 x 33	1,5	1,01912	-0,63000	-12,73224	43,09423	-60,84675	33,51203
3	22 x 44	2,0	0,97960	-0,08397	-15,75893	51,59603	-73,02185	40,39987
4	22 x 22 *)	1,0	1,00581	-0,39787	-14,39738	48,35356	-68,45909	37,52737
5	22 x 33 *)	1,5	0,98693	-0,16116	-15,52619	51,35864	-72,99918	40,44308
6	22 x 44 *)	2,0	0,97960	-0,08397	-15,75893	51,59603	-73,02185	40,39987
7	22 x 66 *)	3,0	1,04915	-1,12541	-9,49282	33,05273	-46,12459	25,07246
8	22 x 88 *)	4,0	1,06484	-1,31814	-8,49163	30,47673	-42,93018	23,56682

*) Образец с боковыми проточками

Нетрудно заметить, что разброс однотипных коэффициентов на первый взгляд представляется значимым. Однако не приведенные здесь графики полученных зависимостей в стандартном диапазоне a/W = 0,2 – 0,5 практически сливаются, что свидетельствует о весьма близких результатах для всех рассмотренных типоразмеров образцов.

Точность полученных результатов зависит как от выбора расчетной конечноэлементной (КЭ) модели (степени дискретизации, типа конечных элементов и тому подобных факторов), так и от численной реализации, связанной с вычислительными алгоритмами и точностью арифметических операций (вычисления, выполненные в КЭ-анализе, и вычисления коэффициентов полинома выполнялись с точностью до 5-го знака после десятичной запятой). Ограничиваясь здесь лишь основными общими сведениями, отметим, что все расчеты выполнялись с помощью пакета прикладных программ ANSYS 11 [12], дискретизация геометрической модели образца осуществлялась 20-ти узловыми элементами типа SOLID95 с опциями формы, позволяющими генерировать регулярную сетку конечных элементов, общее количество узлов для одной четверти образца варьировалось в диапазоне приблизительно от 60 тысяч до 200 тысяч в зависимости от абсолютных размеров образца. Для объективной оценки точности полученных результатов использовался статистический подход: рассматривая длину трещины в расчетах как заданную величину, а соответствующую вычисленную податливость образца как случайную величину, приходим к статистическим оценкам, приведенным в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

a/W	Среднее значение U	Дисперсия D_U	Коэфф. вариации, v_U, %
0,20	0,45399	3,29742E-06	0,40
0,26	0,40827	1,27073E-06	0,28
0,32	0,36778	8,51602E-07	0,25
0,38	0,33120	8,18479E-07	0,27
0,44	0,29772	7,94905E-07	0,30
0,50	0,26668	7,03127E-07	0,31

Для окончательного определения коэффициентов полинома в выражении (2.4) вновь использовался метод наименьших квадратов по отношению к данным, приведенным в первых двух колонках табл. 2.2. Результат этих вычислений представлен в табл. 2.3, график представляющей интерес зависимости (2.4), – на рис.2.2.

Таблица 2.3.

Коэффициенты полинома					
C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1,01665	-0,60260	-12,84533	43,30573	-61,10334	33,59867

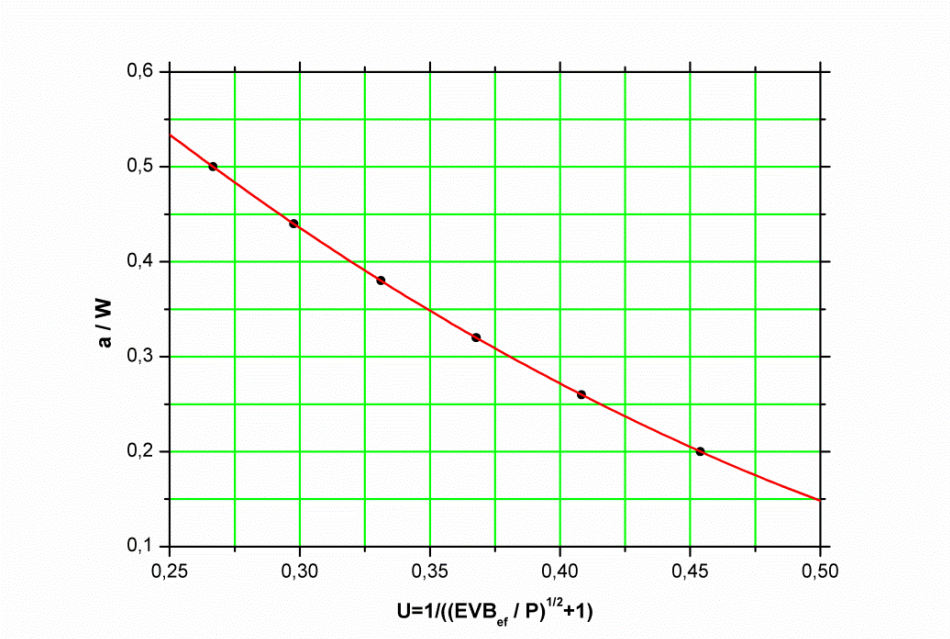


Рис.2.2. График зависимости безразмерной длины трещины a/W от безразмерной податливости SENT-образца U

Вновь обратимся к точности полученных расчетных данных. Зависимость безразмерной длины трещины от безразмерной податливости образца, построенная по вычисленным "средним" значениям U с помощью при-

веденных в табл. 2.3 коэффициентов, сопоставлялась зависимостям, построенным для каждого типоразмера образца (по данным табл. 2.2). Графики разностей этих зависимостей, то есть отклонений от "средней" кривой, приведены на рис. 2.3.

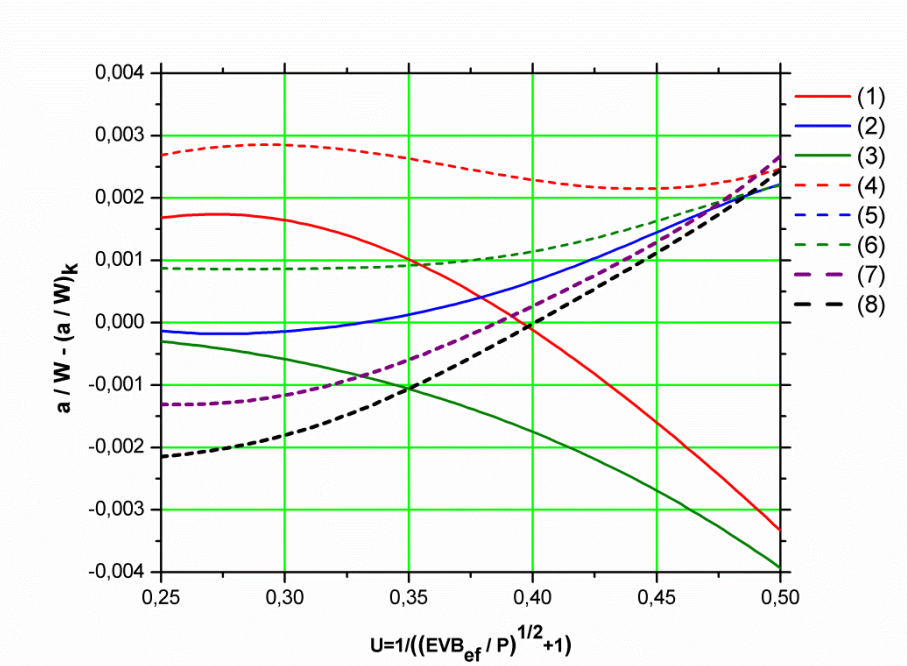


Рис. 2.3. Графики отклонений безразмерной длины трещины a/W от "средней" кривой (рис. 2.4), номера графиков соответствуют номерам образцов (таблица 2.2)

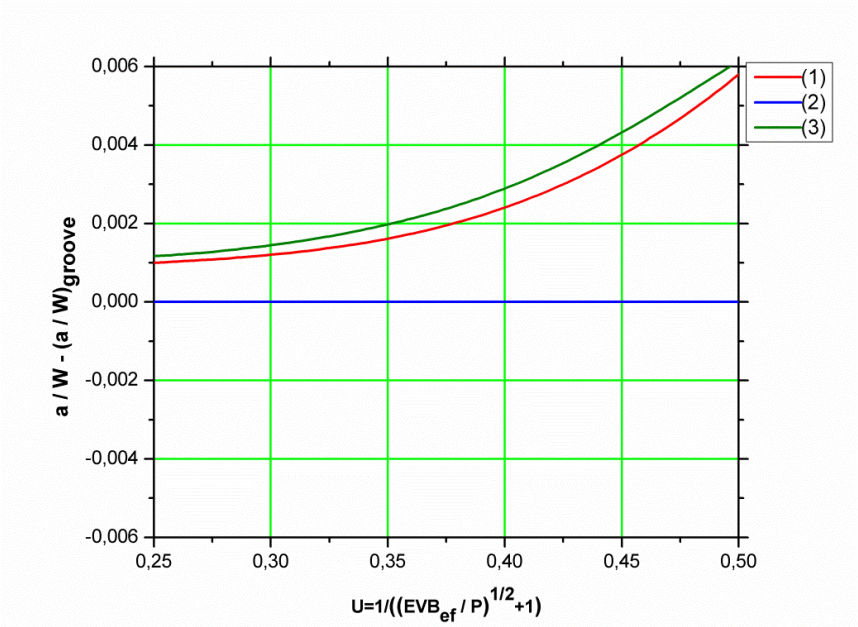


Рис. 2.4. Графики отклонений безразмерной длины трещины a/W для образцов с боковыми проточками от таких же образцов без проточек, номера графиков соответствуют номерам образцов без проточек (таблица 2.2)

Как нетрудно заметить, отклонения кривой $(a/W)_k$ для моделей образцов от "средней" кривой a/W отличаются от собственно значений функции не менее чем на два порядка. Следовательно точность полученного решения оказалась не ниже 1% и представляется удовлетворительной.

Отдельного внимания заслуживает влияние боковых проточек в образцах на податливость образцов. Сопоставляя функции $(a/W)_{groove}$ для образцов с боковыми проточками с функциями для идентичных образцов без проточек a/W (расчетные данные для первых трех образцов, представленные в табл. 2.2, соответствуют образцам без проточек, данные для следующих трех - таким же образцам с боковыми проточками) между собой (рис. 2.4), можно отметить, что отклонения имеют те же малозначительные величины, что и зафиксированные выше при определении "средней" кривой. Более того, для образцов с $B/W = 2$, которые в соответствии со стандартом [6] считаются основными, рассматриваемые отклонения оказываются еще на порядок ниже, то есть исчезающе малыми (график 2 на рис. 2.4).

3. Экспериментальная проверка

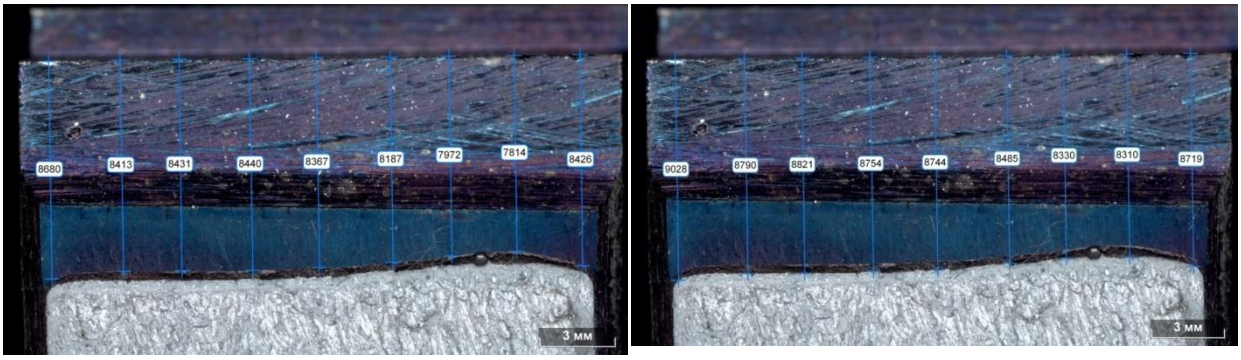
Представленный выше результат зависимости безразмерной длины трещины a/W от безразмерной податливости для защемленного SENT-образца U (соотношение 2.4 с коэффициентами, приведенными в табл. 2.3) получен численным моделированием и требует экспериментальной проверки.

Воспользуемся экспериментальными данными, полученными в ходе испытаний SENT-образцов по определению J-R-кривых для наплавленного металла ряда сварных соединений [13] в соответствии со стандартами [5, 6]. Испытания проводились при отрицательных температурах на оборудовании фирмы Instron, обеспечивающем цифровую запись параметров в процессе испытаний. Измерения геометрических размеров образцов и длин трещин выполнялось измерительными оптическими средствами с точностью, превышающей требования стандартов (точность измерения стартовых и финальных длин трещин составляла 1 *мкм*). Подготовительные операции, – увеличение длин надрезов в образцах усталостным нагружением, производились так же на оборудовании фирмы Instron по схеме 3-х точечного изгиба при комнатной температуре и частоте нагружения 25 *Гц*, управление оборудованием на этой стадии осуществлялось по каналу нагрузки. Основные испытания, - растяжение образцов с целью определения J-R-кривых, выполнялись в термокамере, отрицательная температура в которой поддерживалась за счет дозированного впрыска паров жидкого азота, на этом этапе управление оборудованием осуществлялось по каналу перемещения захватов.

Определение длин трещин выполнялось по результатам 9-ти измерений $a_1,...,a_9$ (рис. 3.1)

$$a = \frac{1}{8}\left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^{8} a_i\right) \qquad (3.1)$$

(такая процедура определения длины трещины рекомендуется в стандартах [2, 3], в стандартах [5, 6] подобная рекомендация отсутствует), что позволяло вычислить стандартным способом [6] значения *J*-интеграла и соответствующие значения длин трещин *a* и увеличений длин Δ*a*.



(а) (б)

Рис. 3.1. Измерение длин трещины SENT-образца (образец 1-1, табл. 3.1): (а) - стартовая длина трещины (после начального усталостного нагружения образца); (б) - финальная длина трещины (соответствует окончанию статического нагружения)

Оставляя в стороне особенности получения энергетических параметров трещиностойкости, рассмотрим только вопросы, связанные с длиной трещин. В табл. 3.1 приведены как результаты измерений длин трещин *a* и увеличений длин Δ*a*, зафиксированных в испытаниях на растяжение трех серий SENT-образцов измерительными оптическими средствами, так и их расчетные оценки a_c и Δa_c, полученные с помощью полинома (2.4) с коэффициентами, приведенными в табл. 2.3.

Относительные отклонения расчетных длин трещин от измеренных для всех испытанных образцов оказались не превосходящими 2%, что, с учетом установленной выше теоретической точностью расчетных оценок в 1%, представляется удовлетворительным. Осцилляция отклонений относительно измеренных величин длин трещин a позволяет надеяться об отсутствии недоучета значимых факторов в оценках физических процессов, которые могли бы привести к систематически нарастающей ошибке одного знака. Однако, с точки зрения точности регистрируемых в испытаниях по определению *R*-кривых приращений длин трещин □*a*, которые часто оказываются на порядок менее самих длин трещин, эти отклонения могут оказаться значимыми. Так, для образцов 1-2 и 2-4, представленных в табл. 3.1 (величины отклонений выделены жирным шрифтом в круглых скобках), эти отклонения не удовлетворяют требованиям стандарта [3] и стандарта

[1] (предельная величина отклонений в указанных стандартах установлена 15%, в стандарте [6], который SENT-образец полагает основным, подобное требование отсутствует). В то же время для образцов 1-1 и 3-6, для которых требования корректности стандартов [1,3] оказались выполненными, расчетные отклонения длины трещины составляют 0,05 мм и 0,14 мм (отклонения увеличения длины трещины 13,0% и 12,2%), а для указанных образцов 1-2 и 2-4, – 0,13 мм и 0,15 мм соответственно (19,6% и 22,2%). Таким образом, одно и то же отклонение расчетной длины трещины от измеренной, особенно если величина отклонения близка к абсциссам первых точек на *R*-кривых, может как удовлетворять требованию корректности, так и оказаться неприемлемой. Поэтому вопрос о влиянии исходных данных на точность вычисления длины трещины представляется актуальным.

Таблица 3.1.

№ обр.	Разм. обр. W x B, мм	a/W	Длина трещины			Увеличение длины трещины		
			Измеренная длина финальной трещины a, мм	Расчетная длина финальной трещины a_c , мм	Отклонение расчетной длины трещины от измеренной, $(a_c - a)/a$, %	Измеренное увеличение длины трещины Δa, мм	Расчетное увеличение длины трещины Δa_c , мм	Отклонение расчетного увеличения длины трещины от измеренного, $(\Delta a_c - \Delta a)/\Delta a$, %
Сварное соединение из стали класса прочности Х65, надрез в области металла шва, температура испытания -20°C								
1-1	22x24	0,48	10,51	10,56	0,4	0,35	0,40	13,0
1-2		0,50	10,88	11,01	1,2	0,66	0,79	**(19,6)**
1-3		0,48	10,54	10,45	-0,9	0,81	0,72	-11,6
1-4		0,48	10,47	10,43	-0,4	0,90	0,86	-4,5
1-5		0,46	10,10	10,09	-0,1	0,78	0,77	-1,7
1-6		0,49	10,90	10,77	-1,2	1,10	0,97	-12,1
Сварное соединение из стали класса прочности Х60, надрез в области металла шва, температура испытания -10°C								
2-1	13x26	0,52	6,70	6,74	0,6	0,44	0,48	8,7
2-2		0,49	6,37	6,37	-0,0	0,45	0,45	-0,5
2-3		0,53	6,93	6,88	-0,7	0,63	0,58	-7,5
2-4		0,51	6,80	6,65	0,5	0,67	0,52	**(-22,2)**
2-5		0,53	6,91	6,85	-0,9	0,74	0,68	-8,5
2-6		0,55	7,27	7,12	-2,0	1,04	0,89	-14,1
Сварное соединение из стали класса прочности Х60, надрез в области металла шва, температура испытания -5°C								
3-1	22x26	0,44	9,70	9,74	0,4	0,49	0,53	8,0
3-2		0,47	10,40	10,38	-0,2	1,27	1,25	-1,6
3-3		0,49	10,76	10,72	-0,4	1,74	1,70	-2,2
3-4		0,45	9,88	9,88	-0,0	0,76	0,76	-0,4
3-5		0,46	10,06	10,07	0,1	1,11	1,12	1,1
3-6		0,46	10,36	10,22	-1,4	1,18	1,04	-12,2

4. Анализ полученных результатов

Исходными данными, влияющими на результат оценки длины трещины ас (2.4) и ее увеличения Δa_c способом податливости, в первую очередь являются упругие постоянные материала (модуль нормальной упругости E, коэффициент Пуассона ν), а также регистрируемая в процессе разгрузок податливость образца $\Delta V/\Delta P$ (ΔV - показания датчика CMOD, ΔP - показания датчика усилия). Результаты численного варьирования этими

переменными для образца 2-3 (табл. 2.3) приведены в табл. 4.1 (для модуля нормальной упругости) и табл. 4.2 (для регистрируемой податливости образца).

Таблица 4.1.

№ обр.	Заданный модуль Юнга, E, ГПа	Длина трещины			Увеличение длины трещины		
		Измеренная длина финальной трещины a, мм	Расчетная длина финальной трещины a_c, мм	Отклонение расчетной длины трещины от измеренной, $(a_c - a)/a$, %	Измеренное увеличение длины трещины Δa, мм	Расчетное увеличение длины трещины Δa_c, мм	Отклонение расчетного увеличения длины трещины от измеренного, $(\Delta a_c - \Delta a)/\Delta a$, %
Сварное соединение из стали класса прочности Х60, надрез в области металла шва, температура испытания -10^{0}С, коэффициент Пуассона ν = 0,29							
2-3	180	6,93	6,79	-2,07	0,63	0,49	**(-22,8)**
	185		6,86	-1,07		0,56	-11,8
	190		6,92	-0,10		0,62	-1,1
	195		6,99	0,84		0,69	9,2
	200		7,05	1,76		0,75	**(19,3)**
	205		7,11	2,65		0,81	**(29,2)**
	210		7,17	3,52		0,87	**(38,7)**
	215		7,23	4,37		0,93	**(48,1)**

Таблица 4.2.

№ обр.	Заданная податливость образца $\Delta V/\Delta P$, мм/МН	Длина трещины			Увеличение длины трещины		
		Измеренная длина финальной трещины a, мм	Расчетная длина финальной трещины a_c, мм	Отклонение расчетной длины трещины от измеренной, $(a_c - a)/a$, %	Измеренное увеличение длины трещины Δa, мм	Расчетное увеличение длины трещины Δa_c, мм	Отклонение расчетного увеличения длины трещины от измеренного, $(\Delta a_c - \Delta a)/\Delta a$, %
Сварное соединение из стали класса прочности Х60, надрез в области металла шва, температура испытания -10^{0}С, модуль Юнга E = 187 ГПа, коэффициент Пуассона ν = 0,29							
2-3	1,57481	6,93	6,75	-2,55	0,63	0,45	**(-28,01)**
	1,59136		6,78	-2,16		0,48	**(-23,81)**
	1,60790		6,81	-1,79		0,51	**(-19,66)**
	1,62444		6,83	-1,41		0,53	**(-15,56)**
	1,64099		6,86	-1,05		0,56	-11,50
	1,65753		6,88	-0,68		0,58	-7,48
	1,67408		6,91	-0,32		0,61	-3,51
	1,69062		6,93	0,04		0,63	0,43
	1,70716		6,96	0,39		0,66	4,32
	1,72371		6,98	0,74		0,68	8,17
	1,74025		7,01	1,09		0,71	11,98
	1,75680		7,03	1,43		0,73	**(15,76)**
	1,77334		7,05	1,77		0,75	**(19,49)**

Выделенные жирным шрифтом в круглых скобках в этих таблицах отклонения расчетной длины увеличения трещины от измеренной не удовлетворяют требованиям корректности стандартов [1,3]. Определенный

по данным в табл. 4.1 удовлетворительный диапазон изменения модуля Юнга составляет δE=10 *ГПа*, то есть ±2,6% от величины E=190 *ГПа*, при которой отклонение расчетной длины увеличения трещины оказывается исчезающе малым (в представленных в табл. 2.4 данных для образцов серии 2 модуль Юнга был определен по результатам испытаний цилиндрических образцов из металла шва сварного соединения на растяжение и составил E=187 *ГПа*, оценка разброса модуля Юнга в этих испытаниях не производилась). Принимая во внимание установленную выше "теоретическую" точность полинома (2.4) в 1%, представляется закономерным, что точность определения модуля Юнга для практических расчетов должна быть выше, чем указанная (±2,6%).

Влияние же податливости образца, измеряемой в процессе разгрузок (табл. 4.2), как и ожидалось, имеет аналогичный влиянию модуля Юнга диапазон: ±2,8%. Следовательно точность измерения безразмерной податливости образцов, фактически определяемой точностью регистрирования раскрытия устья трещины ΔV и точностью регистрирования нагрузки ΔP, должна быть не ниже, чем точность определения модуля Юнга. Априорно полагая, что представленная в табл. 4.1–4.2 общая ошибка увеличения длины трещины лишь частично зависит от "теоретически" установленной погрешности оценки длины трещины (1%) с помощью соотношения (2.4), следует признать, что точность определения модуля нормальной упругости и определения податливости образцов должны быть не ниже 1%. Последние решающим образом зависят от точности используемого в испытаниях оборудования.

5. Заключение

Полученная в результате конечноэлементного моделирования зависимость между безразмерной длиной трещины a/W и безразмерной податливостью U в форме полинома 5-ой степени

$$\frac{a}{W} = 1{,}011665 - 0{,}60260 \cdot U - 12{,}8453 \cdot U^2 + 43{,}3057 \cdot U^3 - 61{,}1033 \cdot U^4 + 33{,}5987 \cdot U^5 \quad (5.1)$$

для SENT-образцов, геометрические размеры которых удовлетворяют нормируемым требованиям B/W=1,0–5,0; a/W=0,2–0,5; H/W=10 [5,6], сопоставлена экспериментальным результатам, полученным в процессе испытаний по определению J-R-кривых для наплавленного металла ряда сварных соединений. В результате сопоставления удалось установить, что оценка увеличения длины трещины Δa, необходимая при однообразцовом методе определения R-кривых, существенно зависит от точности задания упругих постоянных материала и точности измерения податливости

образцов. Установленная расчетным образом допустимая погрешность вычисления длины трещины приводит к выводу о том, что необходимые для обеспечения требований стандартов [1,3] точность регистрации модуля нормальной упругости и регистрации податливости образцов должны быть не ниже 1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASTM E 1820-01: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2001.
2. BS 7448-1:1991 Fracture mechanics toughness tests - Part 1: Method for determination of K1c, critical CTOD and critical J values of metallic materials, 1991.
3. BS 7448-4:1997 Fracture mechanics toughness tests - Part 4: Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials, 1997.
4. ASTM E 399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1997.
5. Offshore Standard DNV-OS-F101: Submarine Pipeline Systems, 2007.
6. Recommended Practice DNV-RP-F108: Fracture control for Pipeline Installation Methods Introducing Cyclic Plastic Strain, 2006.
7. Ahmad J. et al., Elastic-Plastic Analysis of Edge-Notched Panels Subjected to Fixed Grip Loading, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 38, No. 4/5, 1991, pp. 283-294.
8. Cravero S., Ruggieri C., Estimation procedure of J-resistance curves for SE(T) fracture specimens using unloading compliance, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 74, 2007, pp. 2735-2757.
9. Shen G., Gianetto J., Tyson W., Measurement of J-R Curves Using Single-Specimen Technique on Clamped SE(T) Specimens, Proceedings of the 19-th (2009) International and Polar Engineering Conference Osaka, Japan, June 21-26, 2009, pp. 92-99.
10. Mathias L., Sarzoza D., Ruggieri C., Effects of specimen geometry and loading mode on crack growth resistance curves of a high-strength pipeline girth weld, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 111-112, 2013, pp. 106-119.
11. Verstraete M., Hertele S., Denys R., Van Minnebruggen K., De Waele W., Evaluation and interpretation of ductile crack extension in SENT specimens using unloading compliance technique, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 115, 2014, pp. 190-203.
12. ANSYS release 11.0 documentation for ANSYS. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2007.
13. Мансырев Э.И., Антонов М.И., Цэндин И.К. Оценка трещиностойкости сварных соединений трубопроводов, V Отраслевое совещание-

конференция «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром»: Материалы отраслевого совещания (Москва, 15-19 ноября 2010 г.) - М.: ООО "Газпром экспо", 2011. - с. 232 - 238.

E.I.Mansyrev, O.M.Melnikov

CRACK LENGTH IN CLAMPED SENT-SPECIMEN BY COMPLIANCE METHOD ASSESSMENT

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The 5-th order polynomial fitting between dimensionless crack length in clamped SENT specimen and it dimensionless compliance by least square procedure is developed.

Ability of this fitting application to *R*-curve crack resistance characteristics in conformity with international Offshore Standard DNV-OS-F101 (Recommended Practice DNV-RP-F108) is investigated. Adjustment of developed fitting accuracy to test data is considered.

Key words: fracture resistance testing, crack length definition method, SENT specimen, pipeline engineering critical assessment.

REFERENCES

[1] ASTM E 1820-01: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", 2001.
[2] BS 7448-1:1991 "Fracture mechanics toughness tests - Part 1: Method for determination of K1c, critical CTOD and critical J values of metallic materials", 1991.
[3] BS 7448-4:1997 "Fracture mechanics toughness tests - Part 4: Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials", 1997.
[4] ASTM E 399-90: "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", 1997.
[5] Offshore Standard DNV-OS-F101: "Submarine Pipeline Systems", 2007.
[6] Recommended Practice DNV-RP-F108: "Fracture control for Pipeline Installation Methods Introducing Cyclic Plastic Strain", 2006.
[7] Ahmad J. et al., “Elastic-Plastic Analysis of Edge-Notched Panels Subjected to Fixed Grip Loading”, Eng. Fracture Mechanics, Vol. 38, No. 4/5, 1991, pp. 283-294.

[8] Cravero S., Ruggieri C., "Estimation procedure of J-resistance curves for SE(T) fracture specimens using unloading compliance", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 74, 2007, pp. 2735-2757.
[9] Shen G., Gianetto J., Tyson W., "Measurement of J-R Curves Using Single-Specimen Technique on Clamped SE(T) Specimens", Proceedings of the 19-th (2009) International and Polar Engineering Conference Osaka, Japan, June 21-26, 2009, pp. 92-99.
[10] Mathias L., Sarzoza D., Ruggieri C., "Effects of specimen geometry and loading mode on crack growth resistance curves of a high-strength pipeline girth weld", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 111-112, 2013, pp. 106-119.
[11] Verstraete M., Hertele S., Denys R., Van Minnebruggen K., De Waele W., "Evaluation and interpretation of ductile crack extension in SENT specimens using unloading compliance technique", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 115, 2014, pp. 190-203.
[12] ANSYS release 11.0 documentation for ANSYS. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2007.
[13] Mansyrev E.I., Antonov M.I., Tsendin I.K. "Pipeline weld fracture resistance assessment", V applied-research conference "Service and development principal directions of "Gazprom" Co weld industry": Proceedings of applied-research conference (Moscow, November 15-19, 2011) - M: "Gazprom expo" Co Ltd, 2011 - pp. 232 - 238 (rus.).

УДК 621.867.2

С. В. Никитин

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Сергей Васильевич Никитин, к.т.н., ассистент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: sergey_nikj@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрено создание динамической модели ленточного конвейера. Описаны сущность физических явлений, основные допущения и параметры модели. Подробно разобрана математическая реализация. Обсуждены возможности применения, достоинства, недостатки и задачи дальнейших исследований по совершенствованию предложенной модели.

Ключевые слова: ленточный конвейер, динамические усилия, тяговый расчет, математическая модель, математическое программирование, численные методы, собственная частота, вязко–упругие связи.

Сегодня ленточные конвейеры являются наиболее распространёнными транспортными средствами массовых грузов в мире. Они применяются для транспортировки ресурсов промышленного сырья, пищевых продуктов, обеспечения технологических процессов предприятий и во многих других случаях. Этому способствует многообразие конструктивных решений этих машин, высокая производительность, иногда превышающая 6000 т/ч, высокая скорость и большие длины транспортирования [3, 10].

Традиционный подход к проектированию таких тяжелонагруженных машин включает целый ряд подробных статических расчетов, которые позволяют, в конечном итоге, выбрать необходимый конструктив машины с учетом теоретически возможных максимальных нагрузок. Эта методика хорошо себя зарекомендовала, чему способствовало проведение множества натурных экспериментов по определению коэффициентов сопротивления движению элементов машины в различных условиях работы.

Единственным инженерным расчетом динамических характеристик ленточных конвейеров является расчет на пуск и торможение. В этом случае элементы машины представляют недеформируемым жестким телом, разгоняемым действием движущего усилия привода, противостоящего силам сопротивления движению [6]. Физика явления сильно упрощена, что не дает возможности получения достоверных значений нагрузок, растягивающих тяговый элемент при пуске за заданное время разгона двигателя.

Известны работы, посвященные динамическим расчетам и рациональному выбору отдельных элементов ленточных конвейеров [1, 2, 4, 5], значимость которых недооценивать нельзя. Однако, в них рассматривались частные вопросы, касающиеся взаимодействия груза с элементами машины при загрузке, влияния переходных режимов работы на элементы металлоконструкции, определения собственных частот тягового элемента, а также вопросы связанные с нагруженностью привода во время пуска.

Сегодня требуется создать обобщенную математическую модель ленточного конвейера, пригодную для инженерного анализа как статической, так и динамической нагруженности машины в различных режимах работы.

Основой для создания новой математической модели ленточного конвейера послужили работы по динамике цепных конвейеров [8, 9, 12]. В этих работах рассматривались системы с дискретными и распределенными параметрами в относительных координатах, что упрощало задачу исследователей, позволяя не рассматривать статические усилия в тяговом элементе.

В ленточных конвейерах, в отличие от цепных, не существует источника периодических дополнительных возмущений с известными характеристиками. Значительные динамические усилия в тяговом элементе возникают в условиях переходных процессов, поэтому движения их элементов должны наблюдаться в абсолютных координатах. Это означает, что в динамической модели должны быть учтены все статические сопротивления движению элементов машины и необходимые физические эффекты.

На рис. 1 представлена динамическая модель ленточного конвейера построенная с учетом следующих допущений:

- система конвейера представляется системой соединенных друг с другом упруго-вязкими связями дискретных масс;
- каждая дискретная масса тягового элемента характеризует его кусок определенной длины совместно с подвижными частями поддерживающих устройств (роликов) и весом транспортируемого груза;
- считается, что упруго-вязкие параметры тягового органа не изменяются со временем и не зависят от его натяжения;
- пренебрегается неизбежным провисанием ленты под действием груза и её поперечными колебаниями, которые обычно приводят к возникновению дополнительных местных растягивающих усилий;
- считается, что проскальзывания тяговой ленты по поверхностям поддерживающих роликов и отклоняющих барабанов, например, натяжного барабана, не происходит;
- пренебрегается перемещениями частиц насыпного груза относительно ленты и внутренним взаимодействием между ними, что привело бы к перераспределению масс между дискретными единицами модели;

- для упрощения модели пренебрегается движением ленты относительно стационарных механизмов системы (привода и натяжного устройства, поддерживающих роликоопор). Это обосновано тем, что скорость движения конвейера много меньше скорости движения упругой волны вдоль тягового элемента и влияние этих процессов на конечный результат расчета мало;
- величины отдельных масс системы изменяются с течением времени, например при моделировании процесса загрузки порожнего конвейера, когда последний постепенно заполняется грузом.

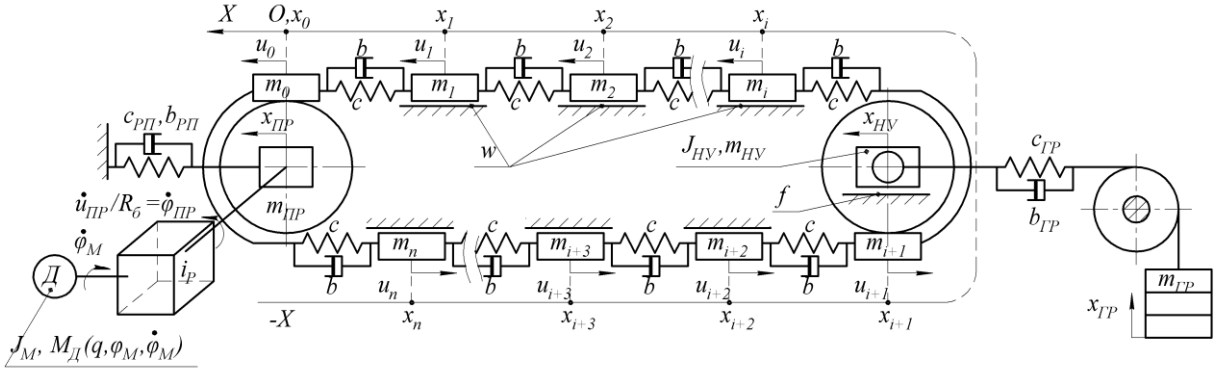


Рис. 1. Динамическая модель ленточного конвейера

Сложность реализации модели, представленной на рис. 1, для аналитических расчетов заключается в наличии множества дискретных масс, движение которых описываются дифференциальными уравнениями второго прядка и наличии нелинейных эффектов. Это приводит к необходимости использования при решении задачи численных методов с применением элементов условного математического программирования.

К нелинейностям, учитываемым в модели, относятся:

- действие сил сухого трения, определяющее статические сопротивления движению подвижных частей конвейера;
- проскальзывание ленты по поверхности приводного барабана, возникающее в следствии превышения отношения усилий натяжения в набегающей ленте к усилиям в сбегающей по сравнению с тяговым коэффициентом [3, 6, 10];
- величина местного сопротивления движению на отклоняющем барабане натяжного устройства, зависящая от переменных, вследствие динамических процессов, сил натяжения ленты. Однако, с достаточной степенью точности, эту величину можно принять постоянной, согласно тяговому расчету;
- количество груза, перемещаемого машиной, зависит от моделируемого процесса. Его загрузка на конвейер и движение вперед приводит к изменению величины массы отдельных дискретных единиц модели с течением времени.

Система уравнений, описывающая динамическую модель (рис. 1), может быть представлена в следующем виде:

$$J_M \cdot \ddot{\varphi}_M = M_Д(q,\varphi_M,\dot{\varphi}_M) + \left(c_M \cdot \left(\frac{u_{ПР}\cdot i_P}{R_б} - \varphi_M\right) + b_M \cdot \left(\frac{\dot{u}_{ПР}\cdot i_P}{R_б} - \dot{\varphi}_M\right)\right)\cdot\frac{1}{\eta_P}$$

$$m_{ПР}\cdot\ddot{x}_{ПР} = [c\cdot(u_1 - 2x_{ПР} - u_n) + b\cdot(\dot{u}_1 - 2\dot{x}_{ПР} - \dot{u}_n)]\cdot\cos(\alpha_*) - $$
$$-c_{ПР}\cdot u_{ПР} - b_{ПР}\cdot\dot{u}_{ПР}$$

$$если\ \frac{c\cdot(u_0 + x_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - u_1) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{x}_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - \dot{u}_1)}{c\cdot(u_0 + x_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{x}_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - \dot{u}_n)} > e^{\mu\cdot\alpha}$$

$$\begin{cases} m_{ВПР}\cdot\ddot{u}_{ПР} = \left(c_M\cdot\left(\frac{\varphi_M}{i_P} - \frac{u_{ПР}}{R_б}\right) + b_M\cdot\left(\frac{\dot{\varphi}_M}{i_P} - \frac{\dot{u}_{ПР}}{R_б}\right)\right)\cdot\frac{\eta_P}{R_б} - \\ \quad -(e^{\mu\cdot\alpha} - 1)\cdot\begin{bmatrix} 0, если\ c\cdot(u_0 + x_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{x}_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - \dot{u}_n) < 0 \\ c\cdot(u_0 + x_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{x}_{ПР}\cdot\cos(\alpha_*) - \dot{u}_n) \end{bmatrix} \\ m_0\cdot\ddot{u}_0 = c\cdot(u_1 - 2u_0 + u_n) + b\cdot(\dot{u}_1 - 2\dot{u}_0 + \dot{u}_n) + \\ \quad +(e^{\mu\cdot\alpha} - 1)\cdot\begin{bmatrix} 0, если\ c\cdot(u_0 - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{u}_n) < 0 \\ c\cdot(u_0 - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{u}_n) \end{bmatrix} \end{cases}$$

$$иначе$$

$$\begin{cases} (m_{ВПР} + m_0)\cdot\ddot{u}_{ПР} = \left(c_M\cdot\left(\frac{\varphi_M}{i_P} - \frac{u_{ПР}}{R_б}\right) + b_M\cdot\left(\frac{\dot{\varphi}_M}{i_P} - \frac{\dot{u}_{ПР}}{R_б}\right)\right)\cdot\frac{\eta_P}{R_б} + c\cdot(u_1 - 2u_0 + u_n) + \\ \quad +b\cdot(\dot{u}_1 - 2\dot{u}_0 + \dot{u}_n) \\ \dot{u}_0 = \dot{u}_{ПР} \end{cases}$$

$$m_1\cdot\ddot{u}_1 = W[c\cdot(u_0 - u_1) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{u}_1), c\cdot(u_2 - u_1) + b\cdot(\dot{u}_2 - \dot{u}_1), x_1, \dot{u}_1, t]$$
$$m_2\cdot\ddot{u}_2 = W[c\cdot(u_1 - u_2) + b\cdot(\dot{u}_1 - \dot{u}_2), c\cdot(u_3 - u_2) + b\cdot(\dot{u}_3 - \dot{u}_2), x_3, \dot{u}_3, t]$$

……………………………………………

$$m_i\cdot\ddot{u}_i = W[c\cdot(u_{i-1} - u_i) + b\cdot(\dot{u}_{i-1} - \dot{u}_i), c\cdot(u_{i+1} - u_i) + b\cdot(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i), x_i, \dot{u}_i, t]$$

$$(m_{i+1} + m_{ВНУ})\cdot\ddot{u}_i = W_{БАР}\begin{bmatrix} c\cdot(u_i - u_{i+1} - x_{НУ}) + b\cdot(\dot{u}_i - \dot{u}_{i+1} - \dot{x}_{НУ}), \\ , c\cdot(u_{i+2} - u_{i+1} + x_{НУ}) + b\cdot(\dot{u}_{i+2} - \dot{u}_{i+1} + \dot{x}_{НУ}), x_{i+1}, \dot{u}_{i+1}, t \end{bmatrix}$$

$$(m_{i+1} + m_{НУ})\cdot\ddot{x}_{НУ} = W_{НУ}\begin{bmatrix} c\cdot(u_i - u_{i+1} - x_{НУ}) + b\cdot(\dot{u}_i - \dot{u}_{i+1} - \dot{x}_{НУ}), \\ , c\cdot(u_{i+1} - x_{НУ} - u_{i+2}) + b\cdot(\dot{u}_{i+1} - \dot{x}_{НУ} - \dot{u}_{i+2}), \dot{x}_{НУ} \end{bmatrix}$$

$$m_{ГР}\cdot\ddot{x}_{ГР} = c_{ГР}\cdot(x_{НУ} - x_{ГР}) + b_{ГР}\cdot(\dot{x}_{НУ} - \dot{x}_{ГР}) - m_{ГР}\cdot g$$

$$m_{i+2}\cdot\ddot{u}_{i+2} = W[c\cdot(u_{i+1} - u_{i+2}) + b\cdot(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_{i+2}), c\cdot(u_{i+3} - u_{i+2}) + b\cdot(\dot{u}_{i+3} - \dot{u}_{i+2}), x_{i+2}, \dot{u}_{i+2}, t]$$

……………………………………………

$$m_n\cdot\ddot{u}_n = W[c\cdot(u_{n-1} - u_n) + b\cdot(\dot{u}_{n-1} - \dot{u}_n), c\cdot(u_0 - u_n) + b\cdot(\dot{u}_0 - \dot{u}_n), x_n, \dot{u}_n, t]$$

Первое уравнение системы вводит зависимость угла поворота двигателя φ_M от внешней нагрузки и его механической характеристики $M_Д(q,\varphi_M,\dot{\varphi}_M)$. Параметры c_M и b_M – угловая жесткость и коэффициент сопротивления связи «двигатель – ведущее звено привода». В качестве механической характеристики может быть использовано одно их соотношений для одного из типов двигателей [7, 10]. Параметр q – программный управляющий сигнал, физический смысл которого зависит от выбранного движителя, а функция изменения с течением времени зависит от программы пуска и движения, заданной исследователем. В уравнении также обозначены: i_P – передаточное число редуктора; η_P – коэффициент полезного действия элементов входящих в связь двигатель – ведущее звено; $R_б$ – радиус приводного барабана.

Для упрощения модели двигателя можно задаться только функцией изменения скорости $\dot{\varphi}_M(t)$ двигателя от времени, не прибегая к решению первого уравнения системы.

Второе уравнение системы описывает колебания привода массой $m_{ПР}$ в направлении координаты $x_{ПР}$ под действием внешних сил натяжения тягового элемента и реакции упруго-вязкой связи ($c_{ПР}, b_{ПР}$). Угол $\alpha_* = \pi/4 - \alpha/2$, где α – угол обхвата барабана лентой.

Тяговый элемент конвейера в модели представлен n+1 дискретной массой m_i, где i=0…n. Лента разбита равномерно, поэтому и параметры всех упруго–вязких связей между дискретными массами тягового элемента одинаковы.

В общем случае величина каждой из i-х масс не постоянна и равна сумме массы ленты, подвижных частей роликов и груза, распределенного на длине элементарного участка Δl тягового элемента.

$$\Delta l = \frac{L}{n},$$

где L - длина тягового элемента конвейера.

Все массы, движение которых происходит вдоль оси OX, имеют обобщенные координаты, обозначенные «u», представляющие их отклонения от начального положения x в недеформированном состоянии. Так, массы m_i имеют координаты u_i, а вращательное движение приводного барабана заменяется поступательным с координатой $u_{ПР}$.

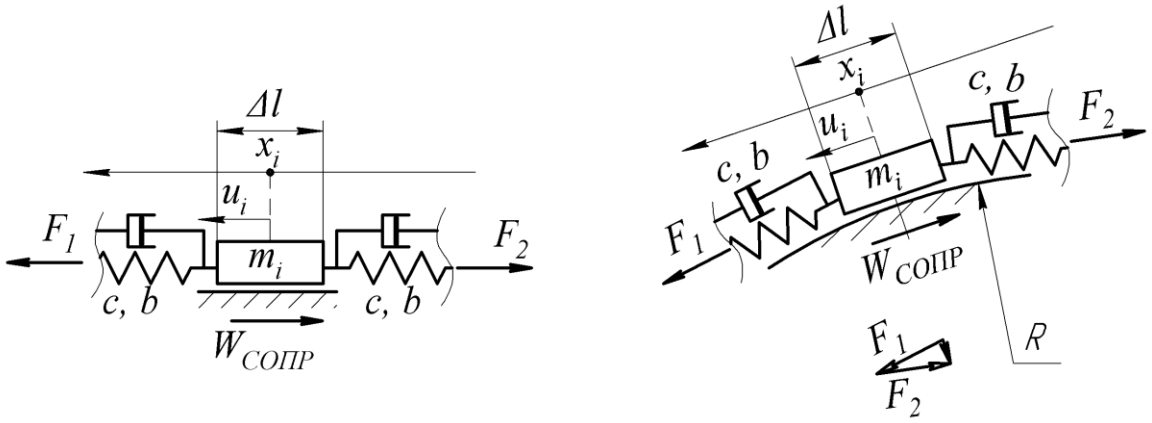
Уравнения для масс $m_{ВПР}$ и m_0 в системе разделены на две подсистемы. Какая из подсистем должна входить в расчет в данный момент определяется условием Эйлера, то есть условием проскальзывания ленты по поверхности барабана. Когда $S_{НБ}/S_{СБ} > e^{\mu\cdot\alpha}$, лента находится в состоянии скольжения и уравнения для масс $m_{ВПР}$, m_0 интегрируются по отдельно-

сти. В противном случае, когда обе массы связаны друг с другом силами трения покоя, правые части их уравнений совпадают.

Уравнения движения остальных масс тягового элемента, кроме взаимодействующей с натяжным устройством, описываются уравнением вида $m_i \cdot \ddot{u}_i = W\left[c \cdot (u_{i-1} - u_i) + b \cdot (\dot{u}_{i-1} - \dot{u}_i), c \cdot (u_{i+1} - u_i) + b \cdot (\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i), x_i, \dot{u}_i, t\right]$. Функция $W\left[F_1, F_2, x, \dot{u}, t\right]$ вычисляет равнодействующую силу на *i*-ю массу:

$$W\left[F_1, F_2, x, \dot{u}, t\right] = \begin{cases} 0 & \text{если } \left[\dot{u} = 0 \text{ И } |F_1 + F_2| < W_П(x, F_1, F_2, t)\right] \\ F_1 + F_2 - W_Д(x, F_1, F_2, \dot{u}, t), & \text{при прочих условиях} \end{cases},$$

где $W_П(x,t)$ и $W_Д(x,t)$ – силы сопротивления перемещению в покое и движении соответственно; F_1 и F_2 – силы натяжения тягового элемента со стороны масс с большей и меньшей координатой *x* соответственно (рис. 2, а).



а) б)

Рис. 2. Схема сил, действующих на дискретную массу динамической модели, движущуюся по прямолинейной а) и криволинейной б) направляющей

Величина сил сопротивления зависит от переменной величины самой массы m_i, коэффициента сопротивления в движении w_i или в покое $w_{Пi}$, внешних сил F_1 и F_2, характеристики участка трассы, например, угла наклона β, или радиуса изгиба R криволинейного участка.

В простейшем случае прямолинейного движения ленты по наклонной трассе с углом наклона β имеем

$W_Д(x, F_1, F_2, \dot{u}, t) = m_i(x,t) \cdot g \cdot w \cdot \cos(\beta) \cdot sign(\dot{u}) + m_i(x,t) \cdot g \cdot \sin(\beta)$ и

$W_П(x, F_1, F_2, \dot{u}, t) = m_i(x,t) \cdot g \cdot w_П \cdot \cos(\beta) \cdot sign(\dot{u}) + m_i(x,t) \cdot g \cdot \sin(\beta)$.

При движении по криволинейному участку трассы усилия F_1 и F_2 дают дополнительное прижатие или отталкивание от направляющих (рис. 3) в зависимости от характеристик участка. Например, для выпуклого участка (рис. 2, б) имеем:

$$W_{Д}(x,F_1,F_2,\dot{u},t)=\left(m_i(x,t)+\frac{F_1-F_2}{g}\cdot\frac{\Delta l}{2\cdot R}\right)\cdot g\cdot w\cdot\cos(\beta)\cdot sign(\dot{u})+m_i(x,t)\cdot g\cdot\sin(\beta).$$

Нерассмотренные уравнения описывают поступательные движения натяжного устройства по координате $x_{НУ}$, груза $x_{Г}$ и вращение натяжного барабана приведенное к координате u_i.

По правилу приведения масс $m_{ВНУ}=J_{НУ}/R_{НУ}^2$, где $J_{НУ}$ – момент инерции барабана натяжного устройства, $R_{НУ}$ – его радиус.

Функция равнодействующей силы $W_{БАР}(F_1,F_2,x,\dot{u},t)$ учитывает дополнительное сопротивление вращению барабана зависящее от величины набегающей силы

$$W_{БАР}(F_1,F_2,x,\dot{u},t)=\begin{vmatrix}0, & если\left[\dot{u}=0\ \ и\ \ |F_1+F_2|<|F_2|\cdot(\xi_{П}-1)\right]\\ F_1+F_2-|F_2|\cdot(\xi_{Д}-1)\cdot sign(\dot{u}), & при\ прочих\ условиях\end{vmatrix},$$

где $\xi_{П}$, $\xi_{Д}$ – местные коэффициенты сопротивления в покое и движении соответственно.

Функция равнодействующей силы $W_{НУ}(F_1,F_2,x)$ учитывает трение между направляющими и подвижной частью натяжного устройства:

$$W_{НУ}\ (F_1,F_2,x)=\begin{vmatrix}P=F_1+F_2+c_{ÃÐ}\cdot(x_{ÃÐ}-x_{НУ}\ )+è_{ÃÐ}\cdot(\dot{x}_{ÃÐ}-\dot{x}_{НУ}\ )\\ 0, \quad åñëè\left[\dot{x}_{НУ}\ =0\ \ è\ \ |P|<(m_{НУ}\ +m_i)\cdot g\cdot f_{Ï}\ \right]\\ P-(m_{НУ}\ +m_i)\cdot g\cdot f_{Ä}\cdot sign(\dot{x}_{НУ}\ ) \quad èíà÷å\end{vmatrix},$$

где $f_{П}$ и $f_{Д}$ – коэффициентов сухого трения в состоянии покоя и движения соответственно.

При подобных расчетах коэффициенты, входящие в модель, определяют исходя из условий работы машины, принятых предварительных конструктивных решений и аналогичных конструкций [1, 2, 3, 12].

Наиболее необоснованными является выбор коэффициентов жесткости и сопротивления динамической модели. Это объясняется недостатком экспериментальных данных и многообразием конструкций, для исследования которых нужно затратить значительные средства.

Например, конвейерная лента является нелинейно упругим элементом, однако в модели она представлена линейно-деформируемым элементом. Коэффициенты упругости и вязкого сопротивления для нее приближенно определяют выражениями

$$c=\frac{E_{Л}F_{Л}}{\Delta l},\quad b=\frac{\gamma}{\pi}\sqrt{c\cdot q_{Л}\cdot\Delta l}\,,$$

где $E_{Л}$, $F_{Л}$ – модуль упругости, площадь продольного сечения и погонная масса ленты; γ – логарифмический декремент затухания колебаний.

Учитывая, что для тканевых прокладок лент $EF_{Ë}=2000\ldots3000\,Í$ на

1 мм ширины тяговой прокладки, то $E_Л F_Л = EF_Л \cdot B_Л \cdot n$, где $B_Л$ - ширина ленты, см; n - количество прокладок. Определение величины логарифмического декремента γ затухания колебаний требует дополнительных исследований.

Особенностью такой модели является необходимость определения начальных условий для расчета на пуск, торможение, непрерывную работу из результатов предварительных расчетов. Таким образом, первоначально следует провести численные расчеты для условия $\dot{\varphi}_M = 0$, определив при этом натяжения в тяговом элементе перед пуском.

Так же можно решить систему уравнений статики для условия равенства нулю скоростей и ускорений всех обобщенных координат. Однако, из-за свойств сухого трения, учитываемого в динамике в первом случае расчета начальных условий, результаты будут не идентичны.

Рассмотренная модель обладает рядом достоинств и недостатков. Главными недостатками являются необходимость создания сложных расчетных программ и задание множества эмпирических коэффициентов.

Среди достоинств следует отметить:

- выполнение тягового расчета с учетом динамических явлений;
- возможность определения собственных частот путем разложения решений системы уравнений в гармонические ряды;
- автоматическое определение нагруженности отдельных узлов, например нагрузок на раму привода, момента создаваемого двигателем и интегральная их оценка.

Основными задачами дальнейшего развития модели следует считать: исследование и введение в модель реальных нелинейных характеристик тяговых лент [5]; детальную проработку динамических моделей отдельных узлов машины, например, натяжного устройства или привода, а так же достоверное определение их параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин В. И. Исследование динамических нагрузок и выбор конструктивных параметров роликоопор шахтных ленточных конвейеров: дис. на соиск. уч. звания канд. техн. наук: 05.05.06. – М: Московский ордена трудового красного знамени горный институт, 1975. – 146 с.
2. Гринько П. А. Исследование динамики привода ленточных конвейеров с целью повышения срока службы ленты / П. А. Гринько // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. / ПДТУ. - Маріуполь, 2003. - Вип. 7. - с. 152-156.
3. Зеленский О. В. Справочник по проектированию ленточных конвейеров. – СПб.: «Недра», 2009. – 376 с.

4. Ним А. Д. Динамические воздействия ленточных конвейеров на несущие строительные конструкции: дис. на соиск. уч. звания канд. техн. наук: 05.23.17. – Екатеринбург: ОАО Институт «УралНИИАС» , 2003. – 177 с.
5. Панкратов С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ. Основы теории и расчета. – М. «Машиностроение», 1967. – 446 с.
6. Пертен Ю.А. Конвейерные системы. Часть I: Справ. – СПб.: НПО «Профессионал», – 2008. – 588 с.
7. Семенов Ю. А. Динамика машин: учебное пособие, Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 317 с.
8. Смирнов В.Н., Никитин С.В. Логистическая модель для исследования волновых процессов // Научно технические ведомости СПбГПУ. – 2010. № 3: Наука и образование. – Санкт-Петербург: издательство СПбГПУ. – 2010. с. 78 – 85.
9. Смирнов В.Н. Подвесные конвейеры. Теория расчета, прогнозирование тенденций развития. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 267 с.
10. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
11. Степанов А.Г. Динамика машин. – Екатеринбург:УрО РАН, 1999. – 304 с.
12. Чугреев Л.И. Динамика конвейера с цепным тяговым органом. – М.: «Недра», 1976. – 160 с.

S.V. Nikitin

DYNAMIC MODEL OF BELT CONVEYOR

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article considers the creation of a dynamic model of belt conveyor. The essence of physical phenomena, the key assumptions and parameters of the model describes. Details of mathematical implementation dismantles. The possibilities of application, advantages, disadvantages and problems for further research to improve the proposed model discusses.

Key words: belt conveyor dynamic forces, traction calculation, mathematical model, mathematical programming, numerical methods, natural frequency, visco-elastic connection.

REFERENCES

[1] Galkin V. I. Issledovanie dinamicheskix nagruzok i vybor konstruktivnyx parametrov rolikoopor shaxtnyx lentochnyx

konvejerov: dis. na soisk. uch. zvaniya kand. texn. nauk: 05.05.06. – M: Moskovskij ordena trudovogo krasnogo znameni gornyj institut, 1975. – 146 p. (rus.)
[2] Grin'ko P. A. Issledovanie dinamiki privoda lentochnyx konvejerov s cel'yu povysheniya sroka sluzhby lenty / P. A. Grin'ko // Zaxist metalurgijnix mashin vid polomok: zb. nauk. pr. / PDTU. - Mariupol', 2003. - Vip. 7. - p. 152-156. (rus.)
[3] Zelenskij O. V. Spravochnik po proektirovaniyu lentochnyx konvejerov. – SPb.: «Nedra», 2009. – 376 p. (rus.)
[4] Nim A. D. Dinamicheskie vozdejstviya lentochnyx konvejerov na nesushhie stroitel'nye konstrukcii: dis. na soisk. uch. zvaniya kand. texn. nauk: 05.23.17. – Ekaterinburg: OAO Institut «UralNIIAS» , 2003. – 177 p. (rus.)
[5] Pankratov S.A. Dinamika mashin dlya otkrytyx gornyx i zemlyanyx rabot. Osnovy teorii i rascheta. – M. «Mashinostroenie», 1967. – 446 p. (rus.)
[6] Perten Yu.A. Konvejernye sistemy. Chast' I: Sprav. – SPb.: NPO «Professional», – 2008. – 588 p. (rus.)
[7] Semenov Yu. A. Dinamika mashin: uchebnoe posobie, Ch. 1. – SPb.: Izd-vo Politexn. un-ta, 2010. – 317 p. (rus.)
[8] Smirnov V.N., Nikitin S.V. Logistic model of the discovering of wave process lain in pulling elements of the conveyor. St. Petersburg State Polytechnical University Journal, 2010, №3(106), pp.78-85. (rus)
[9] Smirnov V.N. Podvesnye konvejery. Teoriya rascheta, prognozirovanie tendencij razvitiya. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. – 267 p. (rus.)
[10] Spivakovskij A.O., D'yachkov V.K. Transportiruyushhie mashiny. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 487 p. (rus.)
[11] Stepanov A.G. Dinamika mashin. – Ekaterinburg:UrO RAN, 1999. – 304 p. (rus.)
[12] Chugreev L.I. Dinamika konvejera s cepnym tyagovym organom. – M.: «Nedra», 1976. – 160 p. (rus.)

УДК 338.312 : 658.78.06

Ю. А. Ноздрачёва[1], С. Ф. Пилипчук[2], А. Е. Радаев[3]

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГРУППЫ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]Юлия Андреевна Ноздрачёва, студент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)517-8312, E-mail: j.nozdrachyova@bk.ru

[2]Сергей Федорович Пилипчук, к.т.н., доцент, доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: spilipchuk44@mail.ru.

[3]Антон Евгеньевич Радаев, к.э.н., ассистент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: TW-inc@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы оптимизации характеристик технологической группы подъемно-транспортного оборудования в складских системах тарно-штучных грузов, а также обоснования оптимального количества данного оборудования. Разработана оптимизационная модель по результатам регрессионного анализа статистических данных о характеристиках оборудования и их стоимости. Модель позволяет найти оптимальное решение для заданной производительности при минимизации затрат на приобретение оборудования.

Ключевые слова: оптимизационная модель, складская система, подъемно-транспортное оборудование, технологическая группа, технические характеристики.

В современных условиях функционирования торговых и промышленных предприятий особую важность приобретают вопросы обеспечения гибкости и адаптивности соответствующих складских систем, поскольку указанные свойства напрямую определяют эффективность функционирования предприятия в части преобразования материальных потоков со сложным характером изменения структуры и интенсивности. При этом

достижение требуемого уровня гибкости и адаптивности функционирования складских систем напрямую определяется эффективностью работы парка подъемно-транспортной техники [9], обоснование структуры которого усложнено как наличием огромного количества разновидностей машин с широкими диапазонами технических характеристик (как следствие динамичного развития рынка оборудования в процессе глобализации мировой экономики), так и ограниченными финансовыми возможностями предприятий (в современных условиях их функционирования на отечественных рынках материальных или нематериальных услуг). Вышеописанные обстоятельства позволили сделать вывод об актуальности научного исследования в области обоснования структуры парка ПТО в части количества машин, а также технических характеристик отдельных единиц техники.

Объектом исследования является складская система предприятия, в которой осуществляется обработка тарно-штучных (паллетированных) грузов с использованием напольного безрельсового ПТО циклического действия, оснащенного автономным источником питания и вилочным грузозахватом. При этом структура складской системы включает в себя определенное количество технологических зон, различных по своей конфигурации и набору выполняемых функций. Как правило, выделяют зону разгрузки и приемки, зону основного хранения, зону комплектации и отгрузки, хотя конкретный состав их для каждого склада может быть различен [10]. При этом структуру парка подъемно-транспортной техники можно представить в виде совокупности так называемых технологических групп ПТО — совокупностей единиц оборудования, циклически выполняющих определенную последовательность операций грузопереработки (как правило, включающую в себя захват грузовой единицы (ГЕ) в определенной технологической зоне, транспортировку ГЕ в смежную технологическую зону, отгрузку ГЕ) [12]. Специфические особенности вышеупомянутых операций (обусловленные как характеристиками объемно-планировочного решения рассматриваемой технологической зоны, так и параметрами интенсивности поступления ГЕ в обработку) определяют необходимость обоснования технических характеристик ПТО, а также его количества в рамках соответствующей технологической группы.

Целью исследования является создание оптимизационной модели, позволяющей определить характеристики состава технологической группы ПТО в складской системе, обеспечивающие работу оборудования с заданной производительностью, по критерию минимизации суммарных затрат на приобретение техники.

В процессе исследования были решены следующие задачи:

– анализ существующих методов в области решения задач формирования структуры парка ПТО складской системы;

– сбор статистических данных о технических характеристиках и стоимости ПТО различных марок и их регрессионный анализ с целью выявления зависимости стоимости единицы оборудования от ее технических характеристик;
– обоснование состава искомых переменных оптимизационной модели, критерия оптимизации, структурных и функциональных ограничений;
– разработка оптимизационной модели и реализация ее на практическом примере.

Основной недостаток существующих подходов к решению задачи формирования структуры парка ПТО складской системы тарно-штучных грузов заключается в представлении процедуры поиска решения задачи в виде двух укрупненных этапов [6, 8]:
– выбор конкретной разновидности (марки, модели) ПТО из перечня альтернативных вариантов для каждой технологической зоны склада на основе информации о технических характеристиках и стоимости единицы каждого вида оборудования [5];
– определение потребного количества ПТО выбранной разновидности для каждой технологической зоны складской системы с использованием аналитических зависимостей, учитывающих производительность оборудования и интенсивность поступающих грузопотоков [1, 3].

Последовательная реализация вышеперечисленных этапов обуславливает отсутствие четкой взаимосвязи между производительностью парка ПТО, техническими характеристиками и количеством оборудования. Данное обстоятельство определило целесообразность разработки оптимизационной модели обоснования характеристик технологической группы ПТО, обеспечивающей:
– комплексное (одновременное) решение задач выбора характеристик ПТО в определенной технологической группе (удовлетворяющих условиям функционирования оборудования) и определения требуемого количества техники для обеспечения заданной производительности обработки ГЕ по критерию минимизации суммарных затрат на приобретение ПТО;
– учет взаимосвязи между первоначальной стоимостью единицы ПТО и ее основными техническими характеристиками, определяющими производительность единицы техники в процессе обработки ГЕ.

Основными допущениями разработанной оптимизационной модели являются следующие:
– рассматриваемая технологическая группа ПТО включает в себя идентичные друг другу (по значениям технических характеристик) единицы оборудования, принадлежащие к определенному классу техники;
– зависимость производительности технологической группы ПТО от количества техники в составе группы является линейной;

– существует линейная зависимость стоимости единицы ПТО $C_{\text{åä}}^{\text{ïåðâ}}$ в каждой технологической группе от ее основных технических характеристик: грузоподъемности $G_{гр}$, скорости передвижения ПТО с грузом $v_{пер+}$, высоты подъема груза $H_{под}$, скорости подъема грузозахвата с грузом $v_{под+}$, радиуса поворота $R_{пов}$, емкости $E_{АКБ}$ и напряжения $U_{АКБ}$ аккумуляторной батареи (АКБ):

$$C_{\text{åä}}^{\text{ïåðâ}} = f\left(G_{\text{ãð}}, v_{\text{ïåð}+}, H_{\text{ïîä}}, v_{\text{ïîä}+}, R_{\text{ïîâ}}, E_{\text{ÀÊÁ}}, U_{\text{ÀÊÁ}}\right); \quad (1)$$

– для рассматриваемой технологической группы ПТО существуют определенные средние соотношения между: скоростями передвижения с грузом и без груза ($\Delta_{пер}^{П} = \frac{v_{пер-}}{v_{пер+}}$), скоростями подъема с грузом и без груза ($\Delta_{под}^{П} = \frac{v_{под-}}{v_{под+}}$), общей массой единицы ПТО и ее грузоподъемностью ($\Delta_{общ}^{М} = \frac{m_{общ}}{G_{гр}}$), массой грузозахвата единицы ПТО и ее грузоподъемностью ($\Delta_{ГЗУ}^{М} = \frac{m_{ГЗУ}}{G_{гр}}$);
– оптимальные значения технических характеристик ПТО изменяются в определенных диапазонах, ограниченных соответствующими конструктивно допустимыми значениями;
– технологические маршруты, выполняемые ПТО в составе технологической группы, подобны друг другу и имеют единственную наиболее вероятную конфигурацию (рис. 1);
– выполнение технологического маршрута единицей ПТО осуществляется с использованием стационарной скорости движения ($v_{пер+}, v_{пер-}$) на прямолинейных участках и маневровой скорости ($v_{ман+}, v_{ман-}$) на криволинейных участках, а также при захвате или отгрузке ГЕ (рис. 2); при этом существуют определенные отношения маневровой скорости ПТО к стационарной при движении с грузом и без груза ($\Delta_{\text{ïåð}}^{\text{ì}} = \frac{v_{\text{ìàí}+}}{v_{\text{ïåð}+}} = \frac{v_{\text{ìàí}-}}{v_{\text{ïåð}-}}$);
– затраты времени на ускорение и торможение составляют пренебрежимо малую долю длительности цикла работы единицы ПТО.

Перед непосредственной разработкой оптимизационной модели был произведен отбор и анализ информации, предоставленной коммерческими организациями сферы продаж подъемно-транспортной техники в части технических характеристик и стоимости единицы оборудования различных марок и моделей. Сформированные данные включали в себя:
– основные характеристики ПТО, необходимые для построения многорегрессионной модели — зависимости первоначальной стоимости еди-

ницы оборудования от ранее перечисленных технических характеристик (выражение (1));

– дополнительные характеристики ПТО ($v_{\text{ïåð}-}$, $v_{\text{ïïä}-}$, $m_{\text{îáù}}$, $m_{\text{ÃÇÓ}}$), необходимые для вычисления усредненных значений ранее упомянутых соотношений $\Delta^{\text{Ï}}_{\text{ïåð}}$, $\Delta^{\text{Ï}}_{\text{ïïä}}$, $\Delta^{\text{Ì}}_{\text{îáù}}$, $\Delta^{\text{Ì}}_{\text{ÃÇÓ}}$.

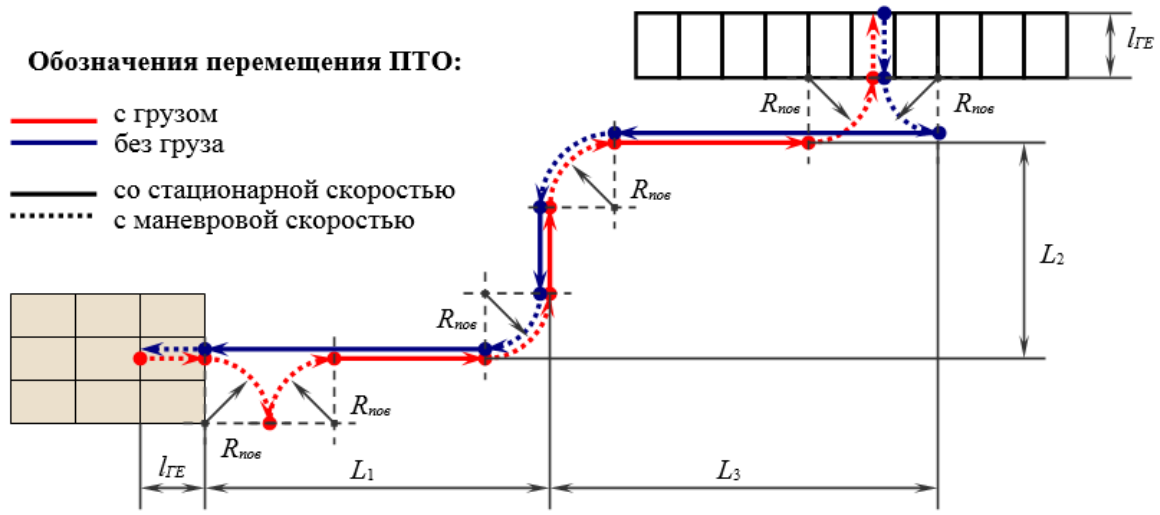


Рис. 1. Схема технологического маршрута, выполняемого ПТО в составе технологической группы

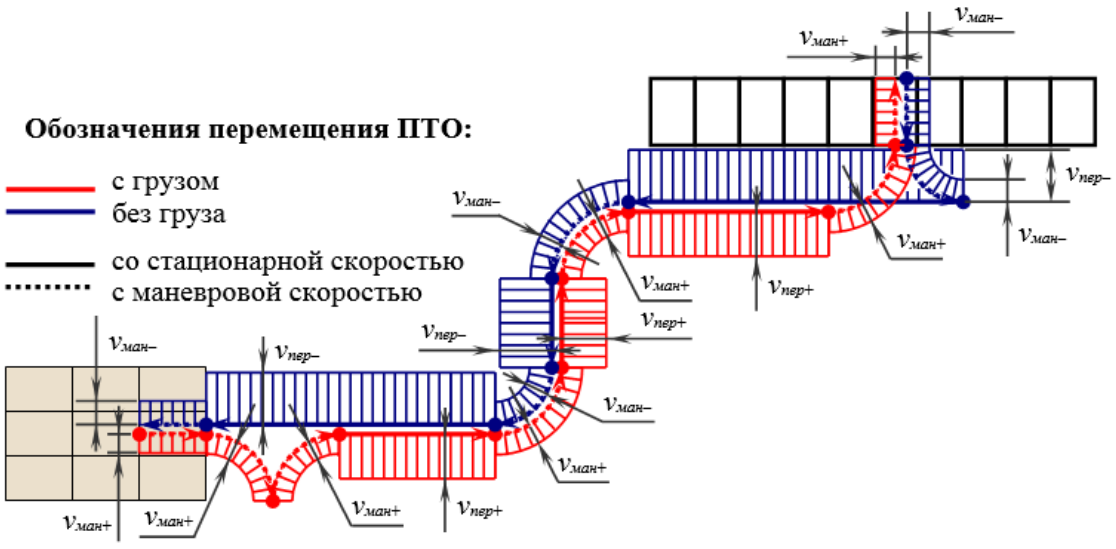


Рис. 2. Распределение скоростей перемещения единицы ПТО по элементам конфигурации технологического маршрута

Основные виды многорегрессионных моделей, используемых в процессе исследования, представлены в таблице 1.

Для каждой из рассматриваемых моделей был произведен расчет основных параметров регрессии — коэффициентов a_i (с использованием метода наименьших квадратов), а также коэффициента детерминации R^2,

описывающего степень соответствия полученной многорегрессионной модели статистическим данным. Результаты соответствующих вычислений, полученные в процессе обработки статистических данных о технических характеристиках и стоимости электроштабелеров с кабиной для оператора, представлены в таблице 2.

Таблица 1

Многорегрессионные модели для аппроксимации зависимости стоимости ПТО от технических характеристик

Наименование модели	Вид зависимости
Простая линейная модель	$C_{ед}^{перв} = a_0 + a_1 \cdot G_{гр} + a_2 \cdot v_{пер+} + a_3 \cdot H_{под} + a_4 \cdot v_{под+} + +a_5 \cdot R_{пов} + a_6 \cdot E_{АКБ} + a_7 \cdot U_{АКБ}$
	a_0 — поправка к стоимости ПТО, не зависящая от значений технических характеристик; $a_1, ..., a_7$ — определяют величину стоимости ПТО, приходящуюся на единицу измерения технической характеристики оборудования.
Линейная модель с абсолютными отклонениями	$C_{ед}^{перв} = C_{ед}^{перв\,0} + a_1 \cdot \left(G_{гр} - G_{гр}^0\right) + a_2 \cdot \left(v_{пер+} - v_{пер+}^0\right) + +a_3 \cdot \left(H_{под} - H_{под}^0\right) + a_4 \cdot \left(v_{под+} - v_{под+}^0\right) + a_5 \cdot \left(R_{пов}^0 - R_{пов}\right) + +a_6 \cdot \left(E_{АКБ} - E_{АКБ}^0\right) + a_7 \cdot \left(U_{АКБ} - U_{АКБ}^0\right)$
	$a_1, ..., a_7$ — определяют изменение стоимости ПТО относительно эталонного значения, приходящееся на единицу абсолютного отклонения текущего значения технической характеристики от соответствующего эталонного.
Линейная модель с относительными отклонениями	$C_{ед}^{перв} = C_{ед}^{перв\,0} \cdot \left(a_1 \cdot \frac{G_{гр}}{G_{гр}^0} + a_2 \cdot \frac{v_{пер+}}{v_{пер+}^0} + a_3 \cdot \frac{H_{под}}{H_{под}^0} + a_4 \cdot \frac{v_{под+}}{v_{под+}^0} + +a_5 \cdot \frac{R_{пов}^0}{R_{пов}} + a_6 \cdot \frac{E_{АКБ}}{E_{АКБ}^0} + a_7 \cdot \frac{U_{АКБ}}{U_{АКБ}^0} \right)$
	$a_1, ..., a_7$ — определяют доли соотношений текущих и эталонных значений технических характеристик ПТО в соотношении первоначальных стоимостей рассматриваемой и эталонной единиц оборудования.

Примечание: a_i — коэффициенты аппроксимации;
$C_{ед}^{перв\,0}, G_{гр}^0, v_{пер+}^0, H_{под}^0, v_{под+}^0, R_{пов}^0, E_{АКБ}^0, U_{АКБ}^0$ — значения стоимости и технических характеристик, соответствующие эталонной марке оборудования.

Как видно из таблицы, для всех рассматриваемых многорегрессионных моделей значение коэффициента детерминации составляет $R^2 \approx 0.95$, что свидетельствует о наличии явной (близкой к функциональной) зависимости первоначальной стоимости единицы ПТО от значений ее основных технических характеристик (выражение (1)).

Исходными данными (входными параметрами) для реализации оптимизационной модели являются:

– усредненные значения соотношений основных и дополнительных ха-

рактеристик ($\Delta^{\ddot{I}}_{\ddot{i}\mathring{a}\eth}$, $\Delta^{\ddot{I}}_{\ddot{i}\tilde{n}\ddot{a}}$, $\Delta^{\grave{I}}_{\hat{i}\acute{a}\grave{u}}$, $\Delta^{\grave{I}}_{\tilde{A}\zeta\acute{O}}$) определенного класса ПТО, соответствующего рассматриваемой технологической группе;

- параметры технологического маршрута (протяженность и конфигурация маршрута, характеристики складского помещения, пространственно-габаритные характеристики ГЕ, коэффициенты сопротивления движению ПТО на стационарной и маневровой скорости, время непрерывной работы и коэффициент неравномерности использования ПТО, коэффициент предельной разрядки АКБ);
- потребное значение производительности технологической группы ПТО $[\Pi p_{\Sigma}]$.

Таблица 2

Результаты расчета параметров многорегрессионных моделей для статистических данных о технических характеристиках и стоимости электроштабелеров с кабиной для оператора

Наименование модели	Значения коэффициентов аппроксимации								Значение R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	
Простая линейная модель	-2809.762	0.094	67.656	0.056	2220.536	0.877	1.482	2.282	0.946
Линейная модель с абсолютными отклонениями		0.106	68.545	0.054	2320.102	-0.871	1.507	1.292	0.946
Линейная модель с относительными отклонениями		0.205	0.603	0.450	0.555	-1.672	0.782	0.097	0.944

Вспомогательными величинами (промежуточными параметрами), рассчитываемыми в рамках модели по известным формулам [4, 7, 11], являются:

- временные характеристики цикла работы ПТО (время, затрачиваемое на стационарное и маневровое движение и на подъем / опускание грузозахвата единицей оборудования, общая длительность цикла работы единицы ПТО, производительность единицы техники $\ddot{I}\eth_{\mathring{a}\ddot{a}} = f\left(v_{\ddot{i}\mathring{a}\eth+}, v_{\ddot{i}\tilde{n}\ddot{a}+}, R_{\ddot{i}\tilde{n}\hat{a}}\right)$;
- энергетические характеристики работы ПТО (работа, затрачиваемая на стационарное и маневровое движение, на ускорение, на подъем / опускание грузозахвата единицей ПТО за цикл, общая работа единицы оборудования за цикл, потребное $[A_{\grave{A}\hat{E}\acute{A}}] = f\left(G_{\tilde{a}\eth}, v_{\ddot{i}\mathring{a}\eth+}, R_{\ddot{i}\tilde{n}\hat{a}}\right)$ и фактическое $A_{\grave{A}\hat{E}\acute{A}} = f\left(E_{\grave{A}\hat{E}\acute{A}}, U_{\grave{A}\hat{E}\acute{A}}\right)$ значения энергетической характеристики АКБ);
- затраты на приобретение единицы ПТО, определяемые на основе одной из вышеперечисленных многорегрессионных моделей.

Искомыми (варьируемыми) переменными оптимизационной модели являются основные технические характеристики единицы ПТО и количество единиц ПТО (r) в составе технологической группы оборудования. При этом в качестве критерия оптимизации (целевой функции или выходного параметра модели) рассматривается минимизация суммарных затрат на приобретение оборудования

$$C_{\Sigma}^{\text{ïåðñ}} = C_{\text{åä}}^{\text{ïåðñ}} \cdot r \to \min . \qquad (2)$$

В разработанной модели также учитываются прямые (структурные) и непрямые (функциональные) ограничения на искомые переменные [2]. Структурные ограничения определяют диапазоны варьирования:

– количества ПТО в составе технологической группы — минимальное значение определяется физическим смыслом задачи, а максимальное — вместимостью соответствующей технологической зоны;
– технических характеристик единицы ПТО — соответствующие граничные значения подразделяются на конструктивные и условные; конструктивные граничные значения соответствуют минимальным / максимальным величинам, получаемым в процессе обработки статистических данных о технических характеристиках ПТО определенного класса; условные граничные значения назначаются на основе характеристик технологического маршрута (например, масса ГЕ как минимально допустимое значение для грузоподъемности оборудования).

Функциональные ограничения оптимизационной модели предполагают:

– соответствие фактического и потребного значений производительности технологической группы ПТО:

$$Пр_{\Sigma} = Пр_{ед} \cdot r = [Пр_{\Sigma}]; \qquad (3)$$

– соответствие или превышение фактического значения энергетической характеристики АКБ потребного значения:

$$A_{АКБ} = E_{АКБ} \cdot U_{АКБ} \geq [A_{АКБ}]. \qquad (4)$$

Таким образом, вышеописанная оптимизационная модель может быть реализована в рамках решения прикладных задач по обоснованию характеристик различных технологических групп ПТО складских систем тарно-штучных грузов с использованием надстройки «Поиск решения» в программе «Microsoft Excel». Тем не менее, фактический характер зависимости (1), отличный от строго функционального ($R^2 < 1$), а также невозможность приобретения оборудования со значениями технических характеристик, соответствующими решению рассматриваемой задачи обуславливают целесообразность оценки погрешности определения искомых переменных оптимизационной модели. Иными словами, решение задачи обоснования характеристик технологической группы ПТО целесообразно представлять не в виде набора конкретных значений ($G_{\text{ãð}}^{opt}$, $v_{\text{ïãð}+}^{opt}$, и т.д.) а в форме предпочтительных диапазонов значений $\left([G_{\text{ãð}}^{opt} - \Delta_{x1}; G_{\text{ãð}}^{opt} + \Delta_{x1}\right]$,

$\left[v_{iâð+}^{opt} - \Delta_{x2}; v_{iâð+}^{opt} + \Delta_{x2}\right]$ и т.д.) для основных технических характеристик единицы техники. С целью обоснования ширины упомянутых диапазонов технических характеристик ПТО производится оценка ошибки вычисления Δ_{xi} оптимального значения каждой из характеристик на основе следующего допущения: отношение случайной ошибки Δ_y к среднеквадратическому отклонению σ_y стоимости единицы ПТО равняется таковому для каждой *i*-й технической характеристики единицы оборудования:

$$\frac{\Delta_{xi}}{\sigma_{xi}} \approx \frac{\Delta_y}{\sigma_y} \rightarrow \Delta_{xi} = \sigma_{xi} \cdot \sqrt{1 - R^2}\ . \qquad (5)$$

Величину среднеквадратического отклонения значений определенной технической характеристики ПТО σ_{xi} предлагается определять в процессе обработки упомянутых ранее статистических данных, необходимых для реализации оптимизационной модели. Также следует подчеркнуть, что полученные граничные значения предпочтительных диапазонов технических характеристик ПТО должны соответствовать функциональным ограничениям оптимизационной модели в части конструктивных и условных граничных значений искомых переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаджинский А.М. Современный склад. Организация, управление, технологии и логистика: учебно-практическое пособие. — М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2005. — 176 с.
2. Кузьменков В.А., Юрьев В.Н. Математические методы и модели исследования операций. Параметрическая, многокритериальная и целочисленная оптимизация: учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 120 с.
3. Маликов О.Б. Склады и грузовые терминалы: справочник. — СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2005. — 560 с.
4. Мачульский И.И., Алепин Е.А. Машины безрельсового транспорта. — М.: Машиностроение, 1982. — 232 с.
5. Модели и методы теории логистики: учеб. пособие / В.С. Лукинский [и др.]. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2007. — 448 с.
6. Пилипчук С.Ф. Логистика предприятия: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 231 с.
7. Пилипчук С.Ф., Орлов А.Н., Фрейдинов Ю.Л. Транспортные устройства гибких производств: Учебное пособие. — Л.: ЛГТУ, 1990. — 104 с.
8. Пилипчук С.Ф., Радаев А.Е. Моделирование складских логистических процессов // Логистика и управление цепями поставок: современные тенденции в России и Германии: Сборник статей 5-ой российско-немецкой конференции по логистике. / Под ред. Иванова

Д.А., Лукинского В.С., Соколова Б.В., Кэшеля Й. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — с. 197-208.
9. Пилипчук С.Ф., Радаев А.Е. О системе показателей эффективности работы склада // Логистика и управление цепями поставок. — 2009. — № 6. — с. 40-53.
10. Пилипчук С.Ф., Радаев А.Е. О проектировании склада штучных грузов // Логистика и управление цепями поставок. — 2010. — № 04(39), август 2010 г. — с. 21-33.
11. Погрузчики. Справочник / Под. ред. Г.П. Ефимова. — 2-е изд. — М.: Транспорт, 1989. — 240 с.
12. Радаев А.Е. Формирование структуры парка подъемно-транспортного оборудования складской системы // 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. 1009-1019.

Yu. A. Nozdrachyova, S. F. Pilipchuk, A. E. Radaev[1]

OPTIMIZATION MODEL FOR DETERMINING THE FEATURES OF HANDLING MACHINERY TECHNOLOGICAL GROUP

St Petersburg State Polytechnic University, Russia.

Abstract

The article regards the issue of optimization concerning the features of handling machinery technological group for the unit load warehousing systems, as well as the issue of determining the handling machinery optimal quantity. The optimization model has been developed on the basis of regression analysis of the statistics on the handling machinery technical features and its cost. The model serves for the purpose of finding the optimal solution for the given productivity while minimizing the machinery costs.

Key words: optimization model, warehousing system, material-handling equipment, technological group, technical features.

REFERENCES

[1] Gadzhinskiy A.M. Sovremennyy sklad. Organizatsiya, upravleniye, tekhnologii i logistika: textbook. — Moscow: TK Velbi, Prospekt, 2005. — 176 p. (rus.)
[2] Kuzmenkov V.A., Yuryev V.N. Matematicheskie metody i modeli issledovaniya operatciy. Parametricheskaya, mnogokriterialnaia i

tselochislennaya optimizatsiya: textbook. — St Petersburg: Polytechnic University, 2011. — 120 p. (rus.)
[3] Malikov O.B. Sklady i gruzovyye terminaly: reference book. — St Petersburg: Biznes-pressa, 2005. — 560 p. (rus.)
[4] Machulskiy I.I., Alepin E.A. Mashiny bezrelsovogo transporta. — Moscow: Mashinostroeniye, 1982. — 232 p. (rus.)
[5] Modeli i metody teorii logistiki: textbook / V.S. Lukinskiy [et al.]. — 2nd edition. — St Petersburg: Piter, 2007. — 448 p. (rus.)
[6] Pilipchuk S.F. Logistika predpriyatiya: textbook. — St Petersburg: Polytechnic University, 2008. — 231 p. (rus.)
[7] Pilipchuk S.F., Orlov A.N., Freidinov Yu. L. Transportnye ustroystva gibkih proizvodstv: textbook. — Leningrad: Leningrad State Technical Universiry, 1990. — 104 p. (rus.)
[8] Pilipchuk S.F., Radaev A.E. Modelirovaniye skladskih logisticheskih protsessov // Logistika i upravleniye tsepyami postavok: sovremennye tendentsii v Rossii I Germanii: Collected works of the 5th Russian-German logistics conference. / Ed. Ivanov D.A., Lukinskiy V.S., Sokolov B.V., Cashel J. — St Petersburg: Polytechnic University, 2010. — pp. 197-208. (rus.)
[9] Pilipchuk S.F., Radaev A.E. O sisteme pokazateley effektivnosti raboty sklada // Logistika i upravleniye tsepyami postavok. — 2009. — № 6. — pp. 40-53. (rus.)
[10] Pilipchuk S.F., Radaev A.E. O proyektirovanii sklada shtuchnykh gruzov // Logistika i upravleniye tsepyami postavok. — 2010. — # 04(39), august 2010. — pp. 21-33. (rus.)
[11] Pogruzchiki. Reference book / Ed. G.P. Efimov. — 2nd edition. — Moscow: Transport, 1989. — 240 p. (rus.)
[12] Radaev A.E. Formirovaniye struktury parka podyemno-transportnogo oborudovaniya skladskoy sistemy // Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: Materials of 3rd International scientific-and-practical conference / Ed. M.M. Radkevich, A.N. Yevgrafov. — St Petersburg: Polytechnic University, 2013. — pp. 1009-1019. (rus.)

УДК 621.874.001.24

Н.Н. Панасенко[1], А.В. Синельщиков[2],
В. В. Рабей[3], Л.С. Синельщикова[4]

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ПОДЪЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

[1]Николай Никитович Панасенко, профессор
Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань
Тел.: +79061774499, E-mail: psastr@mail.ru

[2]Алексей Владимирович Синельщиков, доцент
Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань
Тел.: +79272826211, E-mail: laex@bk.ru

[3]Вадим Владимирович Рабей, аспирант
Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань
Тел.: +79881799256, E-mail: vadimbey@hotmail.com

[4]Лариса Сергеевна Синельщикова, магистр - инженер
Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань
Тел.: +79272826341, E-mail: alotoflapsus@gmail.com

Аннотация

Предложены методики конечно-элементного моделирования (КЭМ) подъемных сооружений, следуя двум значимым факторам: первый –учтен опыт КЭМ стационарных строительных конструкций и машинных агрегатов, второй – конечно-элементное представление несущих систем передвижных грузоподъемных кранов, представленных, кроме несущих структур – множеством подвижных и неподвижных балластов, противовесов, шарниров, демпферов, балансиров, опорно-поворотных устройств, канатно-блочных систем и др. КЭМ подъемных сооружений отражено на опыте моделирования основных типов кранов отечественного и зарубежного производства: козловых, мостовых, портальных, портально-башенных и башенных, элементы несущих систем которых представлены балочными

тонкостенными стержнями, тонкими пластинами и трехмерными базовыми конечными элементами (тетраэдрами, гексаэдрами). КЭМ проведено применительно к теории метода пространственных конечных элементов, а сами модели апробированы в задачах расчетного анализа кранов для оценки: остаточного ресурса (кран Абус - 16 т, Ганц - 5/6т), сейсмической и промышленной безопасности (краны КМК-150/20 т, МК-160/32 т, МК-15т, КП-480 г/п 32/16 т, КГМ – 401 П г/п 8 т).

Ключевые слова: грузоподъемные краны, расчетно-динамические модели, метод конечных элементов, уравнение движения, расчетный анализ.

Метод конечных элементов (МКЭ) применительно к расчетному анализу конструкций кранов опирается на использование современных ЭВМ и классические подходы к решению задач динамики, состоящие в выводе уравнений движения, описывающие эксплуатационные динамические процессы и соответствующие им граничные условия.

Известно, что аналитические процедуры (в общем случае) конечно-элементного моделирования конструкций кранов как систем со многими степенями свободы продиктованы терминами матричного уравнения движения

$$[M]_{n\times n}\left\{\frac{d^2V}{dt^2}\right\}_{1\times n}+[C]_{n\times n}\left\{\frac{dV}{dt}\right\}_{1\times n}+[K]_{n\times n}\{V(t)\}_{1\times n}=$$

$$=\{P_{ст}\}_{1\times n}+\{P_{дин}\}_{1\times n}-F\left(\left\{\frac{dV}{dt}\right\},\{V(t)\}\right)_{1\times n}, \qquad (1)$$

в котором $[M,C,K]$ матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{V(t),P_{ст},P_{дин},F\}$ - соответственно векторы перемещений, статических, динамических нагрузок и нелинейных сил (трения, нелинейно-деформируемых материалов, демпферов и др.).

Согласно МКЭ, компоненты левой части (1) формируются на основе дискретизации действительных континуальных стержневых элементов и сплошных сред кранов, имеющих бесконечное число степеней свободы, аппроксимацией конечными элементами с конечным числом степеней свободы, взаимодействующих между собой только в узловых точках (узлах) (рис. 1). Как известно, выбор степеней свободы конечных элементов (КЭ) и соответствующих аппроксимирующих функций полностью определяет скорость сходимости и оценку погрешности результатов расчетного анализа МКЭ.

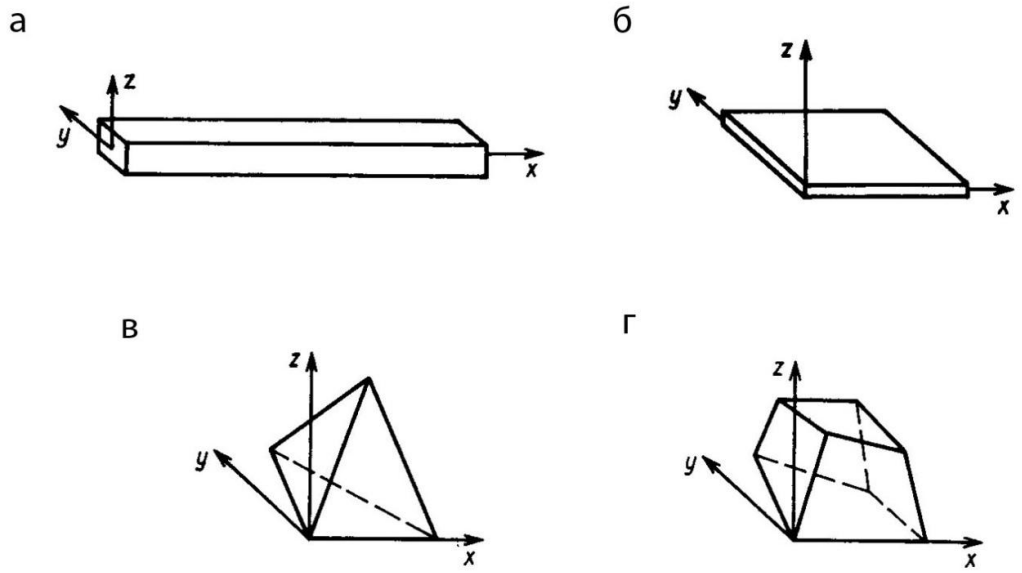


Рис. 1. Дискретизация континуальных систем металлоконструкции кранов конечными элементами: а – тонкостенный стержневой (балочный) элемент; б - тонкая пластина; в, г - трехмерные КЭ - тетраэдр и гексаэдр

Таким образом, аппроксимирующая расчетно-динамическая модель (РДМ) крана, согласно (1), в форме компьютерного метода перемещений должна обеспечить:

1) разбиение конструкций крана на КЭ и подготовку топологической, геометрической и физической информации;
2) установление факторов взаимодействия с окружающей средой;
3) построение для выделенных КЭ соответствующих матриц (жесткости, масс, демпфирования) и векторов, определяющих зависимости между реакциями и перемещениями в узлах элементов;
4) формирование разрешающей системы линейных алгебраических или дифференциально-алгебраических (в нестационарных задачах) уравнений (типа (1));
5) решение полученной системы уравнений и установление полей перемещений, внутренних силовых факторов, напряжений и т.д.;
6) обработку результирующей информации и ее анализ.

Опыт авторов по исследованию кранов показал, что перечисленные требования к конечно-элементным РДМ кранов поддаются четкой универсальной алгоритмизации, а их программная реализация не вызывает принципиальных затруднений при наличии библиотеки стандартных подпрограмм, реализующих этапы расчета.

Пользуясь возможностью, авторы доклада считают, что, возможно, к первым работам по конечно-элементному моделированию кранов следует отнести работы [1,2], дальнейшее скромное развитие обсуждаемая задача получала в работах авторов доклада [3,4,5,6,7,8,9]. Своими разработками

авторы настоящего доклада обязаны работам Л.А. Розина, Н.Н. Гольденблата, А.С. Городецкого, А.Н. Орлова, К.П. Манжулы [10], В.И. Мяченкова, а также более поздним работам А.В. Перельмутера и В.И. Сливкера [11] и накопленному проектировщиками опыту использования компьютерных программ [12,13,14].

Прежде всего, следует указать на отличительную особенность РДМ кранов, как систем с переменными параметрами внешних эксплуатационных состояний – массы транспортируемого груза, положения на мосту грузовой тележки, либо верхнего строения портальных, башенных кранов относительно кранового рельсового пути (КРП), высоты подъема груза и др., расчетный анализ параметров «R» которых следует проводить на основе предварительного анализа РДМ с целью определения наиболее невыгодного эксплуатационного состояния, которое должно быть установлено, не исключено, расчетными методами анализа. В частности, при расчетной оценке ресурса портального крана Абус – 16 т (1965 г) анализу подвергались 15 эксплуатационных состояний в параметрах эксплуатационного цикла (рис. 2).

Следующей особенностью конечно-элементного моделирования конструкционных систем кранов является необходимость моделирования тонкостенных стержней открытого и замкнутого профиля, что особенно актуально для тяжелых козловых (рис. 3) и мостовых кранов (рис.4).

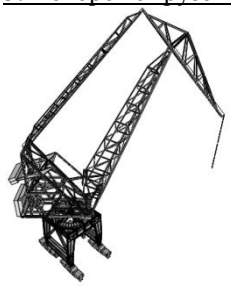
В докладе показано, что при моделирования стержнями тонкостенных коробчатых оболочек требуется учитывать известное соотношение [10] высоты сечения и длины КЭ, которое не должно превышать 1/8 длины. При больших до 1/5 значениях соотношения высоты сечения и длины стержня стержневая расчетная модель с точечными дискретными узлами, расположенными на пересечениях осей элементов (см. рис. 4б), становится некорректной. Выходом из создавшегося положения является моделирование коробчатых балочных систем мостовых кранов пластинчатыми и объемными (трехмерными) КЭ (рис.5).

Безотлагательным фактором при разработке РДМ податливых конструкций портальных (рис. 6) и башенных (рис. 7) кранов является идентификация нелинейностей, которые, как правило, сводятся к отклонению от закона Гука (физическая нелинейность), к отказу рассмотрения условий равновесия в геометрических терминах недеформированного состояния (геометрическая нелинейность), учету возможного изменения РДМ в процессе деформирования (конструктивная нелинейность) и составляют обычный «набор нелинейностей», к которым, кроме нелинейных эффектов сопротивления движению типа сухого трения (качения и скольжения), следует отнести нелинейные свойства демпферов стреловых систем и устройств обеспечения поворота, а также нелинейностей резиновых буферных устройств кранов подчиняющихся несжимаемой нелинейно-упругой модели Муни-Ривлина [15].

1. Подъем груза

2. Изменение вылета

3. Поворот с грузом

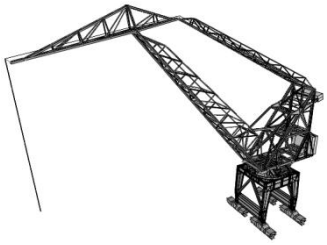


4. Поворот с грузом

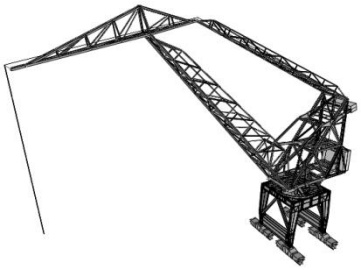
5. Поворот с грузом

6. Поворот с грузом

7. Изменение вылета с грузом



8. Разгрузка крана



9. Изменение вылета без груза

10. Изменение вылета без груза

11. Поворот без груза

12. Поворот без груза

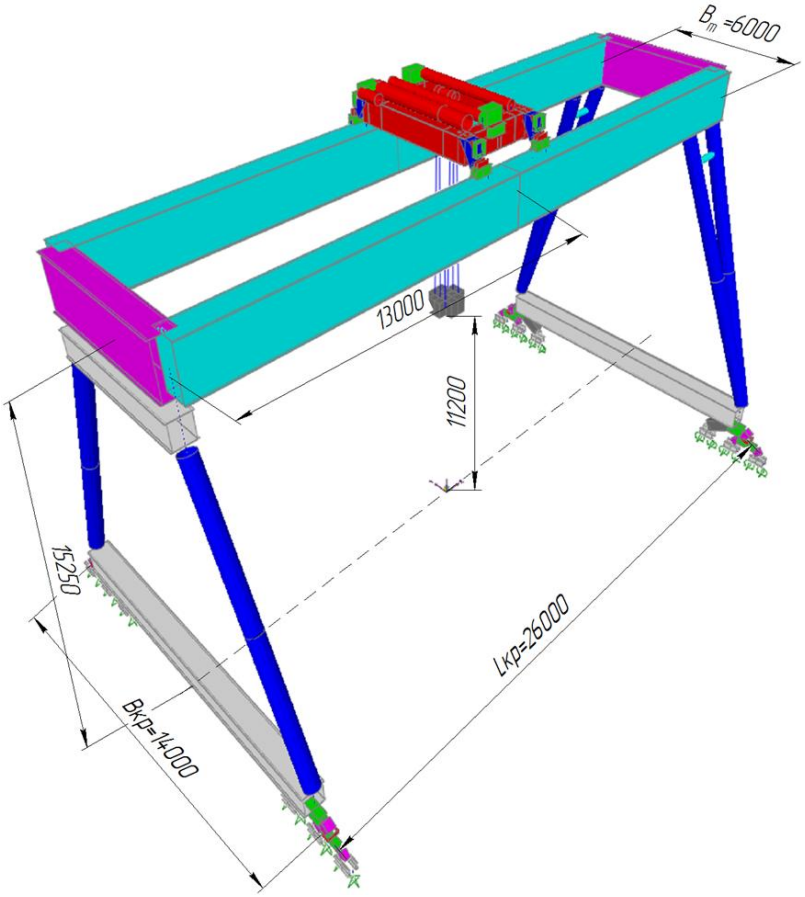
13. Изменение вылета и поворот без груза

14. Поворот без груза

15. Изменение вылета без груза

Рис. 2. Расчетно-динамические модели технологического цикла портального крана «Абус» г/п 16 т., рег. №34557: n =11466, 830 КЭ (1146 пластин, 4 КЭ типа «канат», 4 объемных элемента, 194 жестких и шарнирных связей (условных элементов)) и 1638 узлов

а



б

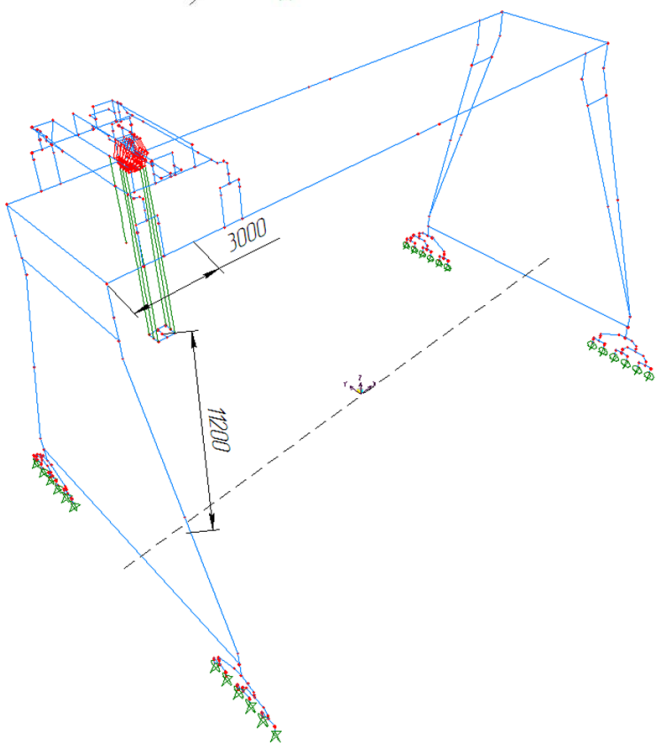


Рис. 3. Конечно-элементная модель крана козлового электрического рельсового КМК-150/20 т зав. № 160, 401 КЭ (338 стержней, 56 пластин, 7 КЭ типа «канат»), узлов 378: а – конструктивная модель; б – РДМ с n=2646 степенями свободы

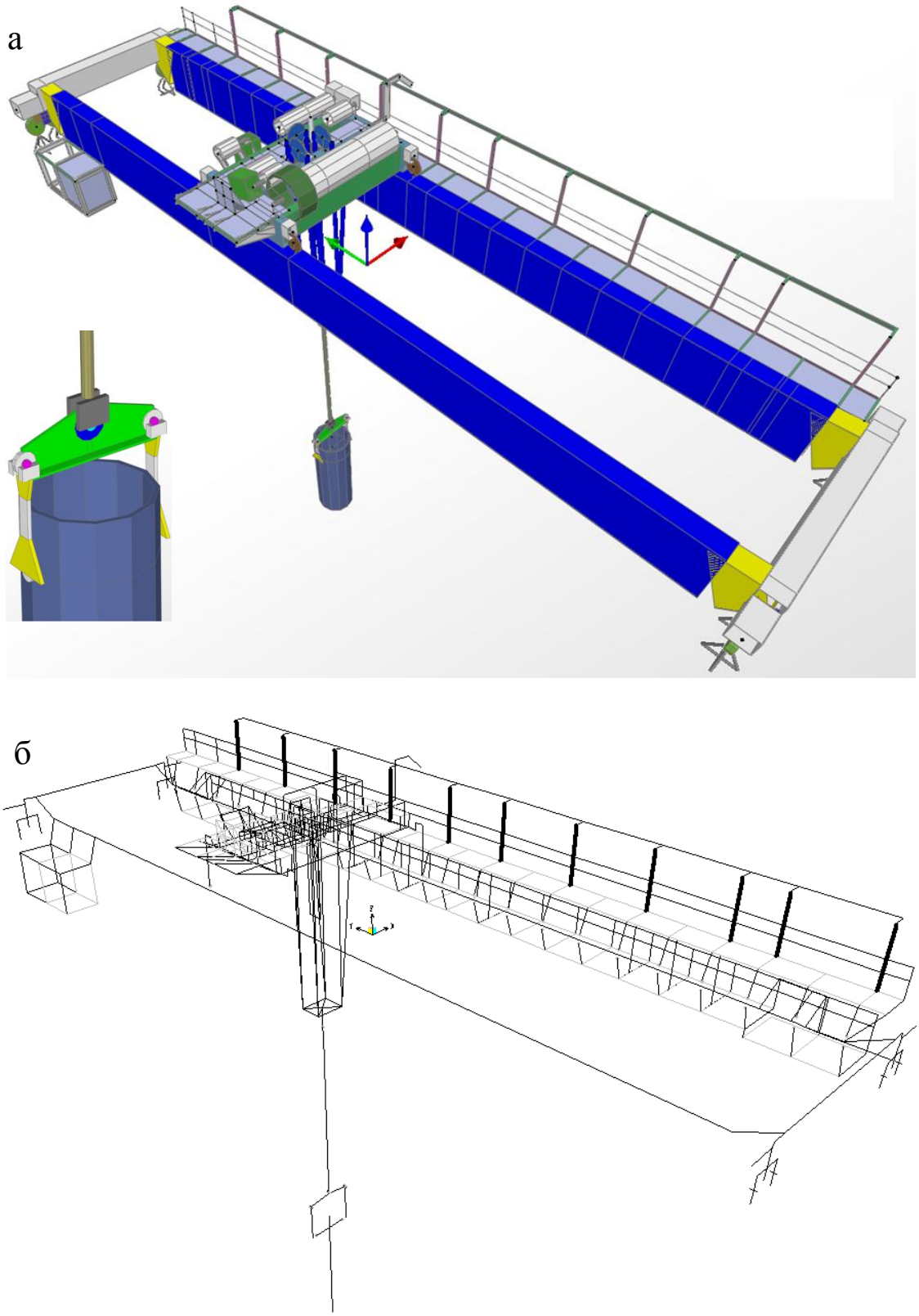


Рис. 4. Конечно-элементная модель мостового крана МК-160/32 т зав. №160, пролетом 33,5 м: а – конструктивная модель на основе пластинчатых КЭ; б – РДМ совмещенных стержневых балочных и пластинчатых КЭ: n = 3486, 863 КЭ в т.ч. 762 стержней, 90 пластин, 11 КЭ типа «канат» и 81 узлов

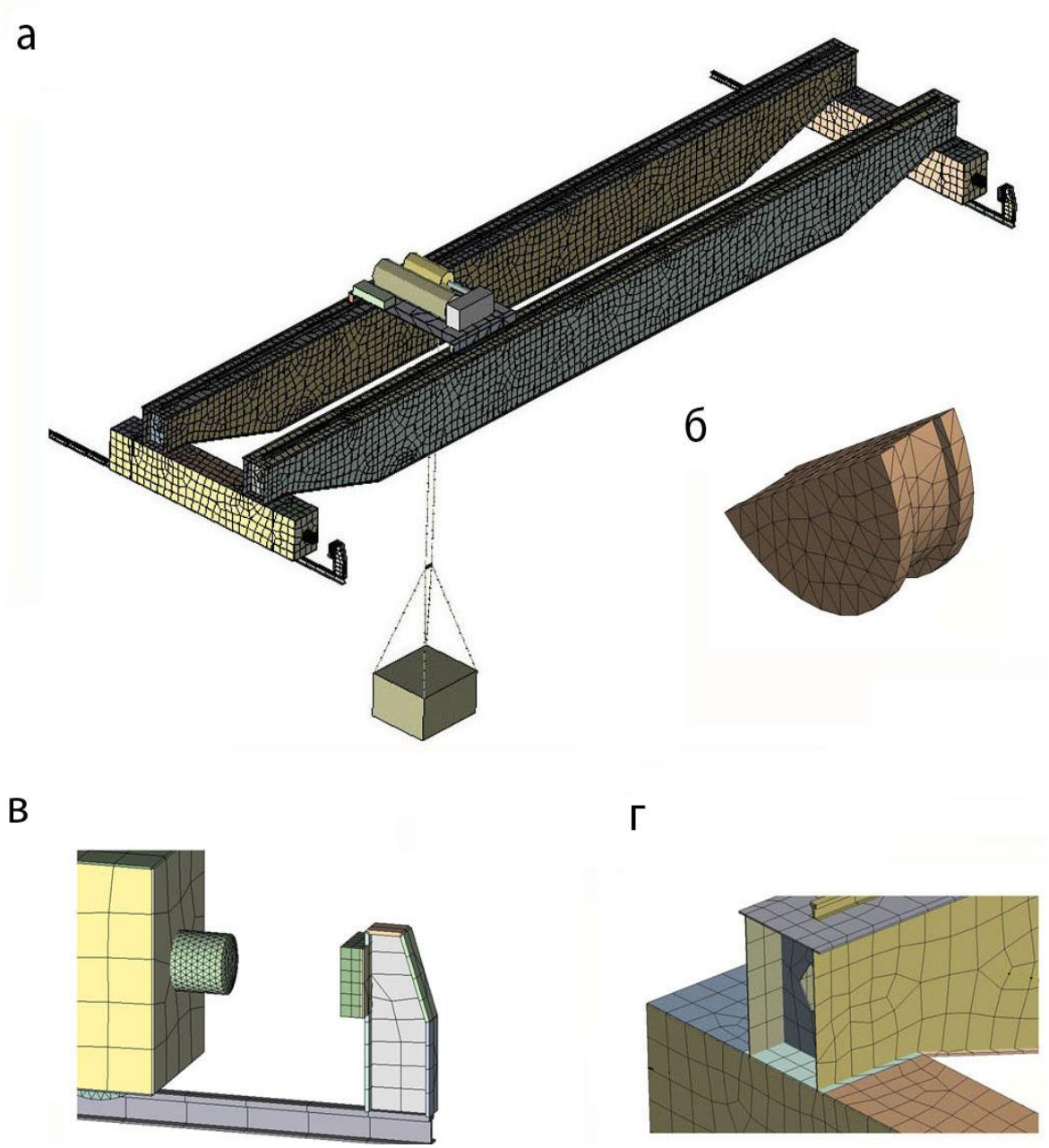


Рис. 5. Конечно-элементная РДМ мостового крана МК-15т зав.№5-546 рег.№39038: а – общий вид модели: 19833 КЭ и 13967 узлов: 97 стержневых КЭ, 11254 пластинчатых КЭ, 6756 объемных КЭ, 1726 жестких и шарнирных связей (условных элементов); б, в, г – фрагменты модели

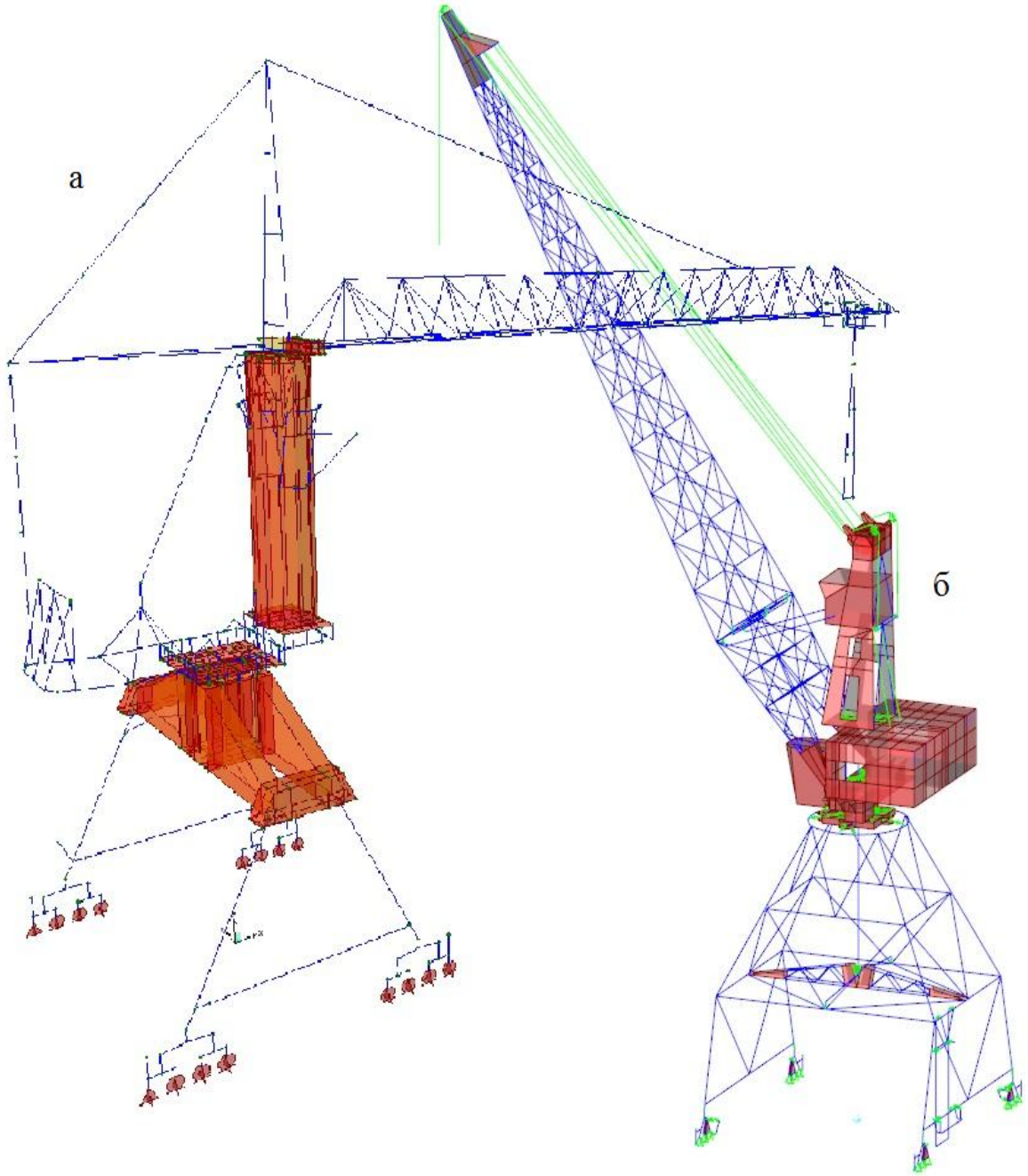


Рис. 6. Конечно-элементные РДМ стреловых кранов: а – портально-башенного КП-480 производства ОАО «Балткран» г/п 32/16 т на вылетах 14/30 м: n=3661, КЭ=357, в т.ч. 151 пластин, 33 КЭ канатов, 2954 стержневых балочных КЭ, узлов 523; б – портального ГАНЦ 5/6 т производства Венгерского судо-краностроительного з-да зав. № 341/4869: КЭ 1246, в т.ч.: 830 пластин, 12 КЭ канатов, 233 стержневых балочных КЭ, узлов 1429

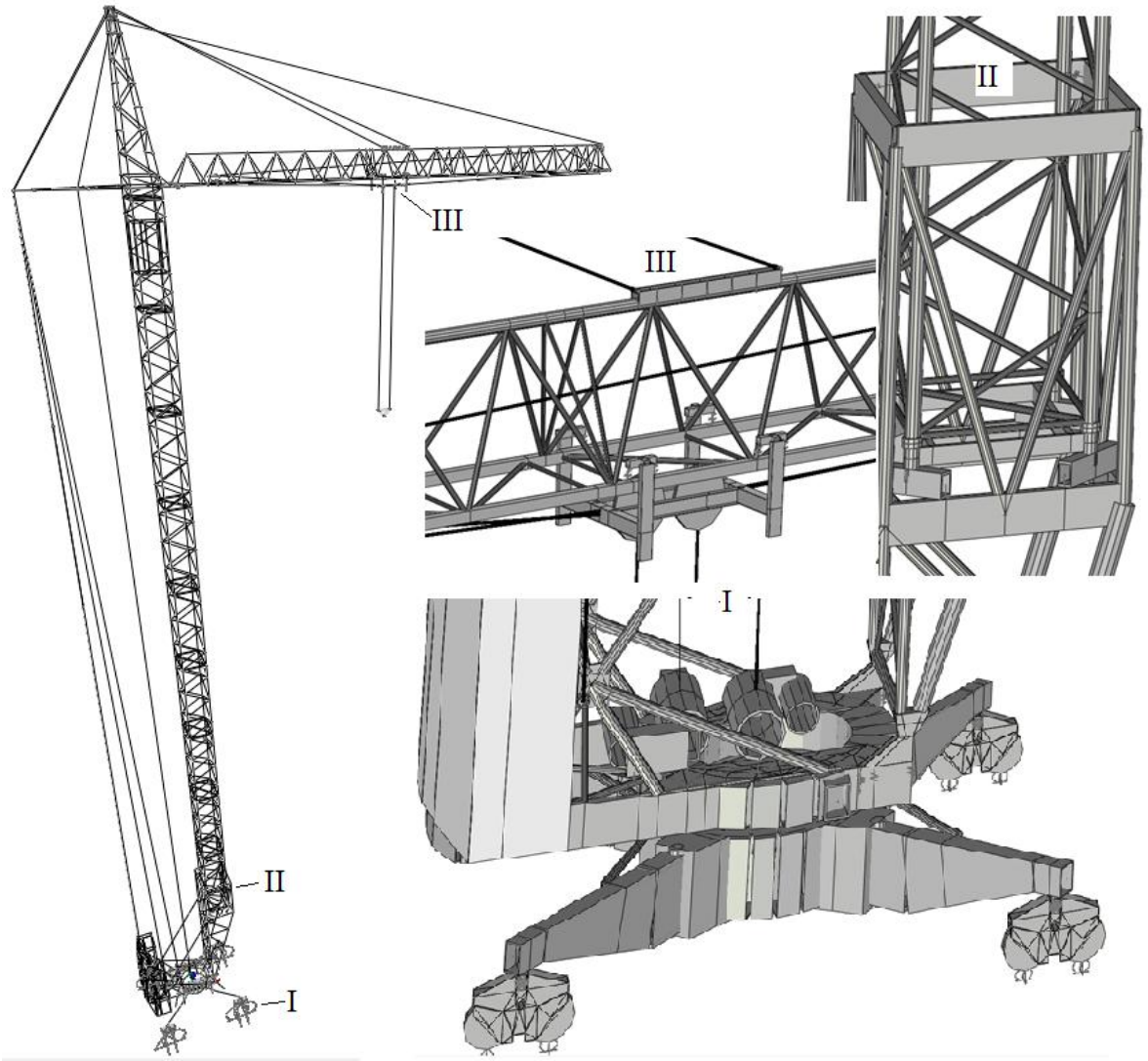


Рис. 7. Конечно-элементная РДМ башенного крана КБМ-401П г/п 8 т производства ПО «Ржевбашкран» зав. № 1205: n=10020, 2526 КЭ, в т.ч. 1383 балочных стержней, 775 пластин, 30 КЭ типа канат; 320 жестких связей; 18 объемных КЭ (см. рис. 1 г), узлов 1670: I, II, III – элементы крана, модели

Целесообразно указать, что представленная в докладе конечно-элементная методология разработки РДМ кранов отражает «принцип простоты РДМ», заключающийся в формализации узлов трения, реальных шарниров, узлов опорно-поворотных устройств (ОПУ) и связей, что надежно позволяет использовать численные методы современной математики и средства вычислительной техники. В расчетном обосновании сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) м/к и механизмов кранов упрощения РДМ направлены на то, чтобы она давала высшие тона спектра собственных частот стреловых кранов не более 50 Гц, кранов мостового типа – не более 80-100 Гц, которые, с необходимостью, получают из однородного уравнения

$$[M]\{\ddot{V}\}+[K]\{\dot{V}\}=\{0\}, \qquad (2)$$

вытекающего из (1), откуда, при допущении, что свободные колебания имеют вид простых гармонических колебаний, приходят к уравнению для собственных значений (однородной системе) n^{го} порядка

$$\left(-[\Lambda][M]+[K]\right)[\Phi]=\{0\}, \qquad (3)$$

в котором $[\Lambda]$ – диагональная матрица квадратов собственных частот ω_m^2 по формам колебаний $\{\varphi_m\}$, $m=\overline{1,n}$, а $[\Phi]$ – матрица форм собственных колебаний.

Второе направление обеспечения «простоты модели» заключается в применении «статического уплотнения» [10], приводящего к уменьшению количества динамических степеней свободы РДМ крана путем группировки масс m_{00} его конструкций в относительно небольшом количестве узлов, при этом остальные узлы РДМ оказываются безмассовыми либо пренебрежением инерционных характеристик системы, связанными с ее вращательными степенями свободы.

Таким образом, в (4) при статическом уплотнении следует положить $m_{00}=0$

$$\left\|\begin{bmatrix} K_{00} & K_{01} \\ K_{10} & K_{11} \end{bmatrix}\right\| \times \left\|\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{bmatrix}\right\| = \omega^2 \left\|\begin{bmatrix} m_{00} & 0 \\ 0 & M_{11} \end{bmatrix}\right\| \times \left\|\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{bmatrix}\right\|, \qquad (4)$$

из системы (4) исключается подвектор ψ_0, в результате чего задача модального анализа (3) резко уменьшается, а уравнение (2) приобретает вид (5)

$$\left(K_{11}-K_{10}K_{00}^{-1}K_{01}-\omega^2 M_{11}\right)\psi_1=0. \qquad (5)$$

В заключение доклада укажем на два фактора:

1. В настоящей работе конечно-элементное моделирование несущих конструкций кранов принималось одинаковым как для статического, так и для динамического расчетов.
2. В уравнении (1) затухание [C] рекомендуется учитывать в % от критического $\varepsilon=0,02-0,04\,(2-4\%)$, где $\varepsilon=\delta_з/2\pi$, а $\delta_з$ - логарифмический декремент затухания колебаний металлоконструкции крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шербан В., Драгомир, Филип К. Требования к антисейсмическому проектированию мостовых кранов и относящихся к ним конструкций // Семинар "Проблемы создания сейсмостойких АЭС": сб. материалов. Т.1/ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, Дубровник, СФРЮ, 2-7 нояб. 1981 г. - Дубровник , 1981. - С.165-175.

2. Энгельке М., Фишер У. Динамические исследования сейсмостойких кранов кругового действия // Семинар "Проблемы создания сейсмостойких АЭС": Сб. материалов. Т.1/ ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, Дубровник, СФРЮ , 2-7 нояб. 1981 г. - Дубровник , 1981. - С.97-105.
3. Панасенко Н.Н. Сейсмостойкие подъемно-транспортные машины атомных станций. Н.Н, Панасенко, С.Г. Божко – Красноярск: Изд-во Красноярск. государств. ун-та, 1987.- 208с.
4. Панасенко Н.Н. Динамика и сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций. Диссерт. … д-ра техн. наук. – В 2-х частях. Часть 1. Новочеркасск: НГТУ, 1992. – 475 с.
5. Синельщиков А.В. Динамика и сейсмостойкость мостовых кранов. – Диссерт. … канд. техн. наук. – Астрахань: АГТУ, 2000. – 276 с.
6. Panasenko N.N., Sinelschikov A.V., Rabey V.V. The Calculated Justification of Seismic Stability of Load-Lifting Cranes. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2014. Vol.9. pp.104-123.
7. Рабей В.В. Исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мостовых кранов в процессе их наезда на тупиковые упоры. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. №4(173). 2013. С.42-46.
8. Рабей В.В. Расчет резиновых буферов мостовых кранов грузоподъемностью до 50 т. Безопасность труда в промышленности.2013.№8. С. 45-50.
9. Юзиков В.П., Панасенко Н.Н. Строительная механика тонкостенных стержней. – Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2012. – 358 с.
10. Курапова Е.В., Манжула К.П. К методике моделирования циклического нагружения кранов мостового типа // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С.438-444.
11. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600с.
12. Назаров Д.А. Обзор современных программ конечно-элементного анализа/САПР и графика, 2000/№2. – С. 52-55
13. Каплун А.Б., Морозов Е.М, Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практ. руководство.- М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
14. Городецкий А.С., Назаров Ю.П., Жук Ю.Н. Повышение качества расчетов строительных конструкций на основе совместного использования программных комплексов STARK ES и ЛИРА // Информационный вестник ГУ МО Мособлгосэкспертизы, 2005, №1(8). – С. 42-49
15. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 262 с.

N.N. Panasenko, A.V. Sinelschikov,
V.V. Rabey, L.S. Sinelschikova

FINITE ELEMENT COMPUTER MODELS OF LOAD-LIFTING STRUCTURES

Astrakhan State Technical University, Russia

Abstract

Methodologies of finite element modeling (FEM) of load-lifting structures are proposed based on: a –an experience of FEM of stationary structures and machines; b – finite element models of load- lifting cranes are represented not only by their bearing structures but also by many movable and not movable counter ballasts, joints, buffers, balancers, rope-and-pulley systems etc. Finite element models of foreign and domestic types of gantry, bridge, portal and tower cranes were modeled by all types of basic finite elements such as beams, shells and solids. The efficiency of the models was tested in the calculated analysis problems such as calculation of remaining lifetime (crane Abus – 16 t, Ganz -5/6 t), seismic and industrial safety analysis (crane KMK -150/20 t, MK – 160/32 t, MK-15 t, KP-480 – 32/16 t, KGM-401P – 8t).

Keywords: load-lifting cranes, dynamic models, FEM, equation of motion, calculated analysis.

REFERENCES

[1] Sherban V., Dragomir, Filip K. Trebovaniya k antiseysmicheskomu proyektirovaniyu mostovykh kranov i otnosyashchikhsya k nim konstruktsiy // Seminar "Problemy sozdaniya seysmostoykikh AES": sb. materialov. T.1/INTERATOMENERGO, Dubrovnik, SFRYu, 2-7 noyab. 1981 g. - Dubrovnik , 1981. - P.165-175. (rus.)

[2] Engelke M., Fisher U. Dinamicheskiye issledovaniya seysmostoykikh kranov krugovogo deystviya // Seminar "Problemy sozdaniya seysmostoykikh AES": Sb. materialov. T.1/ INTERATOMENERGO, Dubrovnik, SFRYu , 2-7 noyab. 1981 g. - Dubrovnik , 1981. - P.97-105. (rus.)

[3] Panasenko N.N. Seysmostoykiye podyemno-transportnyye mashiny atomnykh stantsiy. N.N, Panasenko, S.G. Bozhko – Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarsk. gosudarstv. un-ta, 1987.- 208 p. (rus.)

[4] Panasenko N.N. Dinamika i seysmostoykost podyemno-transportnogo oborudovaniya atomnykh stantsiy. Dissert. … d-ra tekhn. nauk. – V 2-kh chastyakh. Chast 1. Novocherkassk: NGTU, 1992. – 475 p. (rus.)

[5] Sinelshchikov A.V. Dinamika i seysmostoykost mostovykh kranov. –

Dissert. … kand. tekhn. nauk. – Astrakhan: AGTU, 2000. – 276 p. (rus.)
[6] Panasenko N.N., Sinelschikov A.V., Rabey V.V. The Calculated Justification of Seismic Stability of Load-Lifting Cranes. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2014. Vol.9. pp.104-123.
[7] Rabey V.V. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy mostovykh kranov v protsesse ikh nayezda na tupikovyye upory. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. №4(173). 2013. P.42-46. (rus.)
[8] Rabey V.V. Raschet rezinovykh buferov mostovykh kranov gruzopodyemnostyu do 50 t. Bezopasnost truda v promyshlennosti.2013.№8. P. 45-50. (rus.)
[9] Yuzikov V.P., Panasenko N.N. Stroitelnaya mekhanika tonkostennykh sterzhney. – Volgograd: Volgogradskoye nauchnoye izdatelstvo, 2012. – 358 p. (rus.)
[10] Kurapova E.V., Manzhula K.P. K metodike modelirovaniya tsiklicheskogo nagruzheniya kranov mostovogo tipa // Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye: Materialy 2-y Mezhdunar. nauch.- prakt. konferentsii. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – P.438-444. (rus.)
[11] Perelmuter A.V., Slivker V.I. Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza. – M.: DMK Press, 2007. – 600 p. (rus.)
[12] Nazarov D.A. Obzor sovremennykh programm konechno-elementnogo analiza/SAPR i grafika, 2000/№2. – P. 52-55. (rus.)
[13] Kaplun A.B., Morozov Ye.M, Olferyeva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoye rukovodstvo.- M.: Yeditorial URSS, 2003. – 272 p. (rus.)
[14] Gorodetskiy A.S., Nazarov Yu.P., Zhuk Yu.N. Povysheniye kachestva raschetov stroitelnykh konstruktsiy na osnove sovmestnogo ispolzovaniya programmnykh kompleksov STARK ES i LIRA // Informatsionnyy vestnik GU MO Mosoblgosekspertizy, 2005, №1(8). – P. 42-49. (rus.)
[15] Korobeynikov S.N. Nelineynoye deformirovaniye tverdykh tel. – Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN, 2000. – 262 p. (rus.)

УДК 621.874.001.24

В. В. Рабей

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ С ТУПИКОВЫМИ УПОРАМИ

Вадим Владимирович Рабей, аспирант
Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань
Тел.: +79881799256, E-mail: vadimbey@hotmail.com

Аннотация

В докладе представлены результаты диссертационной работы* по проблеме наезда грузоподъемных кранов на тупиковые упоры. Подвергнуты анализу опубликованные в научной литературе и стандартах математические и расчетные модели процесса наезда грузоподъемных кранов на препятствия. Разработана математическая нелинейная модель динамики наезда мостового, портального и башенного грузоподъемных кранов на тупиковые упоры на основе численного метода анализа МКЭ. Приведены основные результаты вычислительных экспериментов по взаимодействию расчетно-динамических моделей кранов с тупиковыми упорами.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, тупиковые упоры, наезд, математическая модель, МКЭ

Наезд грузоподъемных (г/п) кранов на тупиковые упоры (ТУП) является распространенной аварийной ситуацией происходящей, как правило, в случаях отказа приборов и устройств безопасности движения крана, отказа тормозных систем механизмов передвижения крана, а также в случаях угона крана ветром. Высокая повреждаемость ударных ТУП (рис.1), буферов, металлоконструкций (м/к) мостовых, портальных кранов, говорят не только о частых наездах кранов на ТУП, но и о существовании больших динамических ударных нагрузок (рис. 1). Использование ТУП гравитационного типа показало, что при аварийном наезде на них башенных кранов, возможен переезд через эти упоры. Также при работе башенных кранов возможны ситуации, вызывающие опрокидывание кранов при нормальном наезде на безударные ТУП, поэтому в действительности эксплуатационники башенных кранов принципиально остерегаются их использовать. Многочисленные повреждения безударных ТУП, а также случаи их полного разрушения, в свою очередь, говорят о недостаточной прочности их металлоконструкций [1, 2].

*Научный руководитель д.т.н., профессор, академик подъемно-транспортной АН Украины Панасенко Николай Никитович

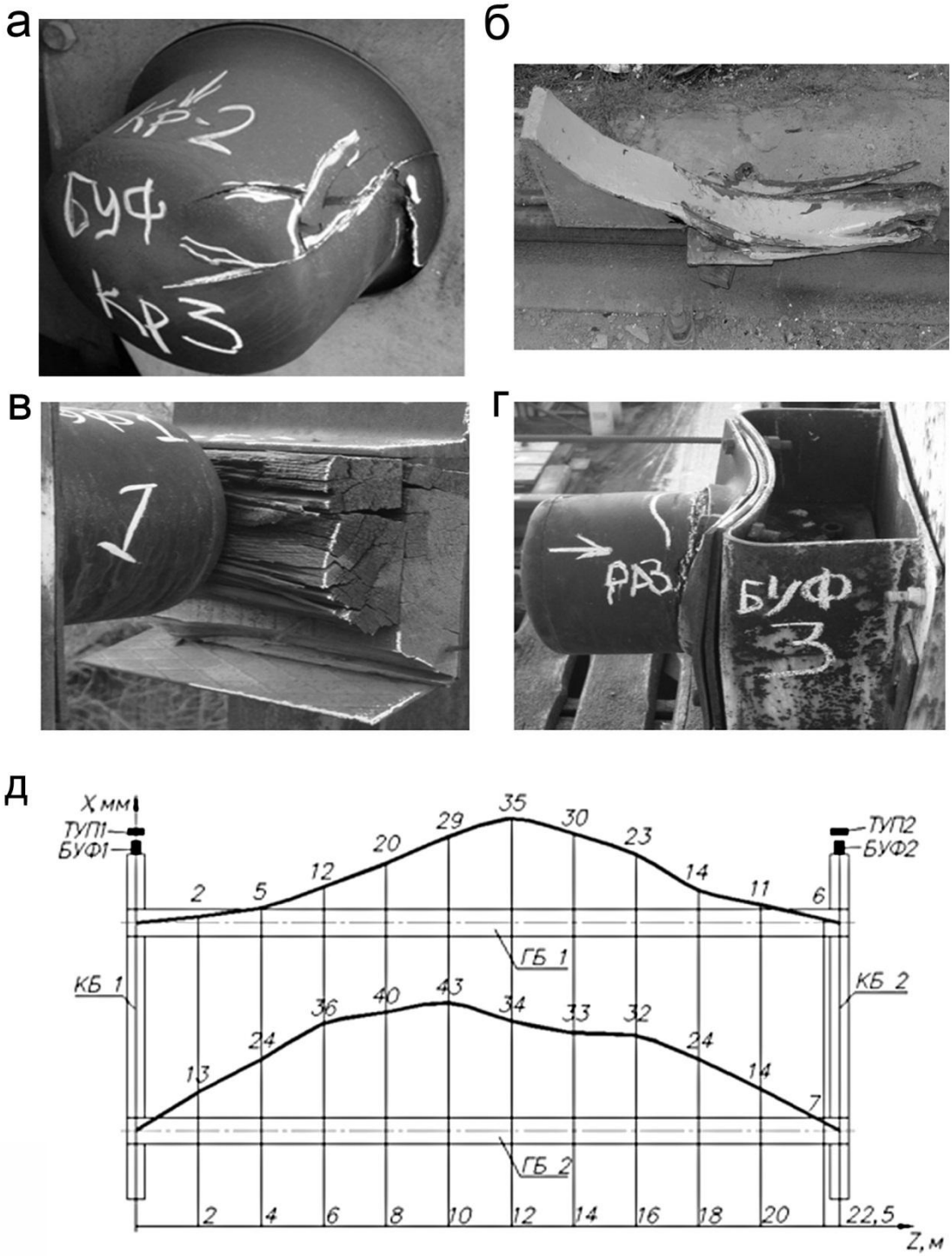


Рис. 1. Повреждения возникающие в результате ударных/безударных взаимодействий г/п кранов с ТУП: а - разрушение резинового буфера; б – разрушение безударного ТУП; в- разрушение ударного ТУП; г- деформация м/к крана в месте установки буферного устройства; д – горизонтальные деформации главных балок м/к мостового крана г/п 15 т, полученные при экспертном обследовании кранов в условиях ОАО ПСК «Строитель Астрахани»

Следует отметить, что как отечественные, так и зарубежные нормы и стандарты по г/п кранам не содержат полных рекомендаций об учете нагрузок на г/п краны в процессе их наезда на ТУП [3 - 7]. При этом методы расчета нагрузок нерабочего состояния кранов, возникающих в металлоконструкции, буферах кранов в процессе их наезда на ТУП являются не точными. Прежде всего, это связано как с чрезмерным упрощением расчетно-динамических моделей кранов: используются либо плоские модели с 2-мя и 3-мя степенями свободы, либо практически не отражающие реальные несущие м/к кранов, так и с упрощением математических моделей: для вывода уравнений движения крана используется уравнение Лагранжа второго рода. Тоже самое касается существующих научно - исследовательских и диссертационных работ Петухова П.З., Черкасова В.Г., Мартынова А.В., Дейнеги В.И., Джигкаева Т.С., Поликарпова К.В., Жукова В.Г., Haas T.N. и др. [8].

В результате анализа как отечественных, так и зарубежных норм и стандартов по г/п кранам, а также существующих научно-исследовательских работ можно сделать следующие общие выводы, что при расчёте процессов взаимодействия г/п кранов с ударными/безударными ТУП:

1) не учитываются действительные упругие и демпферные характеристики буферов;

2) не учитываются упругие свойства материала из которого изготовлен амортизатор ТУП;

3) не учитывается поведение и влияние реальных м/к г/п кранов на процесс взаимодействия крана с ударными /безударными ТУП;

4) не учитывается длина подвеса транспортируемого груза;

5) не учитывается влияние свободного колебания груза на подвесе;

6) практически во всех стандартах и научных работах не учитывается влияние положения грузовой тележки в пролёте моста крана (для мостовых, козловых кранов), а также влияние величины вылета полезного груза (для портальных, башенных кранов) на процесс взаимодействия г/п крана с ТУП.

Из анализа работ по проблеме взаимодействия г/п кранов с ТУП не было обнаружено ни одной работы, где было бы отражено экспериментальное исследование механических свойств резиновых буферов г/п кранов, а также их реальное поведение в результате взаимодействия с ТУП. Стоит особенно отметить, что остается неопределенность в том, как отечественный изготовитель буферов марки БР определяет энергоёмкость буфера. Если, например, у зарубежных изготовителей буферов имеется информация по экспериментальным исследованием буферов (в основном полиуретановых), например, на статическое сжатие, то у отечественного производителя она полностью отсутствует. Важно отметить, что динамические испытания на удар данного материала не проводятся, а ТУ данных пред-

приятий (например, ТУ 2500-376-00152106-94) также не содержит информации о пределе прочности данного материала при ударе.

Стоит отметить, что некоторые стандарты и правила [5 - 7] по г/п кранам при расчете буферов индивидуально вводят различные коэффициенты нагрузок, избегая при этом характерные параметры, приведенные выше, которые играют важную роль в расчёте буферов, что может привести к значительной недооценке реальных ударных нагрузок, которые испытывают буфера при наезде г/п кранов на ТУП.

Таким образом, необходимо уточнение ударных и тормозных нагрузок возникающих в процессе наезда г/п кранов на ТУП, путем решения данной проблемы на более высоком математическом уровне, путём создания конечно-элементных расчетно-динамических моделей со многими степенями свободы отражающими реальные м/к различных типов г/п кранов.

Исходя из вышеизложенного в диссертационной работе автора доклада были поставлены следующие задачи:

1) построить расчетные модели со многими степенями свободы на основе МКЭ отражающие действительные м/к мостового, портального и башенного кранов;

2) разработать математическую модель на основе численного метода анализа – метода конечных элементов (МКЭ) процесса взаимодействия г/п кранов с ударными/безударными ТУП;

3) провести вычислительные эксперименты с различными параметрами наезда конечно-элементных моделей г/п кранов на ударные/безударные ТУП;

4) исследовать, как ударные/безударные процессы наезда г/п кранов на ТУП влияют на поведение и состояние их м/к, а также на техническое состояние буферов и ТУП;

5) выполнить экспериментальные исследования для подтверждения адекватности поведения созданных расчетно-динамических моделей реальным г/п кранам в процессе их взаимодействия с ТУП;

6) определить и установить максимально допустимые эксплуатационные параметры безопасного ударного/безударного взаимодействия г/п кранов с ТУП.

В соответствии с поставленной задачей на основе реальных м/к мостового, портального, башенного кранов (рис. 2) были созданы пространственные конечно-элементные модели со многими степенями свободы, включающие в себя три типа базовых конечных элементов – стержневого, пластинчатого и объемного. Так, число степеней свободы для мостового, портального и башенного кранов (см. рис. 2) соответственно составило 148405, 297786 и 54765.

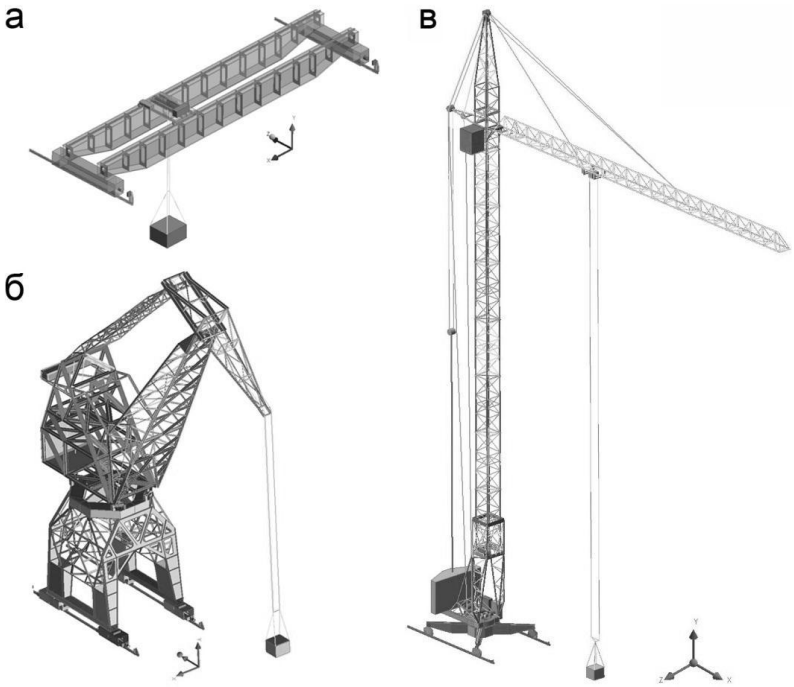


Рис. 2. Конструкционные модели г/п кранов: а- мостовой кран зав. №6860 рег.№39039 г/п 16 т (ОАО ПСК «Строитель Астрахани»); б- портальный кран «ABUS» рег. №34323 г/п 10 т (ССЗ ОАО «Красные Баррикады»); в- башенный кран КБ-408.21 зав.№ 665 рег. № 39340 г/п 10 т (ОАО ПСК «Строитель Астрахани»)

На основе построенных конечно-элементных моделях г/п кранов была сформирована математическая модель нелинейного процесса наезда г/п кранов на ТУП, имеющая вид нелинейного матричного уравнения движения МКЭ [9, 10]:

$$[M]\{\ddot{\mathbf{v}}\}+[C]\{\dot{\mathbf{v}}\}+[K(\mathbf{v})]\{\mathbf{v}\}+\{F(\dot{\mathbf{v}},\mathbf{v})\}=\{P(t)\}, \qquad (1)$$

где $[M]$- матрица масс, $[C]$ - матрица демпфирования, $[K(\mathbf{v})]$ - матрица жесткости, $\{\ddot{\mathbf{v}}\}$ - вектор узловых ускорений, $\{\dot{\mathbf{v}}\}$- вектор узловых скоростей, $\{\mathbf{v}\}$- вектор узловых перемещений, $\{F(\dot{\mathbf{v}},\mathbf{v})\}$ - вектор нелинейных сил и сил трения, $\{P(t)\}$ - вектор внешних приложенных сил.

Уравнение (1) решалось безусловно устойчивой одношаговой схемой интегрирования по времени β - методом Ньюмарка [11]:

$$\begin{aligned}
\ddot{\mathrm{v}}_{t+\Delta t} &= \frac{1}{\beta\Delta t^2}\left[\mathrm{v}_{t+\Delta t}-\mathrm{v}_t-\Delta t\dot{\mathrm{v}}_t\right]-\frac{1}{\beta}\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{\mathrm{v}}_t;\\
\dot{\mathrm{v}}_{t+\Delta t} &= \dot{\mathrm{v}}_t+\frac{1}{2}\Delta t\left[\ddot{\mathrm{v}}_{t+\Delta t}+\ddot{\mathrm{v}}_t\right]; \qquad (2)\\
\mathrm{v}_{t+\Delta t} &= \mathrm{v}_t+\Delta t\dot{\mathrm{v}}_t+(\Delta t)^2\left[\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{\mathrm{v}}_t+\beta\ddot{\mathrm{v}}_{t+\Delta t}\right],
\end{aligned}$$

где β - параметр интегрирования Ньюмарка; Δt - временной шаг интегрирования уравнения (1).

Контактная задача взаимодействия г/п кранов с ТУП решалась методом множителей Лагранжа. При этом, потенциал контактных сил имеет вид [12]

$$W_c = -\int_c t \cdot (x^1 - x^2) dc\,, \qquad (3)$$

где c – поверхность контакта между двумя телами; t – вектор поверхностных контактных сил, действующих на границе двух тел; x^1 и x^2 – радиусы-векторы материальных точек двух тел в текущей конфигурации.

В результате теоретических исследований процесса наезда г/п кранов на ТУП удалось установить следующее:

1. Получена полная картина НДС м/к двухбалочного мостового крана г/п 15 т в процессе его наезда на ударные ТУП [13]. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили отдельный вклад ударного взаимодействия мостового крана с ТУП в общее НДС м/к крана (рис. 3).

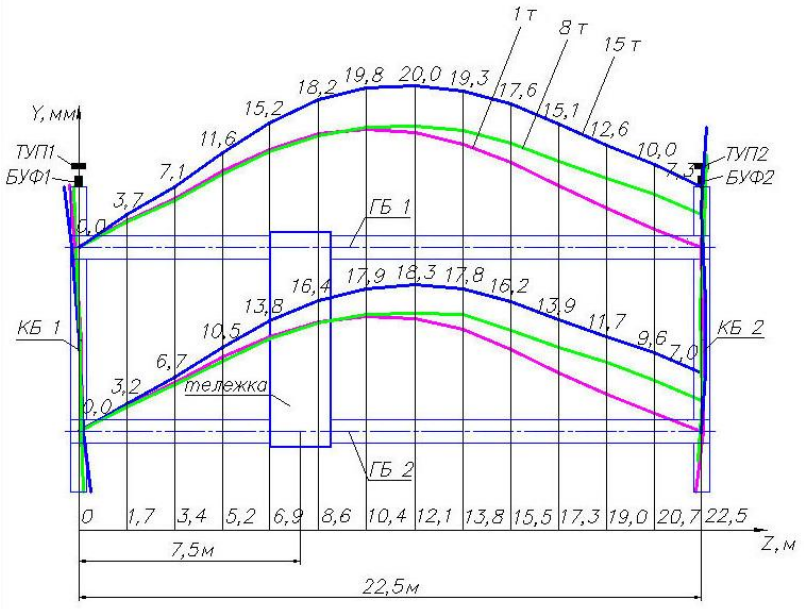


Рис. 3. Деформационное состояние м/к мостового крана при его наезде на ТУП ($V_{кр}$ = 80 м/мин, $L_п$ = 2 м) при расположении грузовой тележки в 2/3 пролета моста ($2/3L_{пр}$): 1 т, 8 т, 15 т – масса транспортируемого груза

2. Исследовано поведение резиновых буферов марки БР в процессе наезда двухбалочного мостового крана г/п 15 т на ударные ТУП [14] (рис. 4). Теоретически удалось определить реальную поглощаемую энергию буфером БР-200 в результате ударного взаимодействия мостового крана с ТУП при различных эксплуатационных состояниях крана. По результатам экспериментов предложена корректировка формулы из ОСТ 24.191.37-78 для расчета резиновых буферов мостовых кранов г/п до 50 т (4):

$$nE_1 < \frac{(M_{кр} + 0,2 \cdot m_{гр}) \cdot (0,86 \cdot V_{кр})^2}{2} < nE_2 \ , \qquad (4)$$

где E_1 и E_2 – максимальные рабочие энергоёмкости буферов [14]; n – число буферов, одновременно воспринимающих кинетическую энергию крана; $M_{кр}$ - масса крана; $m_{гр}$ - масса транспортируемого груза; $V_{кр}$ - номинальная скорость крана.

3. Исследовано поведение резиновых буферов марки БР в процессе наезда портального крана «ABUS» г/п 10 т на ударные ТУП. Определена действительная поглощаемая энергия буфером БР-200 в результате ударного взаимодействия портального крана с ТУП при различных эксплуатационных состояниях крана. Опираясь на результаты экспериментов, предложена аналитическая формула (5) по расчету резиновых буферов марки БР для портальных кранов:

$$nE_1 < \frac{(M_{кр} + 0,7 \cdot m_{гр}) \cdot (0,88 \cdot V_{кр})^2}{2} < nE_2 . \qquad (5)$$

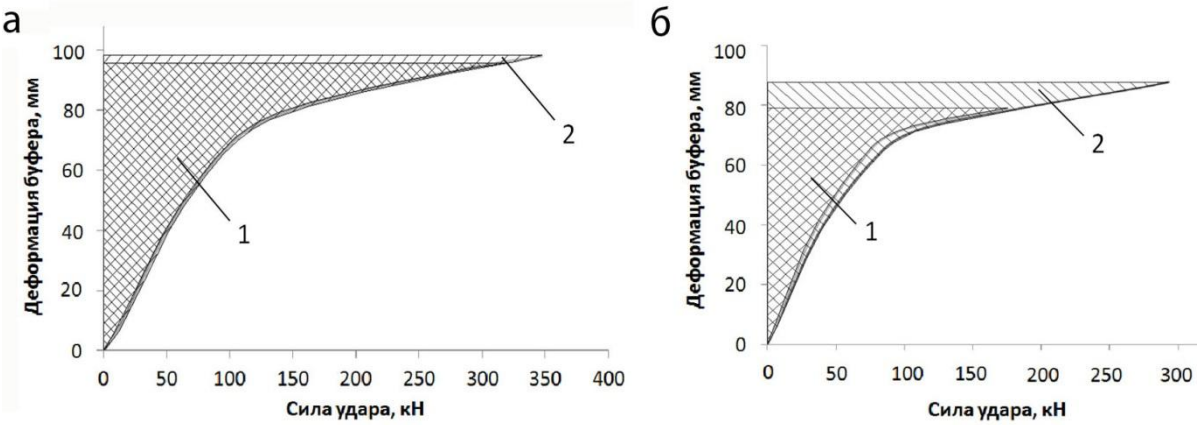


Рис. 4. Теоретически полученная энергия ($E_п$) поглощённая буфером БР-200 в результате наезда г/п кранов на ТУП: а – мостового крана г/п 15 т ($V_{кр}$=1,3м/с, $L_п$ = 2 м): 1- 1/2$L_{пр}$, $m_{гр}$=1т ($E_п$=8108 Нм); 2- 1/2$L_{пр}$, $m_{гр}$=15 т ($E_п$=8962 Нм); б – портального крана «ABUS» г/п 10 т ($V_{кр}$=0,4125 м/с, $m_{гр}$=10 т, $L_в$=7 м, $L_п$ = 2 м) при различных амортизаторах ТУП: 1 – резиновый амортизатор ТУП ($E_п$=3740 Нм); 2 – деревянный амортизатор ТУП ($E_п$=6054 Нм), где $L_п$ – длина подвеса транспортируемого груза; $L_в$ –вылет стрелы крана

4. Результаты вычислительных экспериментов показали, что даже при соблюдении всех требований правил ПБ 10-382-00 по безопасной эксплуатации г/п кранов кинетическая энергия кранов воспринимаемая резиновыми буферами в тупиковых участках пути превышает, по крайней мере вдвое, энергоемкость буферов, что на практике приводит к разрушениям буферов, ТУП и оказывает неблагоприятное влияние как на м/к г/п кранов, так и на поддерживающие конструкции зданий и сооружений.

5. Получена общая картина поведения, в том числе деформационные характеристики и характеристики устойчивости положения в пространстве башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т в зависимости от различных эксплуатационных состояний наезда на безударные ТУП [15, 16] (рис. 5). Результаты вычислительных экспериментов показали важность учета действительной м/к башенного крана в задаче его наезда на безударные ТУП. Установлено, что динамические процессы наезда башенных кранов на безударные ТУП не могут быть отражены упрощенными моделями с несколькими степенями свободы. Показано, что существующие безударные ТУП являются не достаточно надежным противоаварийным средством гашения остаточной скорости башенного крана, а также, что наезд на них с номинальной и выше скоростью не безопасен.

Серия проведенных натурных экспериментов по наезду мостового и башенного кранов на ударные и безударные ТУП позволили оценить расхождение некоторых основных результатов теоретических и экспериментальных исследований, которое не превысило 5 - 10%.

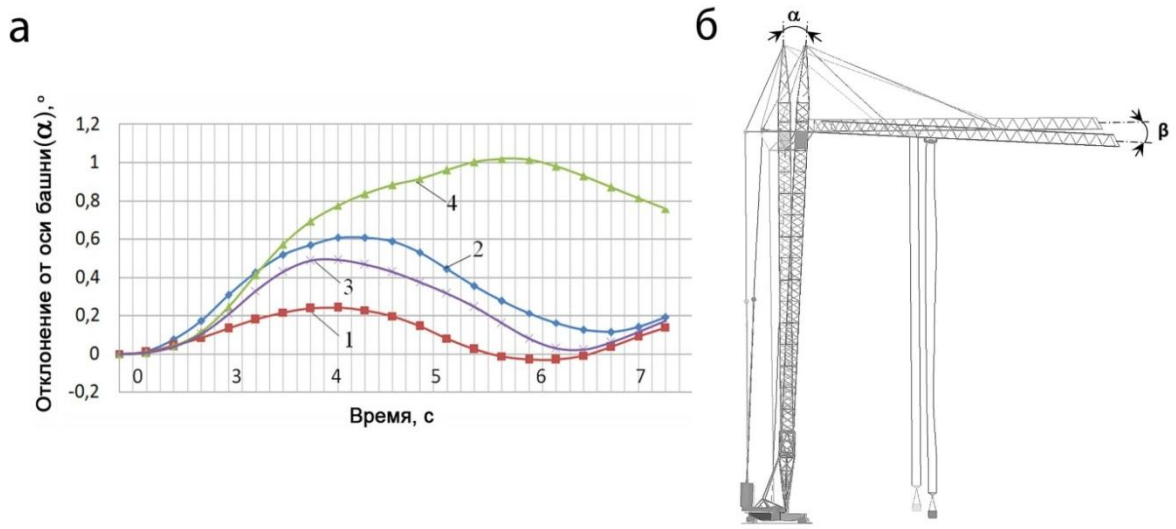


Рис. 5. Значения отклонений башни башенного крана КБ-408.21 в результате наезда на безударные ТУП: а - 1- $V_{кр}$=0,3 м/с, $m_{гр}$ =1т, $L_в$=16 м; 2- $V_{кр}$=0,3 м/с, $m_{гр}$ =10 т, $L_в$=16 м; 3- $V_{кр}$=0,3 м/с, $m_{гр}$ =1 т, $L_в$=40 м; 4- $V_{кр}$=0,3 м/с, $m_{гр}$ =3 т, $L_в$=40 м; б - деформационное состояние м/к крана: α – угол отклонения башни; β – угол отклонения стрелы

В заключение отметим, что результаты теоретических расчетов по наезду г/п кранов на ударные и безударные ТУП должны послужить для:

1. Уточнения понимания того, как ударные/безударные процессы наезда г/п кранов на ТУП влияют на поведение и состояние их м/к, а также на техническое состояние буферов, ударных и безударных ТУП.
2. Использование результатов исследования при проектировании новых конструкций г/п кранов

3. Послужить основой для корректировки старых и создания новых стандартов и правил по г/п кранов в части содержания видов предельных состояний и их расчетных сочетаний нагрузок.
4. Разработка технического регламента по расчетному анализу динамических процессов наезда г/п кранов на препятствия (в т.ч. столкновений кранов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабей В.В., Панасенко Н.Н. Динамика ударного взаимодействия грузоподъемных кранов с препятствиями. V сессия Научного совета РАН по МДТТ. 31 мая - 5 июня 2011. Астрахань, Россия. С.57
2. Рабей В.В. Анализ повреждаемости буферов мостовых кранов. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии.2012. №2(18). С.59-66.
3. СТО 24.09-5821-01-93. Краны г/п промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций.
4. ПБ 10-382-00. Правила устройства безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.
5. DIN 15018-1. Cranes. Steel structures. Principles of design and construction.
6. AS 1418.1-02. Cranes (including hoists and winches), Part 1- General Requirements.
7. EN 1991-3:2003. EUROCODE 1 – Actions On Structures. Part 3: Actions Induced By Cranes and Machinery.
8. Панасенко Н.Н., Рабей В.В. Состояние научно-исследовательских работ по динамике процесса наезда г/п кранов на тупиковые упоры и препятствия// Инновационные технологии в машиностроении. Орск. 2012. С. 186-192.
9. Рабей В.В. Математическая модель процесса наезда грузоподъемных кранов на тупиковые упоры. Инновации в науке-инновации в образовании: материалы Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2013». 2013. С. 178-182.
10. Панасенко Н.Н., Рабей В.В., Синельщикова Л.С. Конечно-элементная модель демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов. Вестник АГТУ.- Астрахань: Изд-во АГТУ, 2013/2(56). С.41-49
11. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, California, 2005. - 680 p.
12. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 262 с.
13. Рабей В.В. Исследование напряженно - деформированного состояния металлоконструкций мостовых кранов в процессе их наезда на тупиковые упоры. Известия высших учебных заведений. Северо-

Кавказ. регион. Технич. науки. №4(173). 2013. С.42-46
14. Рабей В.В. Расчет резиновых буферов мостовых кранов грузоподъемностью до 50 т. Безопасность труда в промышленности. 2013. №8. С. 45-50.
15. Рабей В.В. Исследование процессов наезда башенных кранов на тупиковые упоры. Инновации молодежи-потенциал развития нефтегазовой отрасли: Сборник тезисов докладов V научно-технической конференции молодых специалистов и работников/ООО «Газпром добыча Астрахань».- Астрахань, типография «Март», 2013. С. 251-252.
16. Рабей В.В. Анализ проблемы взаимодействия башенных кранов с безударными тупиковыми упорами. Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы V международного научного симпозиума.- Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. С.279-283.

V.V. Rabey

A MATHEMATICAL MODEL OF LOAD-LIFTING CRANES INTERACTION WITH THE END STOPS

Astrakhan State Technical University, Russia

Abstract

This report presents the PhD dissertation results on the problem of load-lifting cranes' interaction with the end stops. Published in scientific literature and Standards mathematical and dynamic models are analyzed of cranes interaction with the end stops process. A mathematical non-linear dynamic model on the FEM basis was developed describing a collision of bridge, tower and portal cranes with the end stops process. The main results are presented of crane dynamic models' interaction with the end stops simulations.

Keywords: load-lifting crane, the end stops, collision, mathematical model, FEM.

REFERENCES

[1] Rabey V.V., Panasenko N.N. Dinamika udarnogo vzaimodeystviya gruzopodyemnykh kranov s prepyatstviyami. V sessiya Nauchnogo soveta RAN po MDTT. 31 maya - 5 iyunya 2011. Astrakhan, Rossiya. P. 57. (rus.)
[2] Rabey V.V. Analiz povrezhdayemosti buferov mostovykh kranov. Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii.2012. №2(18). P. 59-66. (rus.)
[3] STO 24.09-5821-01-93. Krany g/p promyshlennogo naznacheniya. Normy i metody rascheta elementov stalnykh konstruktsiy. (rus.)

[4] PB 10-382-00. Pravila ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii gruzo-podyemnykh kranov. (rus.)
[5] DIN 15018-1. Cranes. Steel structures. Principles of design and construction.
[6] AS 1418.1-02. Cranes (including hoists and winches), Part 1- General Requirements.
[7] EN 1991-3:2003. EUROCODE 1 – Actions On Structures. Part 3: Actions Induced By Cranes and Machinery.
[8] Panasenko N.N., Rabey V.V. Sostoyaniye nauchno-issledovatelskikh rabot po dinamike protsessa nayezda g/p kranov na tupikovyye upory i prepyatstviya// Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii. Orsk. 2012. pp. 186-192. (rus.)
[9] Rabey V.V. Matematicheskaya model protsessa nayezda gruzopodyemnykh kranov na tupikovyye upory. Innovatsii v nauke-innovatsii v obrazovanii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Interstroymekh-2013». 2013. pp. 178-182. (rus.)
[10] Panasenko N.N., Rabey V.V., Sinelshchikova L.S. Konechno-elementnaya model dempfirovaniya kolebaniy nesushchikh metallokonstruktsiy gruzopodyemnykh kranov. Vestnik AGTU.- Astrakhan: Izd-vo AGTU, 2013/2(56). pp.41-49. (rus.)
[11] Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, California, 2005. - 680 p.
[12] Korobeynikov S.N. Nelineynoye deformirovaniye tverdykh tel. – Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN, 2000. – 262 p. (rus.)
[13] Rabey V.V. Issledovaniye napryazhenno - deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy mostovykh kranov v protsesse ikh nayezda na tupikovyye upory. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkaz. region. Tekhnich. nauki. №4(173). 2013. pp.42-46. (rus.)
[14] Rabey V.V. Raschet rezinovykh buferov mostovykh kranov gruzopodyemnostyu do 50 t. Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2013. №8. pp. 45-50. (rus.)
[15] Rabey V.V. Issledovaniye protsessov nayezda bashennykh kranov na tupikovyye upory. Innovatsii molodezhi-potentsial razvitiya neftegazovoy otrasli: Sbornik tezisov dokladov V nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov i rabotnikov/OOO «Gazprom dobycha Astrakhan».- Astrakhan, tipografiya «Mart», 2013. pp. 251-252. (rus.)
[16] Rabey V.V. Analiz problemy vzaimodeystviya bashennykh kranov s bezudarnymi tupikovymi uporami. Udarno-vibratsionnyye sistemy, mashiny i tekhnologii: materialy V mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma.- Orel: Gosuniversitet-UNPK, 2013. pp.279-283. (rus.)

UDK 62-1/-9

M. Rajczyk[1], J. Rajczyk[2], M. Kosiń[3]

ASSESSMENT OF THE MECHANICAL TOOL FOR THE SURFACE TREATMENT OF GRANITE

[1]Marlena Rajczyk, profesor
Częstochowa University of Technology Faculty of Civil Engineering, Poland, Częstochowa
Tel. +48 0343250923, e-mail: mrajczyk@bud.pcz.czest.pl

[2] Jarosław Rajczyk, profesor
Częstochowa University of Technology Faculty of Civil Engineering
Poland, Częstochowa
Tel. +48 0343250927, e-mail: jrajczyk@bud.pcz.czest.pl

[3] Mariusz Kosiń, master of engineering
Częstochowa University of Technology Faculty of Civil Engineering
Poland, Częstochowa
Tel. +48 0343250967, e-mail: mariuszkosa@vp.pl

Abstract

The processing of surface of stone elements, as a result of which they are getting the relevant texture and the surface quality, is one of main requirements in the masonry production. As a result of finishing processing in the process of grinding, the surfaces should have a regular appearance of the surface.They should conform to certain requirements of norms on all exposed surfaces.

Providing the high quality for the surface is depending on effectiveness of the influence of operating units which they comprise i.a. geometrical form of so-called rubbing sections. The article is devoted to the methodology of the evaluation of effectiveness of the processing which among others rubbing geometry tools determines.

Keywords: processing of the stone, abrasive disks, optimization of the shape of tools, surface roughness.

Introduction

Processing surfaces of stone elements to obtain proper texture and quality is one of the main requirements in stonework production. Surfaces should be regular as a result of the finishing stages of the grinding process. All exposed surfaces should meet norm requirements. The norm PN – EN 12670 ‘Natural stone. Terminology’ defines the term ground finish as a flat, uniform finish. Additionally, the norm defines the following types of ground finishes:

- rough ground finish obtained by a coarse grinding agent of grain size F60,
- medium ground finish obtained by a medium grinding agent of grain size F120,
- fine ground finish obtained by a fine grinding agent of grain size F220.

The process can be carried out by using different kinds of grinders: elbowed grinders, double-sided grinders or bridge grinders. The machines operate by using so-called heads with abrasive pads in different geometric shapes that are attached to the milling head, which is a so-called carrier disc.

Ensuring proper quality and smoothness of mineral surfaces is important for:

- obtaining the required physico-mechanical properties, which has a significant influence on the period of use and the costs connected with it,
- keeping the surfaces clean, which reduces the cleaning/maintenance time,
- esthetic and architectural aspects.

Ensuring high quality of surfaces depends on the affective efficiency of working elements, which includes among others the geometric form of the so-called abrasive segments. The article concentrates on the methodology of evaluating the processing efficiency, which is determined among others by the abrasive geometry of the tool.

Characteristics of machines for cutting the stone

In order to include basic constructional and technical parameters in the analysis, we have given examples of grinders that are frequently used in stonemason's workshops [1].

An elbowed grinder is often used in the so-called hand manufacture. The operator of the machine is responsible for guiding the grinding disc and clapming it to the processed material.

The second construction is a **bridge grinder**. The construction allows for automatic guiding and clamping the disc that moves along rails, perpendicularly to its length.

The third type is a **double-sided** grinder. The construction is placed on columns - below there is a conveyor belt that moves the processed slabs, and the milling head moves perpendicularly to the conveyor belt.

General description of grinding tools

The construction of the machine is a starting parameter of kinematic and physical conditions that determine the efficiency of the grinding process itself. The geometry construction and the choice of the abrasive and the binding agent for the grinder are also important [1,2].

Proper selection of the above mentioned elements of the tool influences the efficiency, wear and tear of the tool and evaluating the processing effectiveness

parameter that is defined as the ability to grind evenly along the line of contact between the abrasive's grain and the processed stone material within the set processing time. The parameters that define the effectiveness of the grinding tool are the shape of the grinding surface and the abrasive material, which is determined by grain size, type of binding agent and its hardness. The selection of grinding tools determines the efficiency and the quality of the processed material's surface in order to obtain the required surface quality class [3,6].

The basic materials used to produce grinding tools are loose abrasive materials and binding agents that keep them in the working layer of the tool. Binding agents in the working layer of the tool should wear away at the same rate as abrasives, i.e. abrasive material. The type of material that abrasive grains are composed of influences processing efficiency. Tool hardness depends on the type of the binding agent which is selected depending on the hardness of the processed material. The abrasive material must have proper hardness so that it can cut into the processed surface easily, with slight pressure and the set kinematic parameters. Table 1 presents properties of selected abrasive materials. While selecting the hardness of the grinding wheel segment, it is important to remember the following practical rule:

- grinding hard materials requires grinding wheels with soft binding agents,
- grinding soft materials requires grinding wheels with harder binding agents.

Table 1. Basic properties of selected abrasive materials [1]

Abrasive material	Density kg/cm^3	Hardness On the Mohs scale	Temperature strength ^{o}C
Natural diamond	3520	10	700÷800
Synthetic diamond	3500	10	700÷800
Silicon carbide	3200	9,7	1300÷1400
Fused alumina	3900	9 to 9,5	1700÷1800
Corundum	4020	9	1250÷1300
Quartz	2700	7	1500÷1800

Another feature of processing tools is grain size (or granularity). Abrasive materials can have various granularity: large grains with granularity between F4 and F220 grind unevenly, and smaller grains with granularity between F230 and F320 grind more evenly.

The process of grinding granite surfaces

The technological process of grinding granite can be divided into two stages: initial grinding (leveling) after sawing slabs, and follow-up grinding i.e. polishing. It is recommended to use grinding tools with grain size between F60 and F120 for initial grinding, and between F120 and F320 for follow-up grinding (polishing). The duration of grinding granite depends on the following factors:

- the level of surface evenness before grinding,
- the kind of granite (hardness of the given material),
- the processing efficiency of the milling head.

A team from KTPBiM WB (Department of Building and Material Processes Technologies – Faculty of Building Engineering) has carried out a research concerning the quality evaluation of processing efficiency in local stonemason's workshops in the Częstochowa region, which has demonstrated that a granite slab that has been sawn with a gang saw evenly and without deeper scratches can be ground much faster than a slab with deep scratches. Slabs that have been badly sawn need approximately 30% more time for initial grinding than those sawn evenly. The type of ground granite influences the processing efficiency i.e. small-grained granites are easier to process. Mica- and amphibole-rich granites are much more difficult to process.

Guiding the grinding disc properly (proper path) and its abrasive geometry guarantee an effective grinding process. Therefore guiding the disc in an elbowed grinder should be performed according to the following rules:

- The disc cannot remain in one position; it must be moved
- The disc should be guided on surfaces in the way that is presented in the feed path diagram in fig. 1.

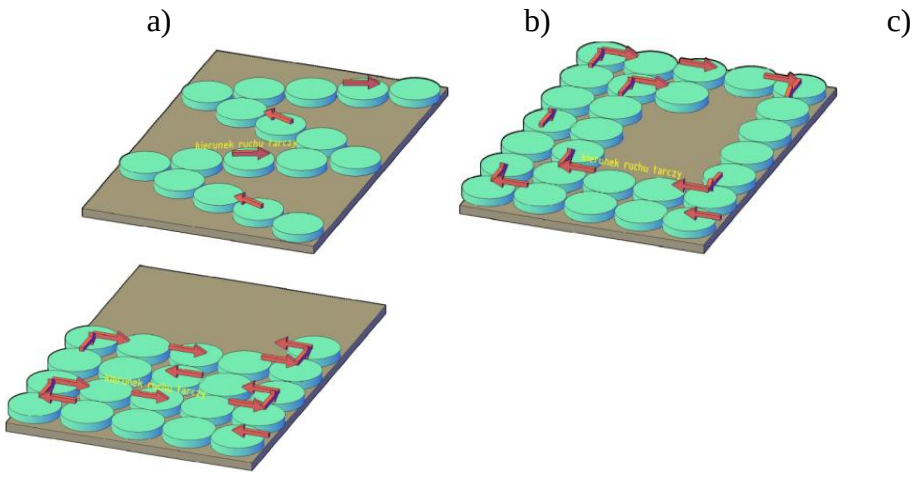


Fig. 1. Recommended directions of movement for the progressive feed path of the working element: a) zigzag b) spiral c) longitudinal [red arrows – direction of disc movement]

The workshops in Biała and Gidle in the Częstochowa district, where the research was carried out, have their own methods that make use of tried-and-tested abrasives with proper grain size respecting technological recommendations.

Respecting the abovementioned rules in processing by means of an elbowed grinder depends mainly on the operator's experience. Whereas when it comes to automatic grinding machines, both the rate of movement and the path

of guiding the disc can be programmed automatically, and efficiency can be brought to high levels. The factors that can cause raising or lowering the processing efficiency of grinding tools have been presented in the so-called factor analysis.

Table 2. The factors that can cause raising or lowering the processing efficiency of grinding tools.

The factors that can cause raising the processing efficiency of grinding tools	The factors that can cause lowering the processing efficiency of grinding tools
•proper selection of the abrasive material for the processed material, •proper selection of the abrasive grain size, •optimal geometry of the abrasive element, •optimization of the kinematic parameters of the grinding disc , •optimal power of the grinder , •partial or full process automatization, •optimal pressure of the working element on the processed material.	•improper selection of the abrasive material for the processed material, •improper selection of the abrasive grain size, •wrong geometry of the abrasive element, •wrong kinematic parameters of the grinding disc, •insufficient power of the grinder, •no process automatization, •improper pressure of the working element on the processed material.

Constructing the geometry of grinding tools

Selecting the geometry of abrasive segments has been pointed out as an important element of processing efficiency, which is confirmed in scientific research presented in the references [4].

What is important for the optimization of stone surface processing by means of disc working tools is defining the level of influence of the geometric form, the size and the arrangement of working elements on the carrier disc surface. The analysis of these interrelationships has been carried out on an influence model by using a computer program developed at the Department of Technology and Organizing Building Processes, Faculty of Building , Częstochowa University of Technology, which models the structure of disc working tools taking into account kinematic parameters and the path of their movement over the processed surface.

The initial working tool in modelling the geometric construction of disc working tools is a full disc. Working elements inscribed within the disc can have various geometric forms, various size and arrangement on the surface of the base disc, and to work at closely selected cinematic parameters.

The kinematic diagram in fig. 2 shows the effect of the disc on the elementary surface of the processed material ΔS. The diagram shows the rule of adding up velocity vectors that refer to the progressive movement of the machine and the velocity resulting from the rotation of the disc which is dependent on the momentary position of a point with reference to the center of the disc. They influence the complex abrasive effect factor that is connected with the properties of the material and its amount, which is dependent on the geometry of the abrasive element.

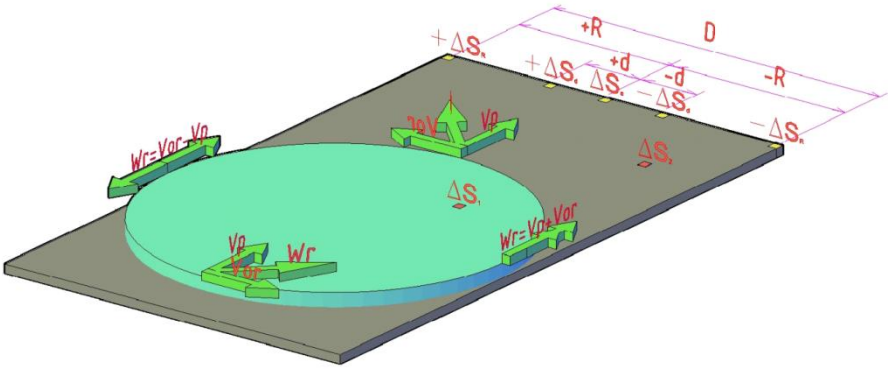


Fig. 2. Kinematic diagrams of the effect of a full grinding disc on the elementary surface of the processed material ΔS_1 that show changes of the resultant W_r at different points on the surface of the disc with a radius R that affect the immobile
elementary fields ΔS_2 [4].

The criterion concerning the affecting efficiency of the working element

The criterion concerning the affecting efficiency of the working element on the processed surface is determined by the length of the line of contact between the working tool's elementary abrasive surface ΔS_1 and the processed surface of the material ΔS_2, and it is generally expressed in the form of a dependent function as grinding geometry efficiency S_g [3 ÷ 5].:

$$S_g = f(V_p, V_{or}, D);$$

where:

S_g – the affecting efficiency of the working element (in the form of a line) on the processed surface [m],
V_p – progressive velocity of the grinder [m/s],
V_{or} – rotation speed of the grinder [rev/s],
D – disc diameter [m].

Selection of the geometry of the working element and an objective function

Working elements of grinding discs for mineral materials can be evaluated according to the following parameters:

- the quality index of the processed surface (coarseness class) referred to as "Sg",
- the labour intensity index
- the processing cost index
- The assumed objective function is minimization of standard deviation variability index concerning geometric efficiency. The function directly affects:

- increasing processing evenness, that is surface quality, evenness of coarseness distribution,
- reducing labour intensity and processing costs.

The standard deviation index is determined by the quotient of standard deviation and the average efficiency S_s of the working tool.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_{gi} - \overline{S_g})^2}}{\overline{S_g}}$$

where:

S_{gi} – the value of working tool's affecting efficiency on the processed surface presented in the form of a line [m],

$\overline{S_g}$- the value of average working tool's affecting efficiency on the processed surface presented in the form of a line [m].

The analysis of efficiency concerning a new form of the working tool's abrasive geometry compared to known solutions of working element construction

The new geometric form of the working tool constitutes an abrasive surface presented in fig. 3 in the form of 3 abrasive segments. In order to streamline the effectiveness of new geometric forms that tools for processing mineral slabs have, we have modeled a new geometry based on calculations of the processing efficiency. The construction has been registered at the Patent Office of the Republic of Poland with the number PL 386479. The purpose of the new solution is shortening the time needed for processing mineral slabs' surfaces, ensuring at the same time an even distribution of coarseness of the ground surface, expressed by the index R_z [mm].

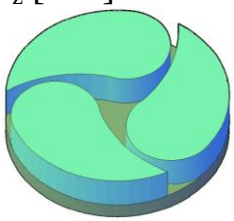


Fig. 3. The construction of a new solution of working elements for processing mineral surfaces registered at the Patent Office of the Republic of Poland with the number PL 386479 [10].

Analysing the efficiency of particular solutions of working elements on the processed surface, we assumed a constant diameter D = 0.5 m, the progressive velocity V_p = 0.4 m/min and the rotation speed of the disc V_{or} = 390 rev/min. We used two variants of the path of movement of the disc center with a set overlap of the passage of the disc in the progressive movement (fig. 4).

Variant I Variant II

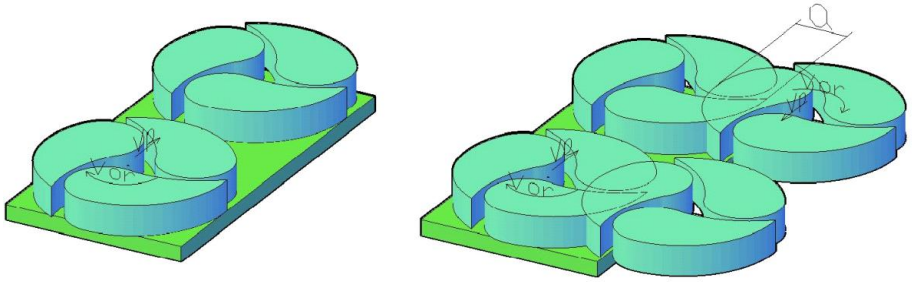


Fig. 4. The variants of paths of disc working tools assumed in the analysis; V_p - progressive velocity (m/s), V_{or} – rotation speed (rev/min), a – size of disc passage overlap

Table 3 compares indices of affecting efficiency of the processed surface expressed by average efficiency ; for the new construction - a new working tool with well-known and commonly used material solutions for abrasive elements - it is 45% higher than the similar construction of the so-called "kidney" disc. For the path of movement of the disc in variant I, the values of standard and relative deviation are within σ_1= 0,2681÷0,3637 and ε_1 = 0,1762÷0,3129. According to the standard deviation index minimum (σ_1= 0,2681) for variant I, the best results were achieved by the new working tool form. The difference is as much is significant when compared to the worst result (σ_1= 0,4525) according to the standard deviation index minimum. Also in variant II - for optimized disc passage overlaps – the new working tool form achieved the best results.

For slight overlaps of the working tool's passages together with minimal standard deviation index, the new form achieves satisfactory results. The largest passage overlap is 6 cm and the value of the standard deviation index is σ_1= 0,1364. With the new geometric form, the overlap is 3 cm and the standard deviation index is σ_1= 0,1131. The results of analytic evaluation of processing efficiency defined by the standard deviation index σ and relative deviation ε are presented in table 3 and in the graph in fig. 5.

Graphs of the efficiency distribution of affecting the processed strip L = D [m] by the new working tool with selected solutions of disc abrasive (grinding) elements. The data in table 3 and fig. 5 demonstrate that according to the standard deviation index minimum for a single pass of the disc on the processed surface the best option is the new abrasive geometry form of the working tool protected by the patent law at the Patent Office of the Republic of Poland with the number PL 386479.

Table 3. Comparing indices of efficiency of affecting the processed surface by the new solution to the working element with selected, well-known geometric structures of disc working tools, taking into account variants of disc movement paths

Disc surface structure	Variants of movement paths of the abrasive head with covers	Average efficiency Sg	Efficiency indices	
			Standard deviation index σ	Relative deviation index ε
1	2	3	4	5
	Variant I	4,2780	0,2681	0,1762
	Variant II a=3 cm,	4,6432	0,1131	0,0969
	Variant I	1,4832	0,3247	1,5492
	Variant II a=5 cm	1,6887	0,1487	0,5524
	Variant I	2,2554	0,3637	0,2666
	Variant II a=5 cm	2,5725	0,1811	0,1502
	Variant I	2,5708	0,2989	0,1939
	Variant II a=4cm	2,8445	0,1299	0,0991

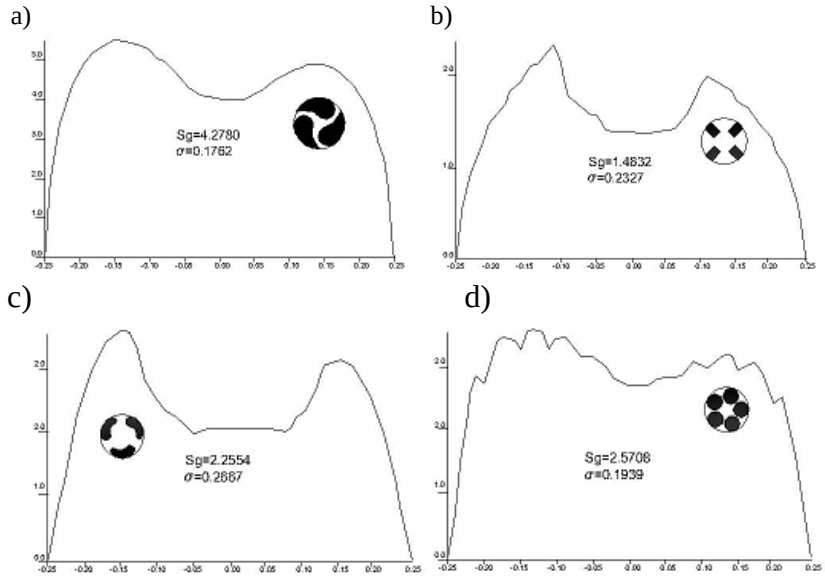


Fig. 5. Graphs of the efficiency of single-pass disc grinding tools on the processed surface a) the new construction of the working element, b), c), d) well-known solutions of working elements' construction

Both smaller values of passage overlap and higher affecting efficiency encourage the application of the new disc working tool construction for all stages of the grinding process, from rough to microprofile.

Summary

Because of various physical properties of stone materials, the selection of the proper grinding tool – the binding agent, the abrasive and the shape – for the grinding process is a difficult issue and it requires experience and a scientific justification.

The analysis of the new solution of the disc processing element construction for grinding registered at the Patent Office of the Republic of

Poland with the number PL 386479 enables increased efficiency, higher quality of the processed surface and shortening the processing time thus reducing processing costs. Due to the selection of optimal geometric and kinematic parameters of the working elements it is possible to obtain a significant improvement in the quality of the processed surfaces. The working elements of the new construction allow to obtain a higher evenness of the ground or polished surface, reduce the power necessary to run the disc thus lowering electricity consumption and increasing working efficiency.

The calculations of the abrasive processing efficiency of the new geometry show that, with the set parameters D = 50 cm, V_p = 0,4 m/min, V_{or} = 390 rev/min, it can obtain the average efficiency of the abrasive geometry without overlap S_g = 4,27 m, and with overlap S_g = 4,64 m, which increases abrasive grinding efficiency by 55.4% in comparison to commonly used tools, the so-called "kidneys".

REFERENCES

[1] Rajczyk J, Rajczyk M.: Technologia robót kamieniarskich. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.

[2] W. Chrząszczewski: Obróbka mechaniczna i obrabiarki do kamienia. „h.g. Braune", Jawor 2004.

[3] Rajczyk J., Kosiń M., Methodology of Analyzing a New Geometry Design of a Friction Plate Effect on the Engineered Surfaces, Proceedings of the 3rd International Conference on Contemporary Problems in Architecture and Construction. November 20 - 24, 2011. Beijing, China.

[4] Rajczyk J., Podstawy naukowe doboru struktury i kinematyki tarczowych narzędzi roboczych maszyn do obróbki powierzchni betonu, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2007.

[5] Rajczyk, Z., Al-Mashadani, M. Systematic motion path of manual floats for concrete surface, 3rd International Conference on Contemporary Problems in Architecture and Construction;Beijing;20 November 2011through24 November 2011

[6] Rajczyk J., Kosiń M.: Maszyny do obróbki powierzchni przez szlifowanie. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2007.

[7] Rajczyk J., Kosiń M.: Pomiar parametrów szorstkości nawierzchni betonowej. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2007.

[8] Rajczyk J., Rajczyk Z., Kosiń M.: Dobór parametrów w technologii szlifowania powierzchni płyty betonowej. w: Budownictwo o

zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej 2007.
[9] Rajczyk J., Berezak S.R., Bolotnyj A.V.: Ocena tarczowego elementu roboczego maszyny do zacierania powierzchni betonowych z dodatkowym ruchem obrotowym. Zesz.Nauk.PCzęst. nr 152 Bud.z.8. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
[10] Rajczyk J., Rajczyk Z., Kosiń M., Nowe narzędzie robocze do obróbki powierzchni mineralnych, Biuletyn patentowy, Patent RP PL 386479.

УДК625.658

А.В. Стукач

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ОЧИСТКИ ТЕРРИТОРИЙ ОТ СНЕГА

Стукач Александр Васильевич, *к.т.н., доцент*
Санкт – Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Телефон:. 89045529715, E-mail: alstnevaspb@mail.ru

Аннотация

В работе говорится о технологии зимнего содержания аэродромов, кратко описаны современные средства механизации для этих целей. Проведен анализ состояния дел, связанных с уборкой внутридворовых территорий от снега. Предложен алгоритм выполнения проектных работ с использованием среды MathCad и Solidworks по переоборудованию фронтальных погрузчиков бульдозерным отвалом для очистки территорий от снега.

Ключевые слова: аэропорт; снежное и гололедное образование; средства механизации, снег, механизированная уборка, погрузчик, модель, отвал.

Строительные и дорожные машины отличаются от других видов машин конструктивным исполнением, значительным запасом мощности двигателей, надежностью работы гидросистем, и систем управления. Это позволяет их использовать не только по прямому назначению.

В соответствии с, нормативными документами гражданской авиации, с целью обеспечения эксплуатационной готовности аэродромов с твердыми покрытиями в зимний период необходимо в первую очередь производить два вида работ: очистку аэродрома от снега и удаление или предупреждение гололеда. Для борьбы с гололедом известна универсальная машина - Джетбрум производства швейцарской фирмы Boschung – очистительная и снегоуборочная машина для круглогодичной многоцелевой эксплуатации аэродромных покрытий. Машина снабжена плугом, щеткой, воздуходуйно-всасывающим аппаратом. На территории России бывших союзных республик широкое распространение получила высокопроизводительная универсальная машина ДЭ-235 (концерн «Амкодор-НТЦ», Республика Беларусь) для очистки аэродромных покрытий от снега, пыли и мусора, удаления гололеда, а также просушки

покрытий – не имеет аналогов в мировой практике. Машина снабжена снегоочистительным органом, щеточным ротором, генератором воздушного потока и съемным рабочим органом: подкатной тележкой с авиационным реактивным двигателем. Отличительной особенностью названных машин является высокая стоимость и не всегда оправданная сложность конструкции, требующая значительных эксплуатационных затрат.

Для аэропорта немаловажны экономические факторы, в частности, такие как стоимость очистки и ее последствия для конструктивных слоев покрытия, вызывающие необходимость его ремонта. Для эксплуатанта воздушного судна - влияние качества аэродромного покрытия не только на управляемость воздушного судна на этапах руления, взлета и посадки, но и на износостойкость авиационных шин, на возможность попадания любых «незакрепленных» частиц в двигатель, на прочность конструктивных элементов и т.д.

Менее дорогими и отвечающим требованиям предъявляемым к технике для аэродромов являются плужно-щеточные снегоочистители, применяемые, главным образом, при снегоочистке элементов аэродромов в случае, если необходимо полное отделение снега от поверхности покрытия.

Машины этого типа рассчитаны на систематическую уборку с небольшим интервалом перед очередной очисткой. В связи с этим снегоочиститель каждый раз убирает сравнительно небольшой слой снега. Во время работы основная масса снега сдвигается в сторону отвалом, а оставшийся после работы отвала тонкий слой уплотненного снега сметается щеткой. Как правило, плужно-щеточное оборудование устанавливается на поливомоечных машинах (КО-002, АКПМ-3У производства предприятия Коммаш, Российская Федерация), пескоразбрасывателях (КО-105), распределителях химреагентов (машина комбинированная уборочная 58355 2). Возможен также вариант установки снегоочистительного оборудования плужно-щеточного типа на тракторном шасси (уборочная машина УМТ-80/82 на базе трактора МТЗ-80/82 производства завода «Минскагропроммаш» и концерна «Амкодор», Республика Беларусь; машина тротуароуборочная универсальная на базе Т-30.69 Михневского ремонтно-механического завода, Российская Федерация). Помимо перечисленных средств очистки от свежего снега используются навесные щетки роторного типа, представленные в работах[1, 3,4,5,6,7].

Учитывая экономическую составляющую очистки аэродрома от свежевыпавшего снега, целесообразна модернизация, разрешенных для эксплуатации в таких условиях машин, с целью повышения производительности. Лучше всего этим условиям отвечает автогрейдер ДЗ-96Б (ДЗ-985-1) класса 250 мощностью 202,5 кВт с механической

трансмиссией. Он используется на землеройно-профилировочных работах с грунтами I - IV категорий в аэродромном строительстве и очистке покрытий от снега. Скорость движения 3,5...47 км/ч; грейдерный отвал: длина 4270 мм, высота 740 мм. Впереди на него может быть установлен снегоочистительный отвал, показанный на рис. 1.

Он предназначен для очистки дорог и территорий от снежных заносов и имеет следующие технические характеристики: высота отвала - 1630 мм; длина отвала – 3228мм; масса - 1215 кг

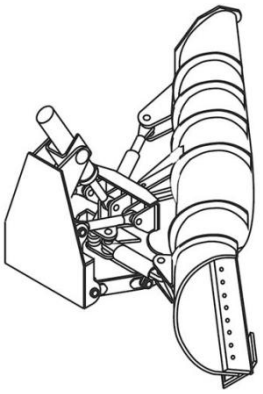


Рис. 1. Конструкция снегоочистительного отвала.

Количество автогрейдеров определяуеся из условия их использования для очистки от снега обочин ИВПП и РД, а также зон КРМ и ГРМ но формуле (1)

$$N_{АГ} = \frac{K_{kq}\left(2 \cdot L_{ИВВП} \cdot B_O + S_{КРМ} + S_{ГРМ}\right)}{V \cdot b \cdot T \cdot K_И \cdot K_{ТГ}} \quad (1)$$

где $L_{ИВПП}$ - длина посадочная полоса с искусственным покрытием (ИВПП), м; B_O = 10 - ширина очистки обочин ИВПП, м; $S_{ГРМ}$ - площадь очистки от снега зон глиссадных радиомаяков, м$^{2;}$ $S_{КРМ}$ - площадь очистки от снега зон курсового радиомаяка, м^2; b - ширина захвата отвала автогрейдера, м; V - рабочая скорость автогрейдера, м/ч; T - заданный срок выполнения работы, ч; K_{QK} - поправочный коэффициент на толщину и плотность снега; $K_{и}$ = 0,95 - коэффициент использования во времени; $K_{ТГ}$ = 0,85 - коэффициент технической готовности.

Анализ формулы (1) показывает, что количество необходимых агрегатов зависит от величины b – ширины захвата автогрейдера. Следовательно, при определенном сроке выполнения работы, с увеличением величины отвала автогрейдера будет сокращаться потребность в количестве машин.

В методических рекомендациях по определению количества средств механизации для содержания аэродромов приводится формула для

определения рабочей скорости.

Рабочая скорость автогрейдера определяется из выражения:

$$V = \frac{13{,}56}{1{,}99h_{CH} + 1} \text{ км/ч.} \qquad (2)$$

где h_{CH} - начальная толщина снега, м;

Эмпирические коэффициенты в числите и знаменателе получены при плотности свежего снежного покрова 0,1 Н/м^2. При этом скорость автогрейдера зависит только от толщины снежного покрова.

Учитывая особенности технологии обслуживания взлетно-посадочной полосы аэродромов, заключающиеся в том, что не допускают формирование высокого снежного покрова, наибольший эффект дает модернизации основного грейдерного отвала.

Суть модернизации заключается в создании раздвижного отвала, состоящего из основного, на котором монтируются сдвижные составные части [2]. В систему управления автогрейдера вносятся дополнительно два гидроцилиндра и распределительных устройства. На рис. 2. показано расположение гидроцилиндров и основных его частей. В компактном виде, когда сдвижные части располагаются ниже основного отвала и могут выполнять в полной мере его функции. На рис. 3 приведена схема отвала в поперечном сечении. При перемещении сдвижных частей происходит их перемещение в вертикальной плоскости. В крайних положениях сдвижные части вспомогательного отвала переходят в плоскость основного. При этом резиновые ножи находятся на одной линии.

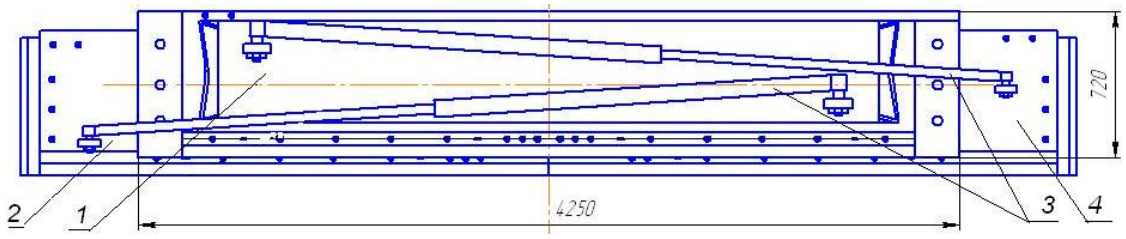


Рис. 2. Модернизированный отвал овал автогрейдера.
1 – основной отвал автогрейдера; 2 – левая часть сдвижного вспомогательного отвала; 3 – гидроцилиндры; 4 – правая часть сдвижного вспомогательного отвала.

Качество очистки покрытий от снега обеспечивается в том случае, если отвал, сдвигая основную массу снега, оставляет после себя слой высотой 10 - 15 мм, легко сметающийся щеткой. Поэтому необходимо систематически контролировать состояние резиновых ножей отвала. Они должны иметь одинаковую высоту и при опущенном отвале плотно по всей ширине захвата прилегать к поверхности покрытия. Высота ножей должна быть в пределах 25-150 мм, с равномерным износом. Отвал в

раздвинутом положении должен легко поворачиваться на поворотной раме вправо и влево и надежно фиксироваться.

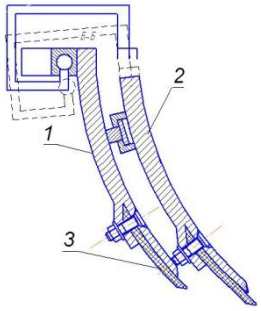


Рис. 3. Схема расположения основного и вспомогательных – сдвижных отвалов в компактном положении. 1 – основной отвал; 2 - сдвижная часть отвала; 3 – резиновый нож

Не меньшую проблему создает снег в городе. Важно понимать, что на протяжении каждой зимы уборка и вывоз снега в Санкт-Петербурге в зимний период является одним из самых актуальных вопросов. Снег с улиц нужно убирать, причем не тогда, когда он слежится и превратиться в массу, схожую по твердости с бетоном, а сразу же после осадков или во время их, если снег идет, не прекращаясь, сутки и более. Именно это и является одной из основных проблем, наверное, всех без исключения российских населенных пунктов. Как всегда, снегоуборочной техники и грузовиков для вывоза снега не хватает, и очистить весь район и город в целом быстро не получается. Вопреки существующему мнению, что снег - это легкая субстанция, такое суждение являются несостоятельным. На его уборку, вывоз с городских улиц и последующую утилизацию ежегодно в России тратятся миллионы бюджетных рублей.

Снежные заносы для Санкт-Петербурга имеют ещё одну негативную сторону. Кроме транспортного коллапса, обильные снегопады наносят непоправимый вред многочисленным памятникам архитектуры. От не вовремя убранного снега рушатся старые дома и набережные ограды. Большие снежные сугробы скрывают, также, груды мусора, которые по весне становятся для города настоящей катастрофой.

В течение года, в Санкт-Петербурге, среднее количество дней с осадками - около 200 (от 13 дней в апреле до 22 дней в декабре), в среднем число часов с осадками за год – 1300 [8]. Снежный покров в городе на Неве сохраняется в среднем 4,3 месяца. [9]

Сейчас много сил и средств выделяется на выполнение мер по грамотной организации работ, направленных на уборку снега и его утилизацию, очистку от наледи. Следует отметить, что выбор технических средств по уборке снега, утилизации снега и пр. достаточно большой. Наиболее применение нашли машины, показанные на рис. 4. На

приведенном рисунке показано, что качестве основной техники используются главным образом, фронтальные погрузчики. Они хороши и надежны при работе на грунтах и в тоже время мало приспособлены для уборки снега.

Особенность физических свойств снега в том, что его можно уплотнять, добиваясь уменьшения объема. Так объем свежевыпавшего снега может быть уменьшен в 12 – 15 раз. При сгребании снега бульдозерным поворотным отвалом за счет его вертикального и продольного перемещения вдоль отвала, происходит его уплотнение в 3 – 5 раз. Следовательно, для его транспортировки потребуется значительно меньше машин.

а) б) в)

Рис. 4. Машины для уборки снега
а) фронтальный погрузчик «CATERPILLAR»; б) экскаватор – погрузчик «TEREX»; в) погрузчик – экскаватор Компания JCB.

Переоборудование фронтальных погрузчиков бульдозерными отвалами требует дополнительных конструкторских и расчетных работ. Поэтому в среде MathCad и Solidworks была проделана работа по расчету элементов бульдозерного отвала. В целом алгоритм выполнения работ может быть следующим [10].

На первом этапе определяются силы, действующие на отвал. Сила сопротивления резанию находится из выражения:

$$W_P = kL_1 g \quad (3)$$

где: k – удельное сопротивление лобовому резанию; h_1 – глубина резания; L – длина отвала.

Сила сопротивления перемещению призмы снега определяется из формулы 4:

$$W_{ПР} = V_{ПР}\gamma_C \mu_1 g \quad (4)$$

где: $V_{ПР}$ - объем призмы снега; γ_C - удельный вес снега; μ_1- коэффициент трения снега о снег

Сила сопротивления снега по отвалу может быть найдена из выражения (5):

$$W_П = V_{ПР}\gamma_C \cos^2(\mu_2 \delta) g \quad (5)$$

где: μ_2 - коэффициент трения снега о сталь; δ - угол резания.

Сила сопротивление трению ножа отвала рассчитывается по формуле:

$$W_{TP} = \mu_2 \left(k_t \cdot T_n \cdot tg\,\vartheta + G_1 \right) g \qquad (6)$$

где: k_t- коэффициент использования тягового усилия; T_n- номинальная сила тяги; ϑ - угол наклона результирующей сил сопротивления на отвале; G_1 - собственный вес рабочего оборудования.

На втором этапе расчет осуществляется в Solidworks с помощью функции SimaltionXpress. Создав модель, по заданным размерам, и выбрав материал, закрепляем отвал, как показано на рис.5. Используя значения сил, полученных на первом этапе проектирования, нагружаем модель, как представлено на рис.6.

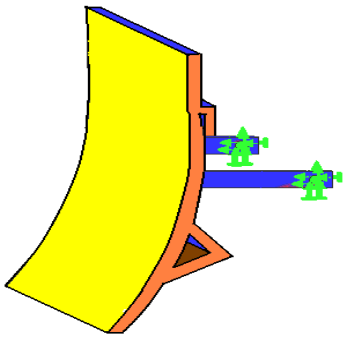


Рис. 5. Модель отвала.

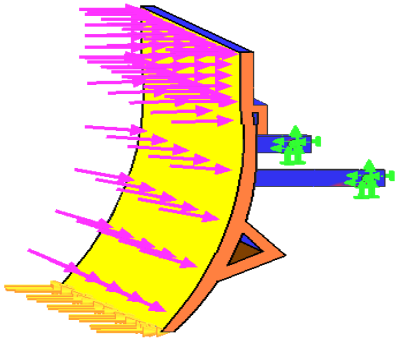


Рис. 6. Схема нагружения отвала.

Результаты расчета можно представить в виде эпюры перемещений или эпюры эквивалентных напряжений показанных на рис. 7, 8. Для наглядности деформация увеличена.

По результатам выполненных вычислений можно построить зависимость величины сил, действующих на отвал, от длины отвала. Результаты представлены в виде графиков на рис.9.

Используя предложенный алгоритм выполнения технического решения, легко создать, практически к любому фронтальному погрузчику, сменное рабочее оборудование в виде бульдозерного отвала для уборки снега в придомовых территориях.

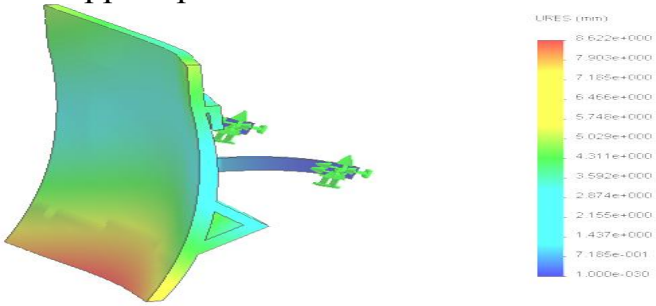


Рис. 7. Эпюра перемещений.

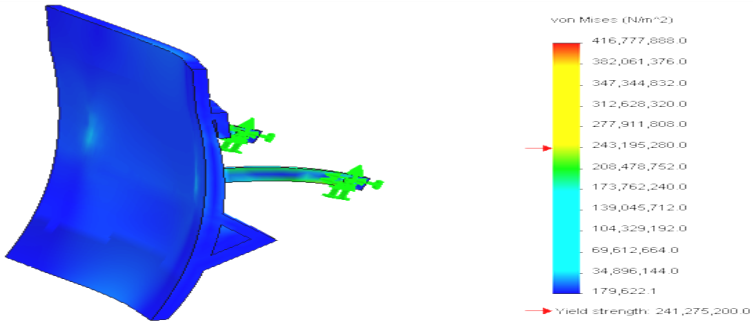


Рис. 8. Эпюра эквивалентных напряжений

Снег представляет собой существенную проблему на множестве территорий: он загромождает проезды, мешает нормальному движению пешеходов, нарушает работу инфраструктуры и ухудшает эстетическое восприятие объектов. Кроме того, при таянии снег образует достаточно много воды, которая способна затопить различные помещения или же вызвать образование глубокой грязи на территории.

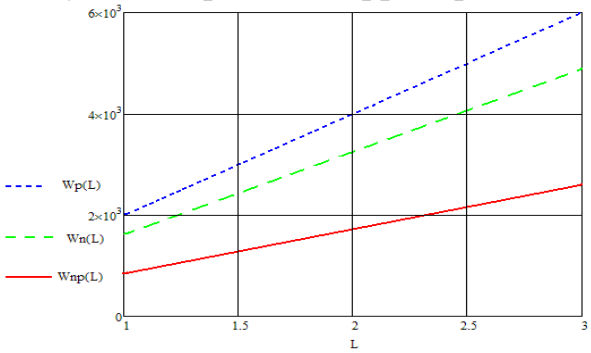


Рис. 9.

$W_{пр}$- сила сопротивления перемещению призмы снега; W_p - сила сопротивления резанию; $W_п$ - сила сопротивления перемещению по отвалу

Снег относится к разряду отходов 4-го класса опасности. Поэтому, решение проблем, связанных с его утилизацией, является серьезным звеном в цепочке мероприятий по очистке внутриквартальных территорий и улиц. Вывозить снег за пределы городской черты и сваливать его в реку или ближайший овраг запрещено экологами. Вследствие этого его либо вывозят транспортом на специальные полигоны, либо утилизируют снежную массу при помощи снегоплавильных станций. Они могут быть стационарными и передвижными. Но какими бы ни были полигоны для сбора снега, все они должны соответствовать нормативным документам, регулирующим работу гидротехнических сооружений (ГТС), к которым и относятся подобные площадки [11,12,13].

Решение проблемы снега – это решение задачи комфортного проживания людей в зимний период, снижения травматизма от падений во время гололеда, во многом решение парковки транспорта и в целом улучшения социальных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишков А.Ф., Запорожец В.В., Билякович О.Н. Аэропорт. Теория и практика зимнего содержания аэродромов. – К.: Друкарня Діаринт, 2006.- 194 с.
2. Стукач А.В., Соловьев А.А. Модернизация автогрейдера для зимнего содержания аэродромов //Научно-техническое издание НИИТТС, СПбГУСЭ «Технико технологические проблемы сервиса». №3(21). 2012. –с. 30 – 33
3. Белинский И.А., Самородов Ю.А., Соколов В.С. Зимнее содержание аэродромов. - М.: Транспорт, 1992. - 193 с.
4. Карабан Г.Л., Баловнев В. И. Машины для содержания и ремонта автомобильных дорог и аэродромов. - М.: Машиностроение, 1975. - 368 с.
5. Горецкий Л. И. Эксплуатация аэродромов: Учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Транспорт, 1986. - 280 с.
6. Наставление по аэродромной службе аэропортов гражданской авиации СССР (НАС ГА - 87). - М.: Воздушный транспорт, 1997, - 289 с.
7. Авиационная наземная техника: Справочник. Под ред. В. Е. Канарчука. - М.: Транспорт, 1999. - 278с.
8. Даринский А. В. География Ленинграда. - Л.: Лениздат, 1992. - с. 21 - 29
9. Википедия, URL: http://ru.wikipedia.org/wiki
10. Стукач А.В. Техническое решение переоборудования фронтальных погрузчиков для уборки снега придомовых территорий// Научно-техническое издание НИИТТС, СПбГУСЭ «Технико технологические проблемы сервиса». №3(21). 2012. –с. 8 – 11.
11. СНиП 2.06.08-87 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений»;
12. СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»;
13. СНиП 2.06.01-86 «Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования».

A.V. Stukach

CONSTRUCTION OF MACHINES FOR CLEANING OF TERRITORIES FROM SNOW

St. Petersburg state Polytechnic University, Russia

Abstract

The work deals with technology of the winter maintenance of airdromes, modern means of mechanization used for this purpose are described in short. In

work the analysis of the cases connected with cleaning of internal yards from the snow. The algorithm of the project works with the use of the environment of MathCad, Solidworks for the conversion of front loaders dozer blade for cleaning snow from the.

Key words: airport, aircrafts, snow and ice, means of mechanization, snow, mechanized cleaning of the loader, model, a dump.

REFERENCES

[1] Shishkov A.F., Zaporozhets V.V, Biljakovich O.N. Airport. Teoriya i praktika zimnego soderzhaniya aerodromov. K.: Drukarya Diarint, 2006.- 194 p. (rus.)
[2] Stukach A.V., Soloviev A.A, Moderniziya avtogrtjdera dlya zimnego soderzhaniya aerodromjv //Nauchno-technicheskoe izdanie NIITS, SPbGUSE «Technico – technologicheskie problemy servisa». №3(21). 2012. -p. 30 – 33. (rus.)
[3] Belinskiy I.A., Samorodov Yu.A,. Sokolov V.S. Zimnee soderzhanie aerodromov. - M: Transport, 1992. - 193 p. (rus.)
[4] Karaban G.L., Balovnev V.I. Machiny dlya soderzhaniya I remonta avtomobilnyh dorog i atrodromov: - M: Machinostroenie, 1975. – 368 p. (rus.)
[5] Goretskij L.I. Ekspluatatsij aerodromov. Uchebnik dlya vuzov. - 2-e izd., pererab. i dop: Transport, 1986. - 280 p. (rus.)
[6] Nastavlenie po aerodromnoj sluzhbe Airportov grazhdanskoj aviatsii SSSR (NAS GA – 87). –M.: Vozdushnyj transport, 1997, -289 p. (rus.)
[7] Aviatsionnaya nazemnaya tehnika : Spravochnik. Pod red/ V.E.Kararchuka. – M.: Transport, 1999. -279 p. (rus.)
[8] Darinskij A. V. Geografiya Leningrada. L.: Lenizdat, 1992. – p.21 - 29 (rus.)
[9] Wikipedia, URL: http://ru.wikipedia.org/wiki
[10] Stukach A.V. Tehnicheskoe reshenie pereoborudovaniya frontalnyh pogruzchkov dlya uborki snega pridomovyh territorij// Nauchno-technicheskoe izdanie NIITS, SPbGUSE «Technico – technologicheskie problemy servisa». №3(21). 2012. -p. 8 – 11. (rus.)
[11] SNiP 2.06.08-87 Betonnye izhelezobetonnye konstruktsii gidrotehnicheskih sooruzhenij. (rus.)
[12] SNiP 2.02.02-85 «Osnovaniya gidrotehnicheskih sooruzhenij». (rus.)
[13] SNiP 6.2.01-86 «Gidrotehnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya proektirovaniya». (rus.)

УДК 004.94

В.А. Чеканин

БИБЛИОТЕКА КЛАССОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПАКОВКИ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Владислав Александрович Чеканин, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)973-2038, E-mail: vladchekanin@rambler.ru

Аннотация

В работе рассматривается информационная модель в виде библиотеки классов, обеспечивающей унифицированный подход к решению задач оптимизации распределения ресурсов с использованием эволюционных алгоритмов. Описываемая унифицированная библиотека классов применима при разработке прикладного программного обеспечения для решения задач рационального раскроя, календарного планирования, контейнерной упаковки, компоновки объектов, распределения трафика и мощностей, а также других практических оптимизационных задач.

Ключевые слова: задача упаковки, распределение ресурсов, оптимизация, библиотека классов, информационная модель

Введение

Термин «задача упаковки» в настоящее время объединяет большое число различных оптимизационных задач оптимального распределения ресурсов. Наиболее часто эта задача встречается при решении задач раскроя, календарного планирования, контейнерной упаковки, компоновки объектов, а также других практических задач [3, 5-6, 10, 16].

Проблема решения задачи упаковки заключаются в поиске наиболее оптимального решения задачи размещения одной группы малых объектов внутри объектов другой группы, которые называются контейнерами. Сложность решения любой задачи упаковки обусловлена ее принадлежностью к классу неполиномиально трудных задач (NP-полных) [14]. Одним из наиболее эффективных существующих методов решения этого класса задач является применение эвристических и эволюционных алгоритмов многокритериальной оптимизации, среди которых наиболее действенными являются генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии и алгоритм отжига, а также их комбинированные варианты [1, 7-8, 11, 15].

Наличие общих черт, присущих различным задачам упаковки, а также возможность решения этих задач с использованием родственных эвристических алгоритмов делает возможность унифицировать процесс решения задач упаковки. В настоящей статье описывается унифицированная библиотека классов задач упаковки, применимая при разработке прикладного программного обеспечения для оптимального распределения ресурсов с использованием эвристических алгоритмов.

Библиотека классов задач упаковки

При разработке унифицированной библиотеки классов задач упаковки было выдвинуто требование её универсальности, т.е. разработанная библиотека классов должна применяться для решения следующих задач:

- задач упаковки различной размерности (одномерной, двухмерной, трёхмерной);
- задач упаковки различных видов объектов (линейных, ортогональных, цилиндров, шаров и др.);
- задач упаковки, решаемых с использованием различных эвристических алгоритмов, в том числе и эволюционных.

Унификация библиотеки классов задач упаковки достигается благодаря инвариантности эвристических алгоритмов получения конечного субоптимального решения относительно видов размещаемых объектов, а также благодаря возможности переопределения алгоритма размещения объектов в контейнерах при использовании узловой модели, а также любой производной от нее модели представления объектов в контейнерах [4, 9, 12-13].

При создании универсальной программной библиотеки был применен объектно-ориентированный подход. При выборе метода программной реализации алгоритмов решения задач упаковки были учтены следующие преимущества объектно-ориентированного программирования [2]:

- наследование объектов;
- перегрузка методов;
- инкапсуляция методов и данных;
- скрытие информации;
- моделирование связей между объектами;
- моделирование в условиях, предельно близких к реальности;
- естественность и наглядность процесса программирования;
- легкость сопровождения и дальнейшей модификации моделирующей программы.

Основу библиотеки классов, разработанной на объектно-ориентированном языке программирования C++, составляют абстрактный класс объектов и абстрактный класс алгоритмов решения задачи.

Для описания объектов служит абстрактный класс объектов **CObj**. От него наследуют класс ортогональных объектов **CBar**, класс цилиндров **CCylinder** и класс шаров **CSphere**.

Абстрактный класс объектов **CObj** содержит виртуальные функции:

- функция получения габаритов объекта Shape();
- функция определения возможности размещения объекта в контейнере IsEnabledDock();
- функция изменения набора узлов в контейнере SetFreePoints().

Использование абстрактного класса объектов позволяет расширять возможности библиотеки классов задач упаковки на новые виды размещаемых объектов. Класс объектов содержит информацию о геометрических и физических параметрах размещаемых объектах.

Для описания алгоритмов решения задачи служит абстрактный класс алгоритмов **CAlgPack**. Абстрактный класс алгоритмов решения **CAlgPack** содержит функцию создания начальной популяции решений InitialPopulation(), а также виртуальную функцию размещения объектов PlaceObjects(). От абстрактного класса алгоритмов решения наследуют класс генетического алгоритма **CGenAlg**, класс алгоритма отжига **CAnneal**. Класс генетического алгоритма содержит вероятности выполнения генетических операторов кроссинговера pCross, мутации pMut и инверсии pInv. Класс алгоритма отжига содержит начальную температуру системы initialT, конечную температуру finalT и степень охлаждения decrementT.

Абстрактный класс алгоритмов решения **CAlgPack** содержит размер популяции sizePop, текущее лучшее найденное решение bestGene и популяцию в виде массива указателей на класс решений **CChromosome.**

Использование абстрактного класса алгоритмов решения задачи позволяет добавлять в библиотеку классов новые алгоритмы, на основе которых возможно получение субоптимальных решений задачи упаковки.

Класс контейнеров **CContainer** содержит метод определения свободного объема контейнера CFn(), указатель на класс набора узлов контейнера **CFreePoints**.

Класс задачи **COrder** управляет всеми действиями, связанными с решением задачи упаковки. Класс задачи содержит массив ссылок на класс контейнеров **CContainer**, массив ссылок на класс **CObj** и массив ссылок на класс **CAlgPack**. Класс задачи содержит информацию о типе решаемой задачи упаковки, параметрах задачи, об алгоритме решения задачи, а также информацию об ограничениях, накладываемых на размещаемые объекты.

Взаимодействие всех классов отражает приведенная на рис. 1 диаграмма UML.

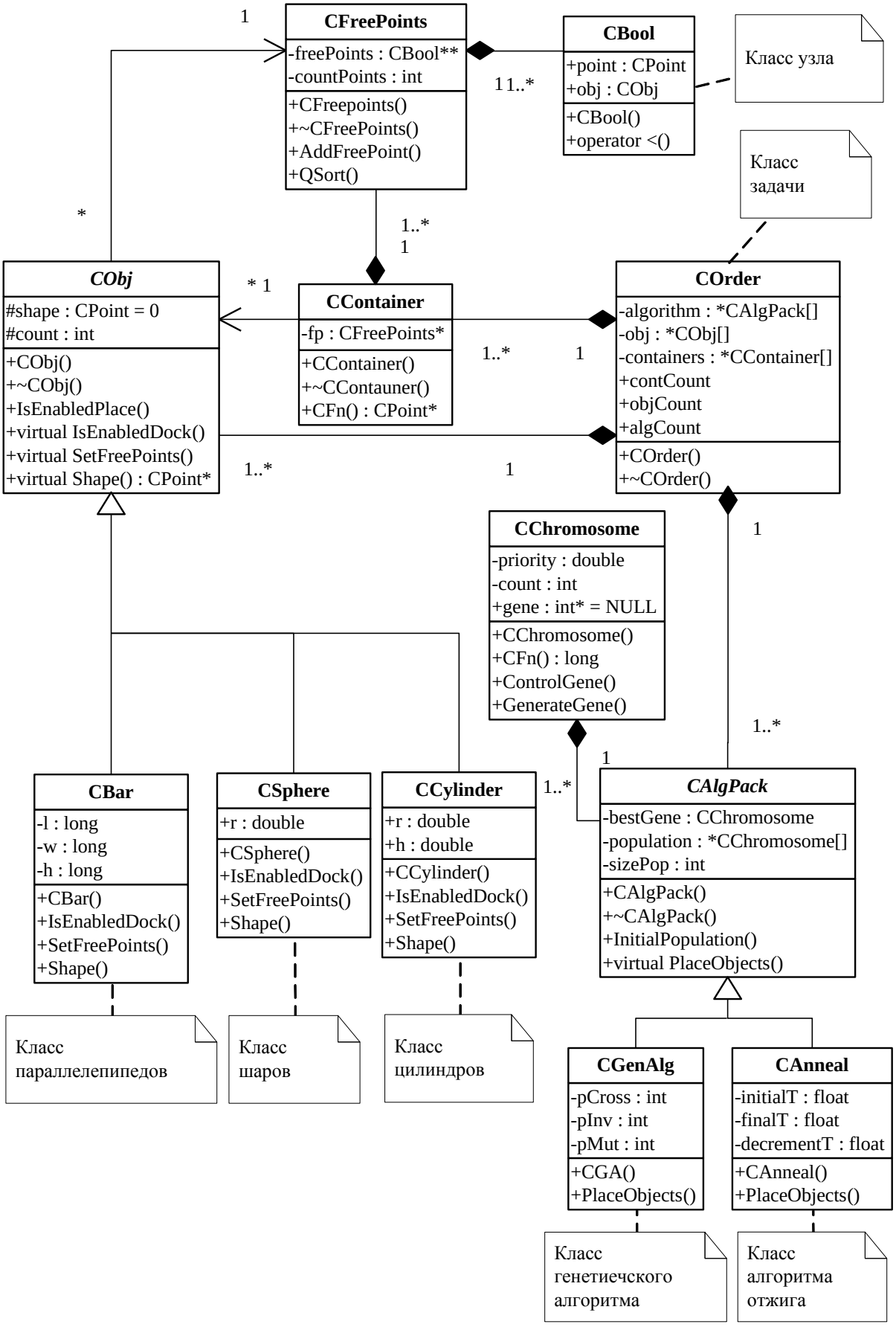


Рис. 1. Диаграмма UML разработанной библиотеки классов задач упаковки

Заключение

Унифицированный подход к решению различных задач упаковки на основе эволюционных алгоритмов дает возможность решения широкого класса задач упаковки с использованием различных эволюционных алгоритмов.

Разработанная библиотека классов задач упаковки может быть использована при разработке прикладного программного обеспечения для решения широкого класса оптимизационных задач распределения ресурсов в системах телекоммуникаций, агротехнических и экологических системах, при раскрое материалов на станках с числовым программным управлением, в системах хранения и перевозки грузов, при решении задач календарного планирования, при разработке технологической компоновки для ограниченных объемов в системах автоматизированного проектирования, а также при решении большого числа других практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валеева А.Ф. Применение метаэвристики муравьиной колонии к задачам двумерной упаковки // Информационные технологии. – 2005. – № 10. – С. 36-43.
2. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 928 с.
3. Оптимизационные проблемы транспортной логистики: оперативное размещение контейнеров при транспортировке грузов / Мухачева Э.А. [и др.] // Информационные технологии. – 2008. – № 7. – С. 17 – 22.
4. Чеканин В.А, Чеканин А.В. Эффективные модели представления ортогональных ресурсов при решении задачи упаковки // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 5. – С. 29 – 32.
5. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е. Моделирование и оптимизация технологических операций в промышленном производстве на основе эволюционных алгоритмов // Технология машиностроения. – 2010. – № 3. – С. 53 – 57.
6. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е. Систематизация и анализ структур данных при автоматизации управления складом на основе генетических алгоритмов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2008. – № 5. – С. 42 – 51.
7. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Алгоритм решения задач ортогональной упаковки объектов на основе мультиметодной технологии // Информационные технологии. – 2013. – № 7. – С. 17 – 21.
8. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Исследование генетических методов

оптимизации распределения прямоугольных ресурсов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической 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. Модель управления свободными пространствами контейнеров в задаче ортогональной упаковки объектов // 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. 1060 – 1065.
10. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Оптимизация решения задачи ортогональной упаковки объектов // Прикладная информатика. – 2012. – № 4. – С. 55 – 62.
11. Chekanin A.V., Chekanin V.A. Efficient Algorithms for Orthogonal Packing Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Vol. 53, N. 10. – P. 1457 – 1465.
12. Chekanin A.V., Chekanin V.A. Improved packing representation model for the orthogonal packing problem // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 390. – P. 591 – 595.
13. Crainic T.G., Perboli G., Tadei R. Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing // INFORMS Journal on Computing. – 2008. – Vol. 20, N. 3. – P. 368-384.
14. Garey M., Johnson D. Computers intractability: a guide to the theory of NP-completeness. – San Francisco: W.H. Freeman, 1979. – 338 p.
15. Lodi A., Martello S., Vigo D. Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem // European Journal of Operational Research. – 2002. – Vol. 141, N. 2. – P. 410-420.
16. 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.

V.A.Chekanin

LIBRARY CLASS FOR SOLVING PACKING PROBLEMS VIA EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

Abstract

The article is devoted to an information model realized as a library class which provides the unified approach to solving the packing problems using

evolutionary algorithms. The described unified library class is applicable in solving such problems as rational cutting, calendar planning, bin packing, arrangement of objects, traffic and power distribution and other practical optimization problems.

Key words: packing problem, recourse allocation, library class, information model

REFERENCES

[1] Valeyeva A.F. Ant Colony Algorithm for the 2-D Bin-Packing Problems // Informatsionnyye tekhnologii. – 2005. – Vol. 10. – P. 36-43. (rus.).

[2] Lafore R. Object-Oriented Programming in C++. Fourth Edition. – SPb.: Piter, 2011. – 928 p.

[3] Optimization Problems of Transport Logistics: Operating Bin Stowage for Cargo Transportation / Mukhacheva E.A. [and others] // Informatsionnyye tekhnologii. – 2008. – N. 7. – P. 17 – 22. (rus.).

[4] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Effective models of representations of orthogonal resources in solving the packing problem // Information and Control Systems (Informatsionno-Upravlyayushchiye systemy). – 2012. – Vol. 5. – P. 29 – 32. (rus.).

[5] Chekanin V.A., Kovshov Ye.Ye. Evolutionary-algorithm-based modelling and optimization of the processing steps in industrial production // Tekhnologiya Mashinostroeniya. – 2010. –Vol. 3. – P. 53 – 57. (rus.).

[6] Chekanin V.A., Kovshov E.E. Sistematizatsiya i analiz struktur dannykh pri avtomatizatsii upravleniya skladom na osnove geneticheskikh algoritmov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela. – 2008. – N. 5. – P. 42 – 51. (rus.)

[7] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Based on a Multimethod Technology Algorithm for Solving the Orthogonal Packing Problems // Informatsionnyye tekhnologii. – 2013. – Vol. 7. – P. 17 – 21. (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. Yevgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – P. 798 – 804. (rus.).

[9] Chekanin V.A., Chekanin A.V. A model of managing free spaces of containers for the orthogonal packing problem // Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of 3th International scientific conference / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. – SPb.:

Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – P. 1060 – 1065. (rus.).
[10] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Optimization of the solution of the orthogonal packing problem // Applied informatics (Prikladnaya informatika). –2012. – Vol. 4. – P. 55 – 62. (rus.).
[11] Chekanin A.V., Chekanin V.A. Efficient Algorithms for Orthogonal Packing Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Vol. 53, N. 10. – P. 1457 – 1465.
[12] Chekanin A.V., Chekanin V.A. Improved packing representation model for the orthogonal packing problem // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 390. – P. 591 – 595.
[13] Crainic T.G., Perboli G., Tadei R. Extreme point-based heuristics for three-dimensional bin packing // INFORMS Journal on Computing. – 2008. – Vol. 20, N. 3. – P. 368-384.
[14] Garey M., Johnson D. Computers intractability: a guide to the theory of NP-completeness. – San Francisco: W.H. Freeman, 1979. – 338 p.
[15] Lodi A., Martello S., Vigo D. Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem // European Journal of Operational Research. – 2002. – Vol. 141, N. 2. – P. 410-420.
[16] 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.

УДК 004.021

В.А. Чеканин[1], А.В. Чеканин[2]

ЭФФЕКТИВНАЯ СТРУКТУРА ДАННЫХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ОРТОГОНАЛЬНОЙ УПАКОВКИ ОБЪЕКТОВ

[1]Владислав Александрович Чеканин, к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)973-2038, E-mail: vladchekanin@rambler.ru

[2]Александр Васильевич Чеканин, д.т.н., профессор
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)973-2038, E-mail: avchekanin@rambler.ru

Аннотация

В работе рассматривается многоуровневая связная структура данных, предназначенная для быстрого размещения объектов при решении оптимизационной задачи ортогональной упаковки. Проведенные вычислительные эксперименты показали высокую временную эффективность многоуровневой связной структуры в сравнении с обыкновенным линейным списком, требующим сортировки всех элементов после размещения в контейнере каждого нового объекта.

Ключевые слова: задача ортогональной упаковки, структура данных, многоуровневая связная структура, распределение ресурсов, оптимизация

Введение

Задача ортогональной упаковки объектов является актуальной NP-полной задачей комбинаторной оптимизации. К решению этой задачи сводится множество практических задач распределения ресурсов [14], в частности, задач календарного и ресурсного планирования, складирования, контейнерной перевозки грузов, компоновки [2, 5-6, 11] и др.

В общем виде задача ортогональной упаковки объектов размерности D описывается следующим образом: имеются набор N ортогональных контейнеров (D-мерных параллелепипедов) с габаритными размерами $\{W_j^1, W_j^2, \ldots, W_j^D\}$, $j = 1, \ldots, N$ и набор n ортогональных объектов (D-мерных параллелепипедов) с габаритными размерами $\{w_i^1, w_i^2, \ldots, w_i^D\}$, $i = 1, \ldots, n$. Обозначим точку, характеризующую положение объекта i в j-м

контейнере через $\left(x_{ij}^1; x_{ij}^2; \ldots; x_{ij}^D\right)$. Необходимо разместить все объекты в минимальном числе контейнеров при выполнении следующих условий корректного размещения [4, 10]:

1) ребра размещенных в контейнере ортогональных объектов параллельны ребрам этого контейнера;

2) размещенные объекты не перекрывают друг друга, т.е.

$$\left(x_{ij}^d \geq x_{kj}^d + w_k^d\right) \vee \left(x_{kj}^d \geq x_{ij}^d + w_i^d\right)$$

$$\forall j \in \{1, \ldots, N\}, \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \forall i, k \in \{1, \ldots, n\}, i \neq k;$$

3) размещенные объекты не выходят за границы контейнеров, т.е.

$$\left(x_{ij}^d \geq 0\right) \wedge \left(x_{ij}^d + w_i^d \leq W_j^d\right) \quad \forall j \in \{1, \ldots, N\}, \forall d \in \{1, \ldots, D\}, \forall i \in \{1, \ldots, n\}.$$

Для решения задачи оптимального размещения заданного набора ортогональных объектов применяются различные эвристические алгоритмы [3, 7].

Многоуровневая связная структура данных

В [8, 12] показана эффективность применения предложенной ранее авторами этой статьи модели потенциальных контейнеров для представления ортогональных объектов в контейнерах. При использовании модели потенциальных контейнеров свободное пространство каждого контейнера представляется в виде набора ортогональных объектов – потенциальных контейнеров, описывающих всевозможные свободные пространства внутри рассматриваемого контейнера. Каждый потенциальный контейнер k характеризуется вектором $\left\{p_k^1; p_k^2; \ldots; p_k^D\right\}$, описывающим его габаритные размеры, а также вектором $\left\{x_k^1; x_k^2; \ldots; x_k^D\right\}$, описывающим координаты его точки, ближайшей к началу координат содержащего его контейнера.

Постановка задачи многомерной ортогональной упаковки включает задание направления загрузки контейнера в виде приоритетного списка выбора его координатных осей $L_P = \{P_1; P_2; \ldots; P_D\}$, где $P_d \in [1; D] \forall d \in [1; D]$. Для загрузки контейнера в заданном направлении выбор потенциальных контейнеров при размещении каждого объекта осуществляется в порядке, определенном в приоритетном списке L_P.

Для управления набором потенциальных контейнеров предлагается использовать многоуровневую связную структуру данных. В основу разработанной структуры данных положена идея представления набора

координат потенциальных контейнеров в виде рекурсивно вложенных линейных связных списков.

Набор K потенциальных контейнеров, расположенных в точках $\left\{x_k^1; x_k^2; \ldots; x_k^D\right\}, k \in K$ контейнера, представляется в виде D-уровневых рекурсивно вложенных друг в друга упорядоченных по возрастанию элементов линейных связных списков (рис. 1). Каждый элемент j списка i на уровне вложенности P^d содержит координату $s_{i,j}^{P_d} = x_k^{P_d}$ такого потенциального контейнера k, что внутри каждого связного списка выполняется неравенство $s_{i,j}^{P_d} < s_{i,j+1}^{P_d} \forall P_d \in L_P$. Упорядочивание элементов в многоуровневой связной структуре данных выполняется автоматически за счет вставки нового элемента в такую позицию списка, для которой выполняется приведенное выше неравенство.

$$
\begin{array}{lll}
P_d: & s_{1,1}^{P_d} \to \ldots \to s_{1,i}^{P_d} \to \ldots & \\
 & \downarrow & \\
P_{d+1}: & s_{i,1}^{P_{d+1}} \to \ldots \to s_{i,j}^{P_{d+1}} \to \ldots & \\
 & \downarrow & \\
P_{d+2}: & s_{j,1}^{P_{d+2}} \to \ldots \to s_{j,k}^{P_{d+2}} \to \ldots &
\end{array}
$$

Рис. 1. Многоуровневая связная структура данных

В качестве примера рассмотрим трехмерный ортогональный контейнер (параллелепипед), содержащий набор K потенциальных контейнеров, вектора $X_k = \left\{x_k^1; x_k^2; x_k^3\right\}, \quad k \in K$ которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты потенциальных контейнеров

Порядковый номер потенциального контейнера (k)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Координата x_k^1	0	2	2	2	4	0	4	0	4	2
Координата x_k^2	1	3	7	9	1	2	1	2	1	7
Координата x_k^3	0	1	5	6	2	1	3	3	1	2

Представление набора координат потенциальных контейнеров при использовании многоуровневой связной структуры данных для направления загрузки $L_P = \{1;2;3\}$ приведено на рис. 2.

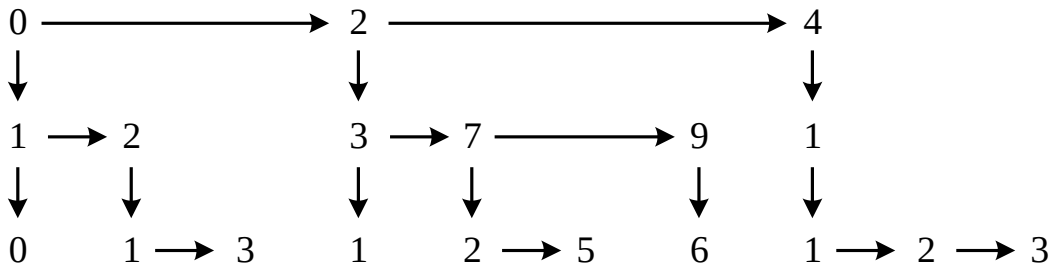


Рис. 2. Многоуровневая связная структура данных трехмерного контейнера для направления загрузки $L_P = \{1;2;3\}$

Вычислительные эксперименты

Анализ эффективности работы предложенной структуры данных проводился при решении эталонных задач ортогональной упаковки из библиотеки OR-library [1] для наборов двухмерных прямоугольных объектов, взятых из задач 2DBPP (2D Bin Packing Problem), сформулированных S.P. Fekete и J. Schepers [13].

Задачи решались с использованием разработанного прикладного программного обеспечения *Packer* [9], функционирующего на платформе Microsoft Win32. Эксперименты проводились на персональной ЭВМ (ЦП – AMD 1.79 ГГЦ, ОЗУ – 1.12 ГБ).

В ходе каждого вычислительного эксперимента решались задачи ортогональной упаковки трех различных типов с различным процентным соотношением классов размещаемых объектов. Объемы выборки тестовых задач равны $m = 40$, 50, 100, 150, 250, 500 и 1000 объектов. Диапазоны изменения размеров объектов в тестовых задачах трех различных типов приведены в таблицах 2-3.

Таблица 2

Геометрические параметры размещаемых объектов

Класс объектов	**Характеристики объектов**	**Интервал распределения длин объектов**	**Интервал распределения ширин объектов**
Класс 1	Широкие	[1, 50]	[75, 100]
Класс 2	Длинные	[75, 100]	[1, 50]
Класс 3	Большие	[50, 100]	[50, 100]
Класс 4	Маленькие	[1, 50]	[1, 50]

Таблица 3

Типы решаемых тестовых задач

Тип задач	**Соотношение классов размещаемых объектов, %**			
	Класс 1	**Класс 2**	**Класс 3**	**Класс 4**
1 (ngcutfs 1)	20	20	20	40
2 (ngcutfs 2)	15	15	15	55
3 (ngcutfs 3)	10	10	10	70

На основе усредненных полученных результатов тестирования построена диаграмма, приведенная на рис. 3. Из диаграммы видно, что многоуровневая связная структура, используемая для представления набора потенциальных контейнеров, обеспечивает более быстрое размещение объектов по сравнению с обычным линейным списком, упорядочивание в котором производится с помощью одного из наиболее быстрых алгоритмов сортировки (*Quicksort*) [15]. Относительная временная эффективность T многоуровневой связной структуры данных рассчитывается по формуле $T = \frac{t_l}{t_m}$, где t_l и t_m – время размещения объектов при использовании линейного списка и многоуровневого связного списка соответственно.

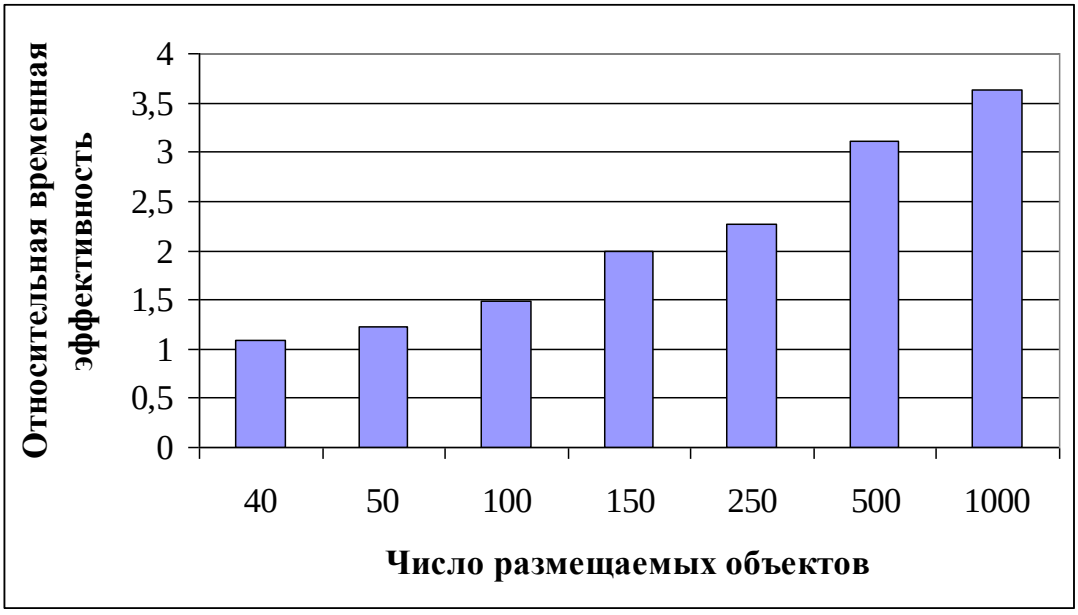


Рис. 3. Временная эффективность многоуровневой связной структуры при решении тестовых задач двухмерной ортогональной упаковки

Заключение

Для быстрого доступа к потенциальным контейнерам предложена новая структура данных – многоуровневая связная структура, в основу

которой положена идея представления набора координат потенциальных контейнеров в виде рекурсивно вложенных линейных связных списков.

Проведенные вычислительные эксперименты на задачах ортогональной упаковки объектов показали высокую эффективность многоуровневой связной структуры в сравнении с обыкновенным линейным списком, требующим сортировки всех элементов после размещения каждого объекта в контейнере. Новая модель на практике более чем в два раза повышает скорость размещения при решении задач ортогональной упаковки объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Библиотека OR-library наборов тестовых задач исследования операций. [Электронный ресурс]. URL: http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html (дата обращения: 31.03.2014).
2. Оптимизационные проблемы транспортной логистики: оперативное размещение контейнеров при транспортировке грузов / Мухачева Э.А. [и др.] // Информационные технологии. – 2008. – № 7. – С. 17 – 22.
3. Чеканин А.В., Чеканин В.А. Алгоритмы эффективного решения задачи ортогональной упаковки объектов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53, № 10. – С. 1639 – 1648.
4. Чеканин В.А, Чеканин А.В. Эффективные модели представления ортогональных ресурсов при решении задачи упаковки // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 5. – С. 29 – 32.
5. Чеканин В.А., Ковшов Е.Е. Моделирование и оптимизация технологических операций в промышленном производстве на основе эволюционных алгоритмов // Технология машиностроения. – 2010. – № 3. – С. 53 – 57.
6. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Алгоритм решения задач ортогональной упаковки объектов на основе мультиметодной технологии // Информационные технологии. – 2013. – № 7. – С. 17 – 21.
7. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Исследование генетических методов оптимизации распределения прямоугольных ресурсов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / Под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 798 – 804.
8. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Модель управления свободными пространствами контейнеров в задаче ортогональной упаковки объектов // 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. 1060 – 1065.
9. Чеканин В.А., Чеканин А.В. Оптимизация решения задачи ортогональной упаковки объектов // Прикладная информатика. – 2012. – № 4. – С. 55 – 62.
10. 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.
11. Chekanin A.V., Chekanin V.A. Efficient Algorithms for Orthogonal Packing Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Vol. 53, N. 10. – P. 1457 – 1465.
12. Chekanin A.V., Chekanin V.A. Improved packing representation model for the orthogonal packing problem // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 390. – P. 591 – 595.
13. Fekete S.P., Schepers J. New classes of lower bounds for bin packing problems // Integer Programming and Computational Optimization. Lecture Notes in Computer. – 1998. – Vol. 1412. – P. 257 – 270.
14. 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.
15. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. Boston: Pearson Education, 2014. – 656 p.

V.A.Chekanin, A.V.Chekanin

EFFECTIVE DATA STRUCTURE FOR THE OPTIMIZATION ORTHOGONAL PACKING PROBLEM

Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

Abstract

The article is devoted to a multilevel linked data structure that is designed for fast placing of a given set of orthogonal objects at solving the orthogonal packing problem. The carried out computational experiments demonstrate high time efficiency of the multilevel linked data structure compared with the simple linear list that requires sorting after placing of each new object into a container.

Key words: orthogonal packing problem, data structure, multilevel linked data structure, recourse allocation, optimization

REFERENCES

[1] OR-library of test data sets for a variety of Operations Research (OR) problems. URL: http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html (Data: 31.03.2014).

[2] Optimization Problems of Transport Logistics: Operating Bin Stowage for Cargo Transportation / Mukhacheva E.A. [and others] // Informatsionnyye tekhnologii. – 2008. – N. 7. – P. 17 – 22. (rus.).

[3] Chekanin A.V., Chekanin V.A. Algoritmy effektivnogo resheniya zadachi ortogonal'noy upakovki ob'yektov // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. – 2013. – Vol. 53, N. 10. – P. 1639 – 1648. (rus.).

[4] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Effective models of representations of orthogonal resources in solving the packing problem // Information and Control Systems (Informatsionno-Upravlyayushchiye systemy). – 2012. – Vol. 5. – P. 29 – 32. (rus.).

[5] Chekanin V.A., Kovshov Ye.Ye. Evolutionary-algorithm-based modelling and optimization of the processing steps in industrial production // Tekhnologiya Mashinostroeniya. – 2010. –Vol. 3. – P. 53 – 57. (rus.).

[6] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Based on a Multimethod Technology Algorithm for Solving the Orthogonal Packing Problems // Informatsionnyye tekhnologii. – 2013. – Vol. 7. – P. 17 – 21. (rus.).

[7] 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. Yevgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – P. 798 – 804. (rus.).

[8] Chekanin V.A., Chekanin A.V. A model of managing free spaces of containers for the orthogonal packing problem // Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of 3th International scientific conference / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – P. 1060 – 1065. (rus.).

[9] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Optimization of the solution of the orthogonal packing problem // Applied informatics (Prikladnaya informatika). –2012. – Vol. 4. – P. 55 – 62. (rus.).

[10] 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.

[11] Chekanin A.V., Chekanin V.A. Efficient Algorithms for Orthogonal Packing Problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2013. – Vol. 53, N. 10. – P. 1457 – 1465.

[12] Chekanin A.V., Chekanin V.A. Improved packing representation model for the orthogonal packing problem // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 390. – P. 591 – 595.
[13] Fekete S.P., Schepers J. New classes of lower bounds for bin packing problems // Integer Programming and Computational Optimization. Lecture Notes in Computer. – 1998. – Vol. 1412. – P. 257 – 270.
[14] 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.
[15] Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. Boston: Pearson Education, 2014. – 656 p.

СТАНКОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.025.1

М.А. Адмакин[1], О.Н. Адмакина[2]

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФАСОННЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

[1]Михаил Александрович Адмакин, к.т.н., доцент кафедры «Станкостроение», ФГБУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Ул. Политехническая, д.29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. +7(812)534-13-88, E-mail: SPSZK1@yandex.ru

[2]Ольга Николаевна Адмакина, старший преподаватель кафедры «МБ, МВШУ», ФГБУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Ул. Политехническая, д.29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. +7(812)534-13-88, E-mail: SPSZK1@yandex.ru

Аннотация

В работе сформулированы принципы расчёта фасонных фрез для обработки сложнопрофильных плоскостей. Приведены формулы для расчёта точек профиля инструмента, показан эскиз приспособления для изготовления зубьев фрезы. Сделан сравнительный анализ способов изготовления фасонных фрез и показано преимущество предложенного метода.

Ключевые слова: фасонная фреза, тело вращения, характерная точка, профиль инструмента, ось вращения.

В современном машиностроении увеличивается доля деталей сложного профиля, в т.ч. деталей, имеющих сложную форму плоской поверхности. Проектирование и особенно изготовление фасонных фрез для обработки сложнопрофильных плоскостей представляет определённые трудности. Традиционное проектирование фасонных видов фрез подразумевает исполнение фасонного профиля на задней поверхности инструмента двумя основными способами: либо с помощью острой заточки, либо с помощью затылования (рис. 1). В случае острой заточки задняя поверхность является частью плоскости, которая расположена под углом α к касательной, проходящей в точке профиля фрезы при её вращении при обработке изделия. В случае затылования задняя поверхность инструмента является частью спирали Архимеда.

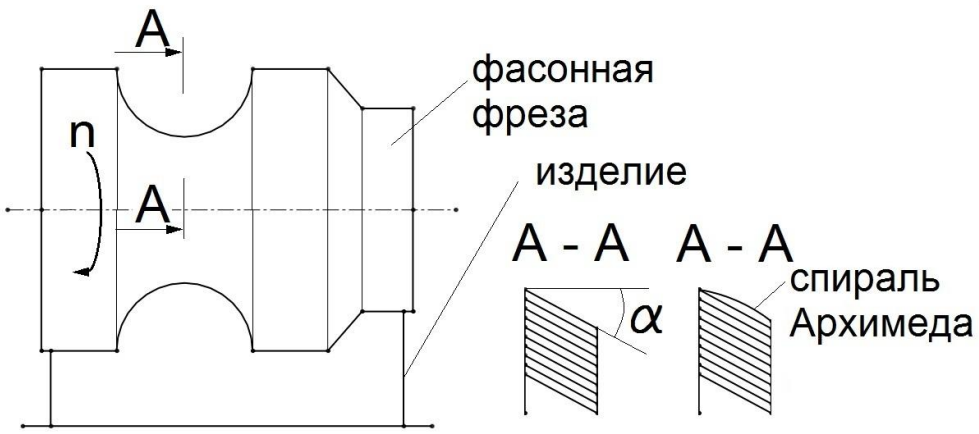


Рис. 1. Варианты формы задней поверхности фасонных фрез

Недостатки острой заточки следующие:

- для получения исходного профиля фрезы требуются приспособления для фасонной заточки со сложной кинематикой движения,
- в отдельных случаях требуются заточные круги с профилем аналогичным профилю детали, т.е. сложных в изготовлении.

Для примера, при изготовлении просто радиуса на детали, выпуклого или вогнутого, требуются отдельного вида фрезы, которые по ГОСТу относятся к фасонным фрезам.

Недостатками метода затылования являются:

- применение специализированных затыловочных станков,
- затылующий инструмент имеет сложный профиль, аналогичный профилю детали, т.е. сложный в изготовлении.

Наиболее простым способом изготовления практически любого сложного профиля является обработка тела вращения. Данная операция производится, как правило, на станках с ЧПУ, режущий инструмент имеет простую форму, является стандартным, т.е. дешёвым. Сложная форма изделия получается за счёт согласованного движения по двум координатам обрабатывающего резца или шлифовального круга простой формы (рис. 2).

В настоящей работе предлагается изготавливать заднюю фасонную поверхность инструмента как часть окружности, т.е. фреза является частью тела вращения. К сожалению, в таком виде тело вращения нельзя использовать в качестве фрезы, так как в процессе фрезерования при совпадении оси вращения фрезы с осью симметрии фрезы задний угол α при резании будет равен нулю и резание невозможно.

Для того, чтобы зуб фрезы, изготовленный как часть сложнопрофильного тела вращения, мог осуществлять процесс резания, необходимо ось фрезы сместить относительно оси её вращения (рис. 3).

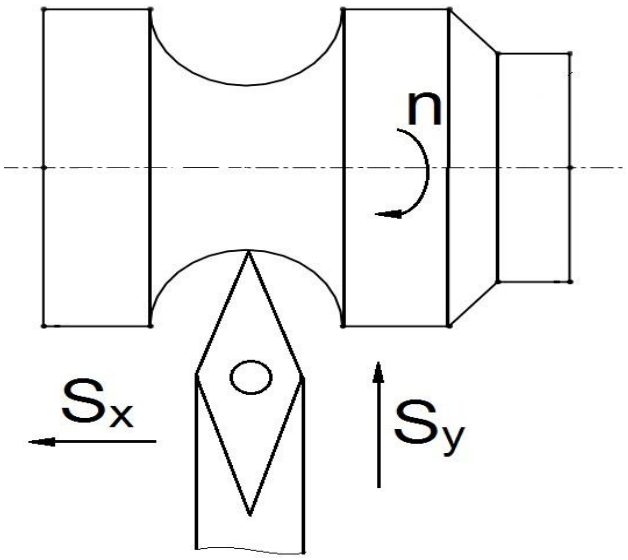


Рис. 2. Изготовление сложнопрофильного изделия.

Как видно из рисунка 3, профиль детали получается в плоскости А-А, в то время как фасонный зуб фрезы, как часть тела вращения, изготавливается в плоскости ОВ, т.е. профиль фрезы в плоскости проектирования не совпадает с профилем детали. Найдём формулы, связывающие профиль детали с профилем изготовления зуба фрезы. На рис. 4 показаны примеры характерных точек 1а и 2а на зубе фрезы, подлежащие расчёту.

Для обработки точек на детали 1 и 2 необходимо рассчитать координаты точек 1а (x_1', r_1) и 2а (x_2', r_2) на теле вращения для изготовления зуба фрезы. Спроектировать фасонную фрезу – значит рассчитать координаты всех характерных точек тела вращения. Координаты по оси X у детали и тела вращения совпадают, т.е. $x_1 = x_1'$, $x_2 = x_2'$. Остаётся рассчитать только радиусы точек 1а и 2а.

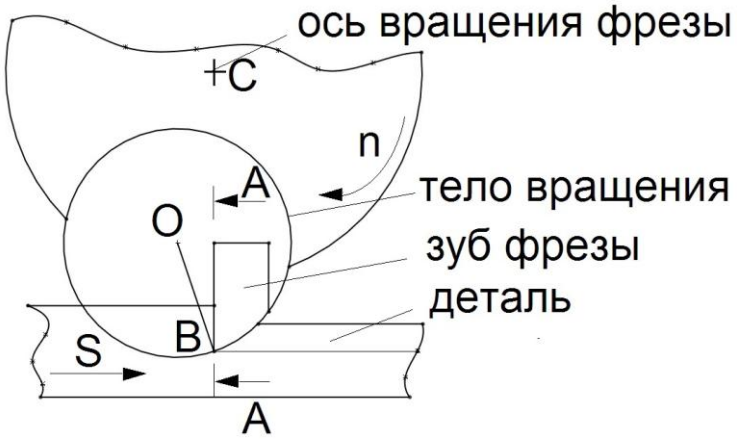


Рис. 3. Схема изготовления зуба фрезы.

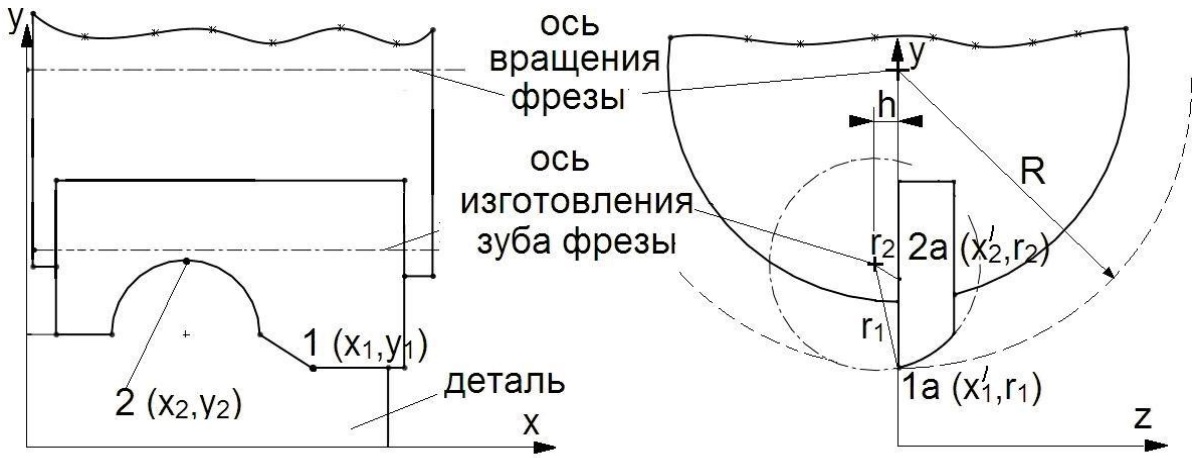


Рис. 4. Расчётные характерные точки фрезы и детали

В качестве радиуса r_1 выбираем точку на детали с минимальным значением Y – точку 1. Для обеспечения необходимого условия для процесса резания надо назначить задний угол α, который выбирается по справочникам режимов резания при обработке конкретного вида материала. Максимальный радиус тела вращения r_1, соответствующий минимальному значению координаты Y на детали, выбираем, исходя из технологических условий изготовления тела вращения и габаритных размеров фрезы (R). Величину смещения оси тела вращения от оси вращения фрезы (h) рассчитываем по следующей формуле:

$$h = r_1 \cdot \sin\alpha \qquad (1)$$

У любой произвольно выбранной точке на фрезе координату r_x можно рассчитать по формуле:

$$r_x = \sqrt{(r_1 \cdot \cos\alpha - (Y_x - Y_1))^2 + h^2} \qquad (2)$$

Изготовление тела вращения для формирования фасонного зуба фрезы можно осуществить с помощью специального приспособления, см. рис. 5.

Напомним, что для изготовления зуба фрезы используется простой стандартный инструмент – резец для контурного точения и шлифовальный круг прямого профиля или угловой.

Таким образом, в данной работе предложен способ проектирования фасонной фрезы сложного профиля для обработки плоскостей практически любой формы, разработаны формулы расчёта координат профиля инструмента, спроектировано приспособление для изготовления фасонных

зубьев фрезы простым методом точения.

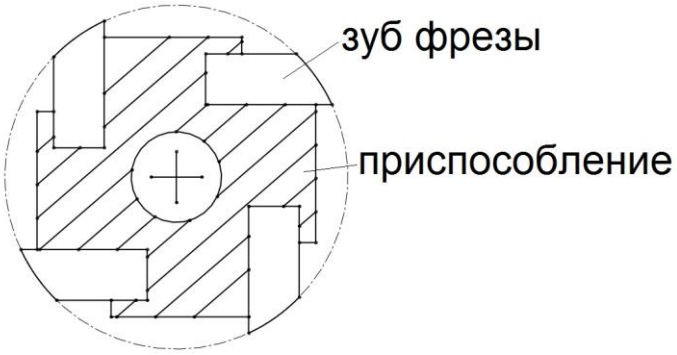


Рис. 5. Приспособление для изготовления фасонного зуба фрезы.

Результаты данной работы могут быть использованы в машиностроении при фрезеровании сложных поверхностей открытого типа, например, при восстановлении профиля железнодорожных рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адмакин Д.М., Адмакин М.А., Адмакина О.Н., Восстановление профиля рельсов методом протягивания // Промышленный транспорт 21 век. – 2011. - № 4. – С. 44-45.
2. Адмакин М.А. Исследования по восстановлению профиля изношенных рельсов // Тезисы докладов конференции на транспортно-промышленном форуме «Пути инновационного развития железнодорожного транспорта необщего пользования».- М.; 5-6 октября 2011.
3. Грановский Г.И., Панченко К.П. Фасонные резцы. М.: Машиностроение, 1975.- 309 с.
4. Дарманчев С.К. Расчёты точности работы фасонных инструментов. М.: Машгиз, 1959.- 141 с.
5. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колёс. М.: Машиностроение, 2004.- 480 с.
6. Маслов А.Р. Приспособления для металлорежущего инструмента. Справочник. 1982. М.: Машиностроение, 1996.- 240 с.
7. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. Киев: Вища школа, 1986.- 456 с.
8. Романов В.Ф. Расчёты зуборезных инструментов. М.: Машиностроение, 1969.- 256 с.
9. Справочник инструментальщика/ И.А. Ординарцев, Г.Ф. Филиппов, А. Н. Шевченко и др. Под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: машиностроение, 1987.- 846 с.
10. А.В. Щеголев. Конструирование протяжек. М.: Мащгиз, 1960.- 352 с.

M.A. Admakin, O.N. Admakina

DESIGN OF FORM MILLS FOR PROCESSING FIGURINE PLANES

St. Peterburg State Politechnical Univesity, Russia

Abstract

The article is devoted to the development of the principles of calculation of form mills for processing of the complex (shaped) figurine planes. Some formulas for calculation of points of a profile of the tool have given in the article. The device sketch for production of teeth of a mill, have shown. In the article, the comparative analysis of different ways of manufacturing of form mills, have also made. Besides that, the advantages of the offered method have shown.

Key words: form mills, shaped mills, figurine planes, complex shaped planes, rotation body, tool profile, rotation axis.

REFERENCES

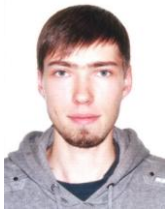
[1] Admakin D.M., Admakin M.A., Admakin O.N. Reset the profile rails by pulling / / Industrial Vehicles 21. - 2011. - № 4. – P. 44-45. (rus.)
[2] .Admakin M.A. Study on the restoration of worn rails profile / / Abstracts of the conference on transport and industrial forum " Innovative Ways of development of railway transport uncommon ." - M. ; 5-6 October 2011. (rus.)
[3] Granovsky G.I., Panchenko K.P. Shaped cutters . M. : Engineering , 1975. - 309 p. (rus.)
[4] Darmanchev S.K, Calculations accuracy of form tools . M. Mashgiz , 1959 . - 141 p. (rus.)
[5] Kalashnikov A.S. The technology of manufacture of gears. M. Mashinostroyeniye, 2004 . - 480 p. (rus.)
[6] Maslov A.R. Devices for cutting tools . Handbook. . 1982. M. Mashinostroyeniye , 1996 . - 240 p.
[7] Rodin P.R. Metal cutting tools . Kiev: Visha School, 1986 . - 456 p.
[8] Romanov V.F. Calculations gear cutting tools . M. : Engineering , 1969 . - 256 p. (rus.)
[9] Directory toolmaker / I.A. Ordinartsev, G.F. Filippov , A.N. Shevchenko , etc. Under the Society. Ed. I.A. Ordinartseva . L. : Engineering , 1987. - 846 p. (rus.)
[10] A.V. Schogolev. Construction broaches . M. Maschgiz , 1960 . – 352 p. (rus.)

УДК 621.822.572

М.С. Бундур[1], Н.А. Пелевин[2], В.А. Прокопенко[3]

ВОЗМОЖНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПАКЕТА MATLAB SIMULINK ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ НЕСУЩИМИ УЗЛАМИ

[1]Михаил Семенович Бундур, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru



[2]Никита Александрович Пелевин, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: twic@inbox.ru

[3]Вячеслав Алексеевич Прокопенко, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены приемы моделирования дифференциальных уравнений, описывающих системы управления гидростатическими подшипниками, в пакете MATLAB Simulink. Приведены основные варианты систем. Описана последовательность реализации динамической модели. Сделаны выводы и даны рекомендации.

Ключевые слова: программный пакет, динамические характеристики, система дифференциальных уравнений, моделирование, станок, гидростатический подшипник

Возрастание требований к качеству и технологическим возможностям металлорежущего оборудования современного производства одновременно сопровождается повышением уровня решаемых проблем и задач его проектирования, исследования статических и динамических характеристик узлов и систем, оптимизации принимаемых решений и т.п. В полной мере сказанное относится к таким важным компонентам станков, как приводы их главного движения и шпиндельные узлы. Практически единственным средством повышения виброустойчивости при этом является переход к бо-

лее широкому использованию гидростатических опорных систем жидкостного трения в виде гидростатических подшипников (ГСП). Практика конструирования ГСП, их внедрение и эксплуатация показывают, что для реализации конкурентоспособных по быстроходности и нагрузочной способности решений это неизбежно ведет к параметрам опор ГСП, существенно отличающихся от требований нормали станкостроения Н20-6. Как следствие динамическое качество ГСП оказывается заметно ниже минимальных рекомендуемых значений [1] для систем автоматического регулирования (САР). Одним из эффективных путей его повышения является введение в САР ГСП корректирующих RC-цепей [2].

При математическом описании важное место занимает выбор и оценка характеристик САР с учетом вариантов схемы управления.

Существуют следующие схемы управления опорами ГСП [3]:

1. «дроссель-дроссель» - в опорах ГСП используются два дросселя типа «сопло-заслонка» по каждой из координатных осей;

2. «дроссель-регулятор» - используются дроссель типа «сопло-заслонка» и мембранный регулятор;

3. «регулятор-регулятор» - используются два мембранных регулятора;

4. «насос-карман» - используются два автономных насоса по каждой координатной оси;

5. «дроссель-насос-карман» - используются дроссель типа «сопло-заслонка» и схема управления «насос-карман»;

6. «регулятор-насос-карман» - используются мембранный регулятор и схема управления «насос-карман».

Например, для варианта 1 схемы управления ГСП «дроссель-дроссель» с использованием корректирующей [4] *RC*-цепи система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} M\ddot{h}_1 = R_h + \dfrac{p_1}{2}\left(l_1B_1 + b_1L_1\right) - \dfrac{p_2}{2}\left(l_2B_2 + b_2L_2\right) - \dfrac{\mu\dot{h}_1}{4h_1^{\,3}}\left[\left(B_1 - b_1\right)^3 l_1 + \left(L_1 - l_1\right)^3 b_1\right] - \\ - \dfrac{\mu\dot{h}_1}{4h_2^{\,3}}\left[\left(B_2 - b_2\right)^3 l_2 + \left(L_2 - l_2\right)^3 b_2\right] \\ \dfrac{p_n - p_1}{R_{др1}} = \dfrac{p_1h_1^3}{3\mu}\left(\dfrac{l_1}{B_1 - b_1} + \dfrac{b_1}{L_1 - l_1}\right) + \dfrac{V_{пр1}}{E_м}\dot{p}_1 + \dot{h}_1(B_1l_1 + b_1L_1 - 2b_1l_1) - Q_A \\ \dfrac{p_n - p_1}{R_{др2}} = \dfrac{p_2h_2^3}{3\mu}\left(\dfrac{l_2}{B_2 - b_2} + \dfrac{b_2}{L_2 - l_2}\right) + \dfrac{V_{пр2}}{E_м}\dot{p}_2 + \dot{h}_2(B_2l_2 + b_2L_2 - 2b_2l_2) + Q_A \\ h_2 = h_\Sigma - h_1 \\ Q_A = C_A \cdot \dot{p}_2 - C_A \cdot \dot{p}_1 - C_A \cdot R_A \cdot \dot{Q}_A \end{cases}, \quad (1)$$

В системе (1): h_1 – зазор между подвижным узлом (ПУ) и базовой опорой; h_2 – зазор между ПУ и замыкающей опорой; $h_1 + h_2 = h_\Sigma$ – суммарный (диаметральный) зазор в ГСП; M – приведенная масса шпинделя; p_n – давление питания; p_1 – давление жидкости в кармане базовой опоры; p_2 – давление жидкости в кармане замыкающей опоры; R_h – внешняя радиальная нагрузка; $V_{пр1}$ и $V_{пр2}$ – приведённый объём рабочей жидкости базовой и замыкающей опоры соответственно; $E_м$ – модуль объемной сжимаемости рабочей жидкости; μ – динамическая вязкость рабочей жидкости; $R_{др1}$ и $R_{др2}$ – соответственно коэффициенты сопротивления дросселей *Др1* и *Др2*; *b, l, B, L* – геометрические размеры опоры (с индексом 1 – базовая опора; 2 – замыкающая), Q_A – расход жидкости в динамике через *RC* – цепь; C_A – величина гидроёмкости, R_A – величина гидросопротивления.

Система уравнений (1) включает в себя уравнение динамического равновесия шпинделя, два уравнения неразрывности потока для каждой из опор ГСП, уравнение соотношения зазоров в опорах ГСП, уравнение неразрывности потока для корректирующего устройства [5].

Для варианта 2 в системе (1) изменяется уравнение неразрывности потока для одной из опор ГСП. К нему добавляется расход через регулятор [6]:

$$\frac{p_n - p_2}{k_p \cdot \mu} H_p^{\,3} = \frac{p_2 h_2^{\,3}}{3\mu} \cdot \left(\frac{l_2}{B_2 - b_2} + \frac{b_2}{L_2 - l_2} \right) + \frac{V_{пр2}}{E_м} \dot{p}_2 + \dot{h}_2 \left(B_2 l_2 + b_2 L_2 - 2 b_2 l_2 \right) + \\ + KF \cdot \dot{H}_p - Q_A \quad . \quad (2)$$

Также добавляется уравнение текущего зазора (H_p) в регуляторе:

$$H_p = H_0 + e p_2 , \quad (3)$$

где e – податливость мембраны по давлению; H_0 – начальный зазор в регуляторе, KF – коэффициент площади мембраны.

Для варианта 3 в системе (1) изменятся оба уравнения неразрывности потока для каждой из опор ГСП, в соответствии с (2) и (3).

Для варианта 4 изменяются левые части в уравнениях неразрывности потока в (1) для каждой из опор ГСП [7]:

$$Q_{H1} = \frac{p_1 h_1^{\,3}}{3\mu} \cdot \left(\frac{l_1}{B_1 - b_1} + \frac{b_1}{L_1 - l_1} \right) + \frac{V_{пр1}}{E_м} \dot{p}_1 + \dot{h}_1 \left(B_1 l_1 + b_1 L_1 - 2 l_1 b_1 \right) - Q_A , \quad (4)$$

где Q_{H1} – величина постоянного расхода насоса H_1.

Для варианта 5 изменения в системе (1) необходимо произвести только для левой части одного из уравнений баланса расходов.

Для варианта 6 в системе (1) изменяются уравнения в соответствии с (2), (4) и добавляется (3).

Структура физико-математической модели ГСП отличается нелинейностью, что усложняет процедуру решения системы дифференциальных уравнений.

Инструменты для решения могут использоваться достаточно разнообразные [8]. Однако наибольшими возможностями обладает такой программный пакет, как «MATLAB Simulink», хотя его освоение и использование в инженерной практике имеет свои особенности и специфику. Прежде всего, это относится к программированию и моделированию САР. В полной мере отмеченное касается систем ГСП.

Группируя, в соответствии с (1), блоки библиотеки «Simulink» [8], возможно реализовать модель любой сложности с необходимым количеством составляющих ее подсистем, то есть отдельных моделей имеющих собственную структуру, а также связи с моделью высокого уровня. Для примера на рис. 1 приведена одна из возможных структурных схем ГСП в рабочем поле «Simulink». Такая модель удобна тем, что в процессе моделирования можно разбивать исходную систему дифференциальных уравнений (1) на отдельные подсистемы (модели низкого уровня: рис. 2, 3, 4), которые объединяются в блоки подсистем. Число блоков и связей в модели неограниченно. «Simulink» обладает открытой архитектурой и позволяет развивать среду моделирования, создавать собственные блоки и наращивать библиотеки блоков [8].

После получения окончательного варианта системы дифференциальных уравнений САР следующим шагом является преобразование каждого уравнения по отдельности.

Из системы (1), уравнение динамического равновесия шпинделя приведем к форме (5):

$$\ddot{h}_1 = \left[\begin{array}{l} R_h + \frac{p_1}{2}\left(l_1 B_1 + b_1 L_1\right) - \frac{p_0}{2}\left(l_2 B_2 + b_2 L_2\right) - \\ -\frac{\mu \dot{h}_1}{4 h_1^{\,3}}\left[\left(B_1 - b_1\right)^3 l_1 + \left(L_1 - l_1\right)^3 b_1\right] - \\ -\frac{\mu \dot{h}_1}{4 h_2^{\,3}}\left[\left(B_2 - b_2\right)^3 l_2 + \left(L_2 - l_2\right)^3 b_2\right] \end{array} \right] / M \qquad (5)$$

Уравнение (5) в среде моделирования «Simulink» будет иметь вид, который представлен на рис. 2. На структурной схеме (рис. 1) такая подсистема обозначена – «МОДЕЛЬ 1».

Результат, полученный при численном решении уравнения (5) в модели (рис. 1) «Simulink» необходимо проинтегрировать:

$$\ddot{h}_1 \rightarrow \frac{1}{S} \rightarrow \dot{h}_1 .$$

Для этого применяется стандартный блок интегрирования из библиотеки «Simulink». На структурной схеме (рис. 1) он обозначен – «ИНТЕГРАТОР 1».

Для интегрирования результата повторно ($\dot{h}_1 \rightarrow \frac{1}{S} \rightarrow h_1(t)$), применяется аналогичный блок, для которого выполняется настройка параметров первоначальных условий. При этом у этого блока создаются два входа: один для сигнала интегрирования, второй для ввода начального значения (h_1 из исходных данных). На схеме (рис. 1) его обозначение – «ИНТЕГРАТОР 2».

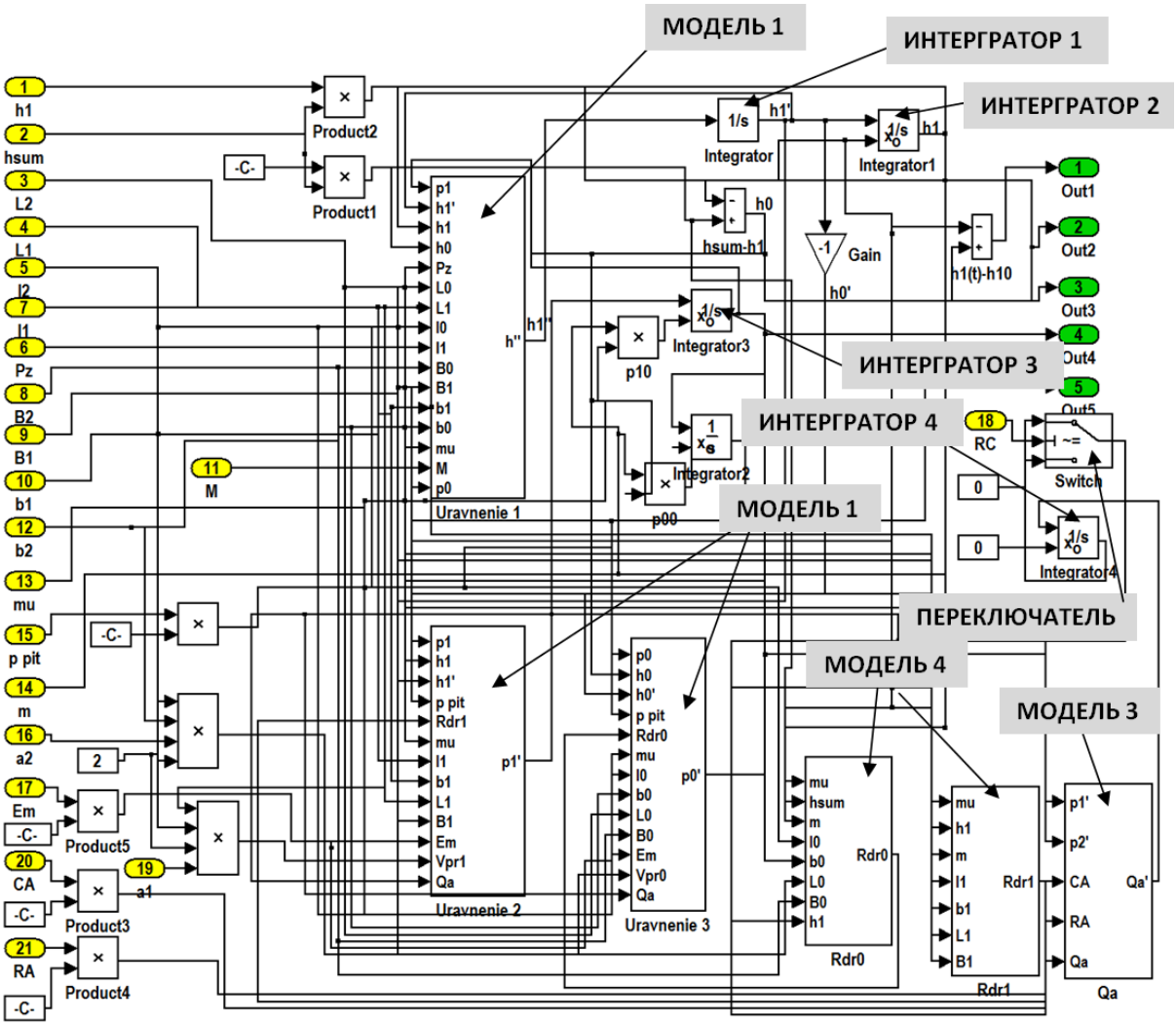


Рис. 1. Структурная схема системы управления «дроссель-дроссель» ГСП в «MATLAB Simulink»

Выходы блоков «ИНТЕГРАТОР 1» и «ИНТЕГРАТОР 2» подключаются к входам блока подсистемы «МОДЕЛЬ 1».

Далее уравнение неразрывности потока из (1) аналогично преобразуется к виду:

$$\dot{p}_1 = \frac{\left[\frac{p_n - p_1}{R_{др1}} - \frac{p_1 h_1^3}{3\mu}\left(\frac{l_1}{B_1 - b_1} + \frac{b_1}{L_1 - l_1}\right) - \dot{h}_1(B_1 l_1 + b_1 L_1 - 2b_1 l_1) + Q_A\right] \cdot E_м}{V_{пр1}} \qquad (6)$$

Второе уравнение неразрывности потока из системы (1) преобразуется аналогичным образом.

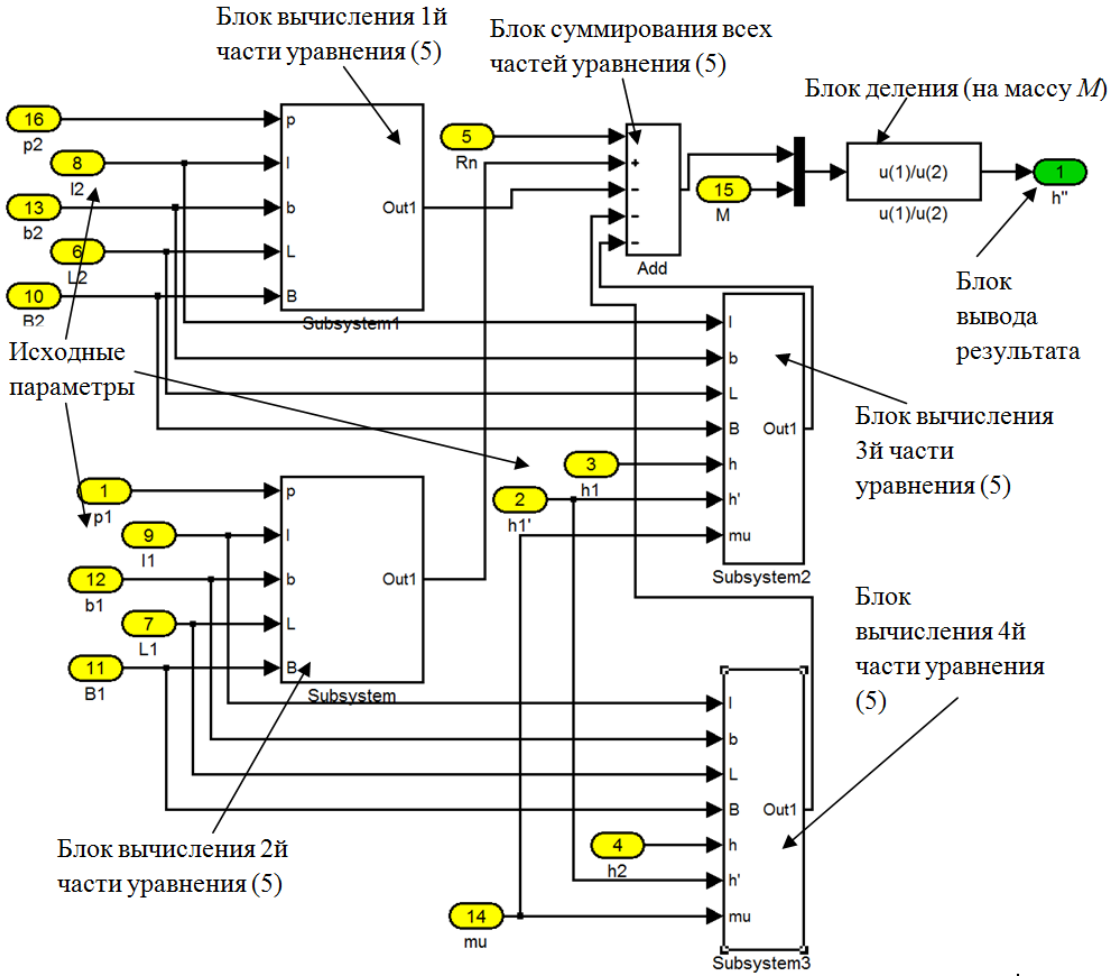


Рис. 2. Модель структурной схемы для уравнения динамического равновесия шпинделя

В среде моделирования «Simulink» уравнение (6) имеет вид, который представлен на рис. 3. На структурной схеме (рис. 1) такая подсистема обозначена – «МОДЕЛЬ 2».

Величина давления p_1 получается интегрированием выходной величины подсистемы «МОДЕЛЬ 2» с помощью блока, обозначенного на структурной схеме (рис. 1) «ИНТЕГРАТОР 3» (для блока выполняется настройка аналогичная блоку «ИНТЕГРАТОР 2»). На вход интегратора поступает заданное значение p_1, выход соединен с моделями «МОДЕЛЬ 1» и

«МОДЕЛЬ 2». К входу блока второго уравнения также подводим выходы двух интеграторов зазора.

Уравнение неразрывности потока для корректирующего устройства запишется в следующем виде:

$$\dot{Q}_A = \frac{C_A \cdot \dot{p}_2 - C_A \cdot \dot{p}_1 - Q_A}{C_A \cdot R_A} \tag{7}$$

Уравнение (7) имеет вид структуры, приведенной на рис. 4. На схеме (рис. 1) эта подсистема обозначена – «МОДЕЛЬ 3».

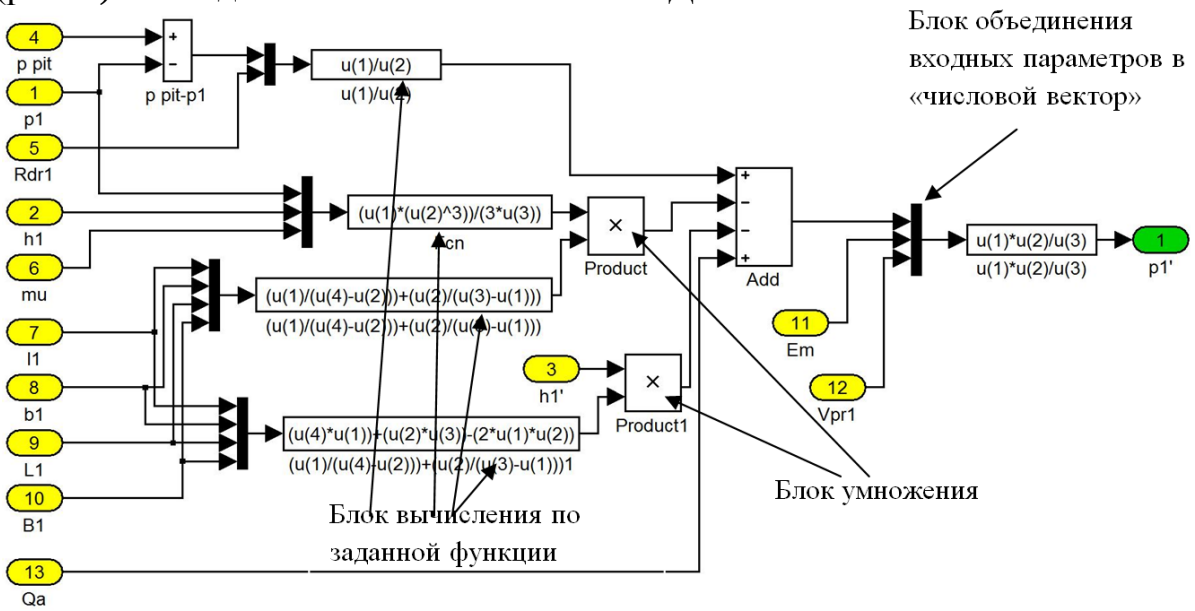


Рис. 3. Модель структурной схемы для уравнения неразрывности потока

Для интегрирования Q_A служит соответствующий блок. На структурной схеме (рис. 1) он обозначен – «ИНТЕГРАТОР 4» и имеет два входа, один из которых Q_A. Выход интегратора – коммутирующий переключатель (блок на структурной схеме (рис. 1) обозначен – «ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ»), который позволяет производить выбор между схемой ГСП с *RC*-коррекцией и без коррекции.

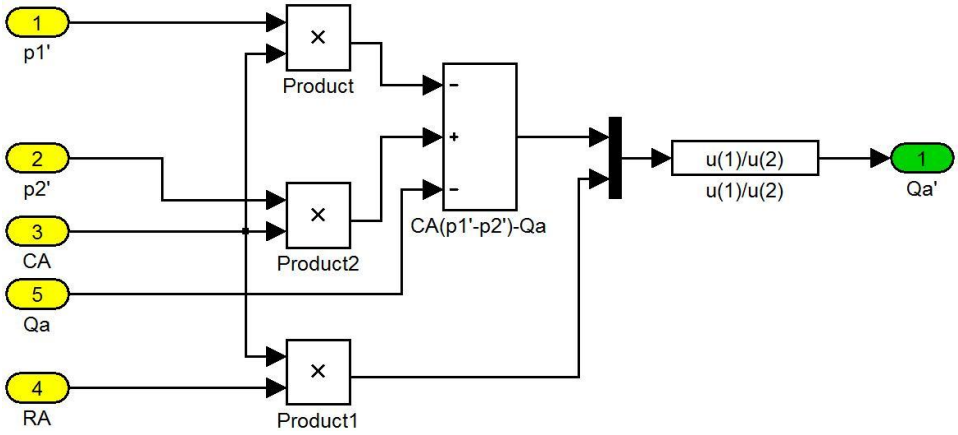


Рис. 4. Модель структурной схемы для неразрывности потока

Гидравлическое сопротивление дросселя для преобразованного уравнения (3) рассчитывается по известной методике [4] в блоках Rdr0 и Rdr1.

В среде моделирования «Simulink» состав модуля расчета сопротивлений имеет вид, который представлен на рис. 5. На структурной схеме (рис. 1) такая подсистема обозначена – «МОДЕЛЬ 4».

Для других вариантов систем управления производятся аналогичные преобразования соответствующие уравнениям 2, 3, 4. Моделирование производится по такому же принципу.

Рис. 5. Модель структурной схемы модуля для расчета сопротивления дросселя

Модель (рис. 1) так же позволяет исследовать возможности повышения динамического качества для всех систем управления ГСП при радиальном смещении оси шпинделя [9] с построением соответствующих частотных характеристик и ПП. Для этого необходимо в блоки ввода данных ввести значение настроечного зазора в базовой опоре ГСП h_1 (в обозначениях среды «Simulink» - h10) большим, либо меньшим значения половины суммарного зазора h_Σ (в обозначениях среды «Simulink» - h sum), на величину требуемого радиального смещения Δ оси шпинделя (рис. 6). Зазор в замыкающей опоре h_2 вычисляется в модели (рис. 1) автоматически.

Таким образом, результаты моделирования, получаемые при использовании разработанных моделей [10, 11], позволяют рассчитывать основные параметры СУ, сравнивать варианты в соответствии с конкретным заданием и выбрать оптимальное решение для поставленной задачи, использовать работу в различных режимах, провести проверки элементов на

прочность, пиковых значений и т.д.

Рис. 6. Ввод радиального смещения оси шпинделя
(фрагмент программы ввода исходных данных)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
2. Прокопенко В.А, Чернов. И.А. Динамическое качество корректированных RC-цепью шпиндельных гидростатических подшипников в различных областях колебательных движений // Теория механизмов и машин, 2005. – №2. – С. 54-58.
3. Бундур М.С., Прокопенко В.А, Чернов. И.А. Сравнительные исследования динамического качества при выборе системы управления шпиндельных гидростатических подшипников // Теория механизмов и машин, 2009. – № 2(14). – С. 19-27.
4. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Повышение виброустойчивости процесса резания путем улучшенпя динамических характеристик шпиндельных гидростатических подшипников // Металлообработка, 2009. – № 1(49). – С. 10-15.
5. Петков П.П., Прокопенко В.А. Чернов И.А. Аналитические исследования возможностей повышения виброустойчивости шпиндельных узлов станков на гидростатических опорах // Труды СПбГПУ - СПбГПУ, 2007 – №504, – С.137-148.
6. Прокопенко В.А., Чернов. И.А. Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при использовании схемы управления с регуляторами // Теория механизмов и машин, 2007. – № 1. – С. 45-50.
7. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов. И.А. Возможности схемы управления «насос-карман» в станочных гидростатических подшипниках // Теория механизмов и машин, 2008. – № 2. – С. 91-99.
8. 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.
9. Бундур М.С., Прокопенко В.А, Пелевин Н.А. Повышение эксплуатационно-технических характеристик технологического оборудования // На-

учн-технические ведомости СПБГПУ. Наука и образование.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – №4(159). – С. 121-127.
10. Пелевин Н.А., Бундур М.С. Применение системы «MATLAB SIMULINK» для проведения исследований гидростатических подшипников // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции.– СПб., 2012. – Ч.4: Механико-машиностроительный факультет. – С. 27-29.
11. Пелевин Н.А., Пискарев П.Ю., Прокопенко В.А. Исследование и анализ возможностей различных систем управления для шпиндельных гидростатических подшипников тяжелого расточного модуля // Научно-технические ведомости СПБГПУ. Наука и образование.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – №2(174). – С. 85-91.

M.S.Bundur, N. A.Pelevin, V.A.Prokopenko

POSSIBILITIES AND FEATURES OF PACKAGE MATLAB SIMULINK AT MODELLING OF CONTROL SYSTEMS OF HYDROSTATIC BEARING UNITS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Receptions of modelling of the differential equations presenting control systems by hydrostatic bearings, in package MATLAB Simulink are observed. The basic alternatives of systems are resulted. The sequence of implementation of dynamic model is presented. Results are drawn and recommendations are made.

Key words: software package, dynamic characteristics, system of the differential equations, modelling, the rig, hydrostatic bearing

REFERENCES

[1] Ivashhenko H.H. Avtomaticheskoe regulirovanie. Teorija i jelementy sistem. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 736 p. (rus.)
[2] Prokopenko V.A, Chernov. I.A. Dinamicheskoe kachestvo korrektirovannyh RC-cep'ju shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov v razlichnyh oblastjah kolebatel'nyh dvizhenij // Teorija mehanizmov i mashin, 2005. – №2. – Pp. 54-58. (rus.)
[3] 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, 2009. – № 2(14). – Pp. 19-27. (rus.)

[4] Bundur M.S., Prokopenko V.A., Chernov I.A. Povyshenie vibroustojchivosti processa rezanija putem uluchshenpja dinamicheskih harakteristik shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov // Metalloobrabotka, 2009. – № 1(49). – Pp. 10-15. (rus.)
[5] Petkov P.P., Prokopenko V.A. Chernov I.A. Analiticheskie issledovanija vozmozhnostej povyshenija vibroustojchivosti shpindel'nyh uzlov stankov na gidrostaticheskih oporah // Trudy SPbGPU - SPbGPU, 2007 – №504, – Pp.137-148. (rus.)
[6] Prokopenko V.A., Chernov. I.A. Dinamika shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov pri ispol'zovanii shemy upravlenija s reguljatorami // Teorija mehanizmov i mashin, 2007. – № 1. – Pp. 45-50. (rus.)
[7] Bundur M.S., Prokopenko V.A., Chernov. I.A. Vozmozhnosti shemy upravlenija «nasos-karman» v stanochnyh gidrostaticheskih podshipnikah // Teorija mehanizmov i mashin, 2008. – № 2. – Pp. 91-99. (rus.)
[8] 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.)
[9] Bundur M.S., Prokopenko V.A, Pelevin N.A. Povyshenie jeksplutacionno-tehnicheskih harakteristik tehnologicheskogo oborudovanija // Nauchn-tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Nauka i obrazovanie.– SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – №4(159). – Pp. 121-127. (rus.)
[10] Pelevin N.A., Bundur M.S. Primenenie sistemy «MATLAB SIMULINK» dlja provedenija issledovanij gidrostaticheskih podshipnikov // XLI Nedelja nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.– SPb., 2012. – Ch.4: Mehaniko-mashinostroitel'nyj fakul'tet. – Pp. 27-29. (rus.)
[11] Pelevin N.A., Piskarev P.Ju., Prokopenko V.A. Issledovanie i analiz vozmozhnostej razlichnyh sistem upravlenija dlja shpindel'nyh gidrostaticheskih podshipnikov tjazhelogo rastochnogo modulja // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Nauka i obrazovanie.– SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – №2(174). – Pp. 85-91. (rus.)

УДК 621.941

П.Ю. Пискарев[1], В.А. Шмаков[2]

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

[1]Павел Юрьевич Пискарев инженер-конструктор 2-ой категории, ОАО «Киров-Станкомаш» пр. Стачек, д. 47, лит. В, Санкт - Петербург, Россия.
Тел.: +7 (812) 702-01-04, E-mail: muradji@ya.ru

[2]Владимир Анатольевич Шмаков к.т.н., доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: shmakovgak@yndex.ru

Аннотация

В работе рассмотрено несколько аспектов диагностики металлорежущих станков, связанных с получением достоверных данных о техническом состоянии станка, возможностей использования диагноза для организации ремонта по фактическому состоянию, повышения уровня компетенции студентов за счет создания учебных стендов.

Ключевые слова: диагностика, узел станка, техническое состояние, спектральный анализ, ремонт, стенд.

Системы технической диагностики (СТД) создававшиеся в 70-х годах прошлого века были ориентированы на повышение надежности станков автоматов и автоматических линий [8]. На современном этапе диагностика металлорежущих станков (МРС) методами анализа сигнала вибрации позволяет провести оценку технического состояния станка без его разборки [1]. Однако недостатки характерные для вибрационных методов, в некоторых случаях не позволяют ограничиться применением только данных методов, так как возникают значительные сложности в постановке окончательного диагноза. Совмещая несколько методов безразборной диагностики [7,9,11,12 и др.] можно добиться многократного повышения достоверности и качества устанавливаемых диагнозов, что позволит использовать все преимущества обслуживания и ремонта станков по фактическому техническому состоянию.

Контроль и диагностика технического состояния узлов станка состоит из нескольких основных этапов:

1. Изучение объекта диагностики (выявление возможных дефектов).

2. Разработка диагностической модели.

3. Расчёт параметров диагностической модели.

4. Подготовка к проведению диагностики (установка датчиков, написание управляющих программ).

5. Проведение диагностических измерений.

6. Анализ полученных данных.

7. Проведение уточняющих диагностических измерений (если требуется).

8. Постановка экспертного заключения.

В данном исследовании объектами являются: токарный станок с ЧПУ модели TURN 155 (SerNo: A8F V01) и фрезерный станок с ЧПУ модели MILL 155 (SerNo: Q1F V01) австрийской фирмы EMCO, 2007 года выпуска. Средствами вибродиагностики на станке TURN 155 оценивается техническое состояние шпиндельного узла (ШУ), схема которого приведена на рис. 1, а. На станке MILL 155 - привод подачи по координате X (рис. 1, б).

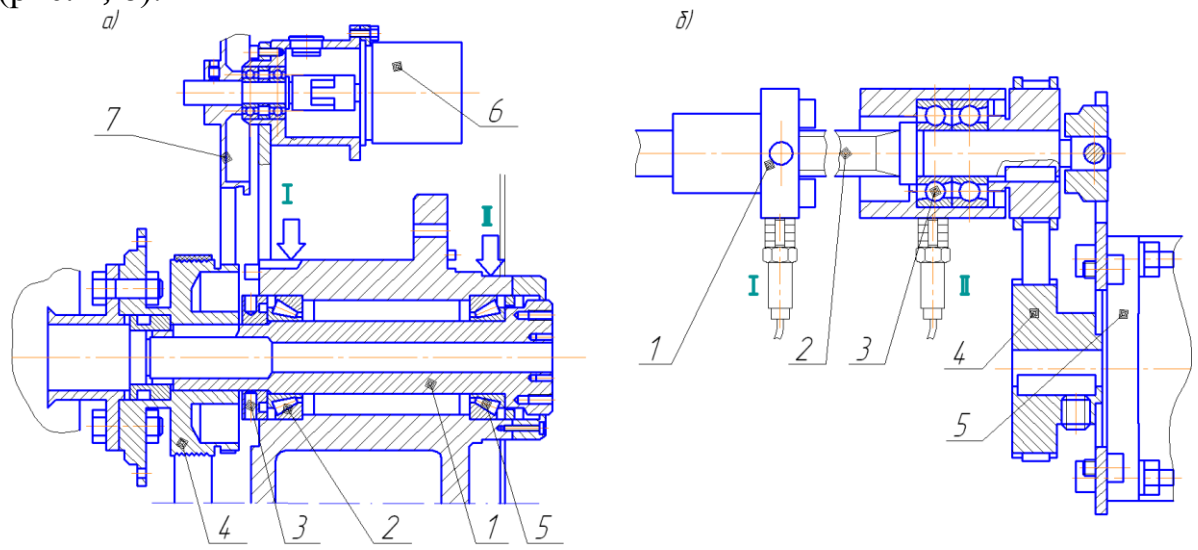


Рис. 1. Конструктивные схемы диагностируемых узлов станка TURN 155: а – шпиндельный узел, б – привод подач.

Шпиндель 1 (рис.1,а) установлен на двух конический подшипниках 2 и 5 типа 32009 XA-P5. Опоры имеют предварительный натяг, регулируемый гайкой 3. Поликлиновая ременная передача 4 связывает ШУ с двигателем. Зубчатая ременная передача 7 соединяет шпиндель с датчиком оборотов 6.

Привод подачи (рис. 1, б) содержит шаговый двигатель 5, зубчатую ременную передачу 4, опору 3 из двух шариковых радиально-упорных подшипников 7202 BEGBP, шариковый винт 2 и шариковую гайку 1.

Средства и методы и диагностики

При проведении вибродиагностики использовались следующие сред-

ства (разработчик и производитель ООО «Ассоциация ВАСТ»):

1. Вибропреобразователь (акселерометр) мод. 603
   - коэффициент преобразования (±20%): 100 мВ/g;
   - рабочий диапазон частот (неравномерность ± 3 дБ): 0,5...10000 Гц;
2. Двухканальный виброанализатор СД-21
   - количество каналов: 2 аналоговых канала, 1 канал синхронизации;
   - частотный диапазон: 0,5 - 25600 Гц; частотное разрешение: 400, 800, 1600 полос;
   - измеряемые величины: виброперемещение, виброскорость, виброускорение, электрическое напряжение и ток].
3. Программный комплекс мониторинга и автоматической диагностики DREAM32 v.4.0.

Для диагностики состояния подшипниковых опор ШУ вибропреобразователь необходимо установить наиболее близко к подшипникам. Выбранные точки установки вибропреобразователей (точки I и II) показаны на рис.1. Конструкция базовых деталей МРС не предусматривает мест установки преобразователей, а любые изменения конструкции (отверстие с резьбой, зачистка) требуют согласования.

Измерения вибрации ШУ станка TURN 155 проводились при холостом ходе и варьировании частоты вращения. Расчёт частот возбуждения выполнен в программе DREAM32 v.4.0 по известным соотношениям [2] и задании геометрических параметров диагностируемых элементов.

В табл.1 представлены численные значения основных частот возбуждения для ШУ на выбранных частотах вращения шпинделя.

Таблица 1

Основные частоты возбуждения для ШУ, Гц

Скорость вращения шпинделя	n_{BP}	*мин*$^{-1}$	1000	2000	3000	4000
Частота вращения шпинделя	F_{BP}		16,7	33,3	50,0	66,7
Частота вращения сепаратора	F_C		7,4	14,8	22,1	29,5
Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу	F_H		169,7	339,4	509,1	678,8
Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу	F_B	*Гц*	213,7	427,3	640,9	854,5
Частота вращения тел качения	F_{TK}		69,4	138,8	208,2	277,6
Частота вращения ведущего шкива	F_{BP1}		16,7	33,3	50,0	66,7
Частота вращения ведомого шкива	F_{BP2}		16,7	33,3	50,0	66,7
Частота вращения ремня	F_{BP3}		4,9	9,8	14,7	19,6

Обнаружение дефектов выполнено путём поиска основных и дополнительных диагностических признаков для каждого возможного дефекта в прямом спектре и спектре огибающей высокочастотного сигнала на основании рекомендаций [2,3].

Результаты диагностики.

На рис. 2 представлен прямой спектр вибросигнала подшипника 32009 XA-P5 в ШУ станка TURN 155. Вертикальными линиями выделены частоты, соответствующие расчётным частотам возбуждения. В спектре обнаружены дефекты: износ наружного кольца подшипника (гармонический ряд 1…3F_H) и дефекты тел качения (чётные гармоники 2F_{TK}, 6F_{TK}, с боковыми полосами (частотами), модулированными сепараторной частотой 2F_{TK}±F_C).

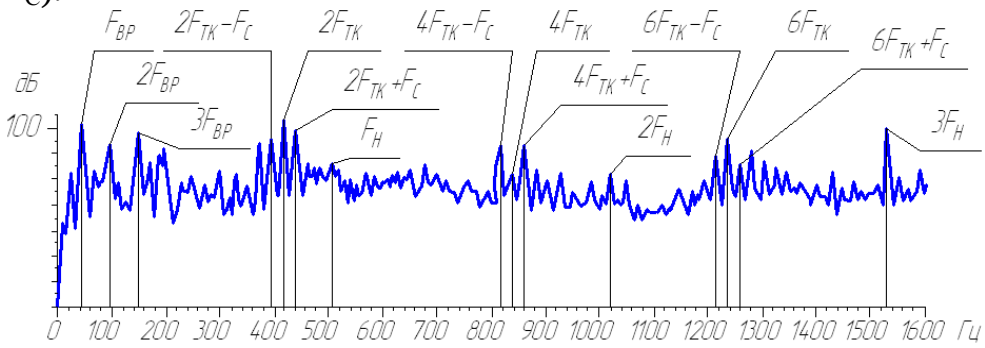


Рис. 2. Прямой спектр опоры ШУ (подшипник 32009) и частоте вращения шпинделя 3000 мин $^{-1}$

На рис. 3 представлен спектр огибающей высокочастотного сигнала, где обнаружены аналогичные дефекты: износ наружного кольца подшипника (частота F_H) слабой степени развития (модуляция 8%) и дефект тел качения (чётные гармоники 2F_{TK}, 4F_{TK}, 6F_{TK}, с боковыми полосами (частотами), модулированными сепараторной частотой F_C) средней степени развития (модуляция 16%).

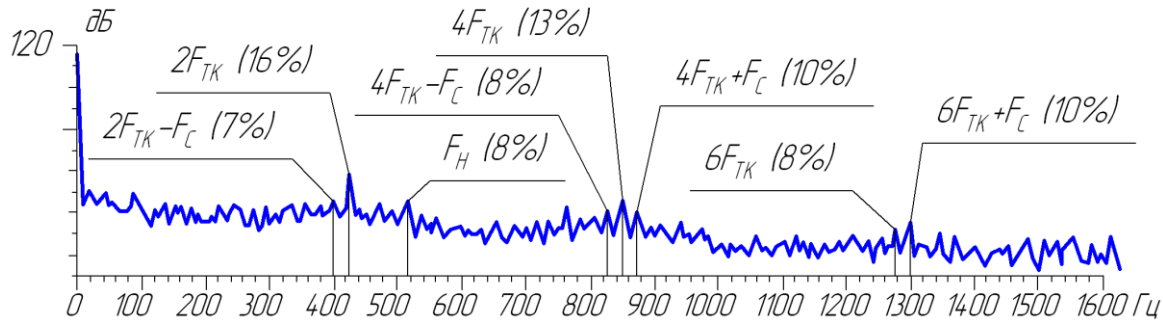


Рис.3. Спектр огибающей высокочастотного сигнала опоры ШУ

На рис. 4 представлен спектр огибающей высокочастотного сигнала при диагностике ременной передачи. Вследствие того, что ременная пере-

дача имеет передаточное отношение 1:1, частоты возбуждения ($F_{ВР}$; $F_{ВР1}$; $F_{ВР2}$) имеют численно одинаковые значения и потому не различимы. Обнаруженные в спектре огибающей частоты соответствуют дефектам боя шкива и износу ремня (гармонический ряд 1…3$F_{ВР}$, либо 1…3$F_{ВР1}$). Обнаруженный дефект имеет среднюю стадию развития (модуляция 8%).

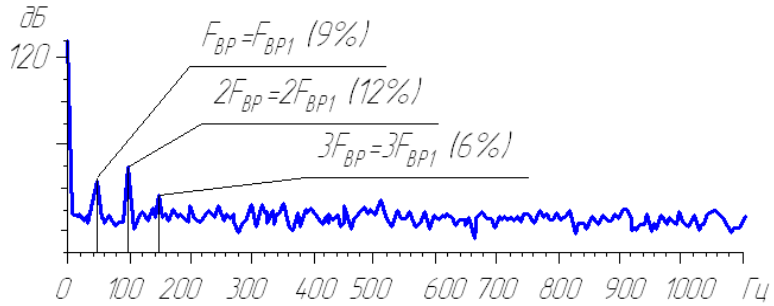


Рис. 4. Спектр огибающей высокочастотного сигнала при диагностике ременной передачи на частоте вращения шпинделя 3000 мин $^{-1}$

Диагностическая модель ШВП получена путем адаптации модели, существующей для подшипника качения, под диагностическую модель для ШВП. В табл. 2 представлены численные значения основных частот возбуждения для узла продольного хода стола на исследуемых скоростях подачи.

Таблица 2

Основные частоты возбуждения для узла продольной подачи стола

Скорость подачи стола	S_X	*мм/мин*	**1000**	**1500**	**2000**
Скорость вращения вала ШВП	$n_{ВР}$	*об/мин*	200	300	400
Частота вращения вала ШВП	$F_{ВР}$	*Гц*	3,3	5,0	6,7
Частота вращения сепаратора	F_C		1,3	2,0	2,7
Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу	F_H	*Гц*	14,7	22,1	29,5
Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу	F_B		21,9	32,8	43,8
Частота вращения тел качения	$F_{ТК}$		6,3	9,5	12,6
Частота вращения ведущего шкива	$F_{ВР1}$		2,7	4,0	5,4
Частота вращения ведомого шкива	$F_{ВР2}$		3,3	5,0	6,7
Частота вращения ремня	$F_{ВР3}$		1,6	2,4	3,1
«Зубцовая» частота	F_Z		157,1	235,6	314,2
Частота вращения тел качения в ШВП	$F_{ТКш}$		8,6	13,1	17,6

На рис. 5 представлен прямой спектр подшипника опоры ШВП, а на рис. 6 – спектр огибающей высокочастотного сигнала, полученный с датчика, установленного на гайке ШВП.

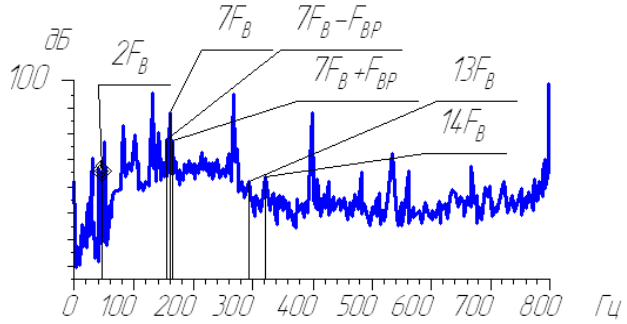


Рис. 5. Прямой спектр вибрационного сигнала подшипника 7202 опоры ШВП при $n_{ВР}$ =200 мин$^{-1}$.

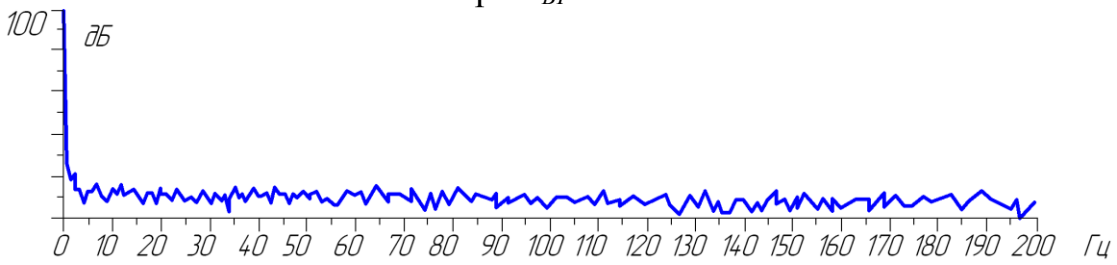


Рис. 6. Спектр огибающей высокочастотного сигнала при диагностике ШВП на скорости подачи стола 1000 мм/мин.

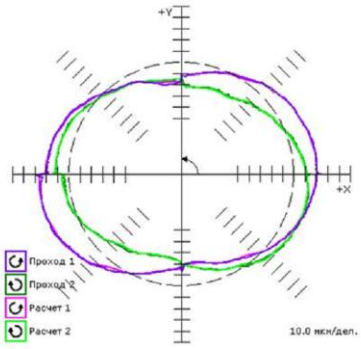
Диагностика узла ШВП (пара винт – гайка качения) не выявила дефектов в узле, что может быть связанно как с хорошим состоянием ШВП, так и с неточностью диагностической модели [3]. Для окончательной проверки разработанной диагностической модели необходимы специальные исследования, в том числе другими методами, например [11] или [12].

На фрезерном станке с ЧПУ MILL 155 проведено исследование согласованности работы приводов стола с использованием системы Renishaw ballbar QC10 [11]. На рис. 7 представлены результаты одного из экспериментов, полученные при обходе по программе окружности радиуса 50 мм в средине стола.

Программный комплекс диагностики по методике Renishaw в автоматическом режиме выполняет анализ полученной опытным путем круглограммы и рассчитывает процентный вклад погрешностей в общее отклонение от круглости, а также численные значения погрешностей. Для подтверждения результатов диагностики Renishaw и принятия окончательного решения по возможным источникам погрешностей, приводящим к отклонению от круглости траектории, выполнен ряд испытаний на точность согласно [4. 5].

Результаты проверок подтверждают предположение о наличие механического износа направляющих и ШВП и его определяющего влияния на

погрешность отклонения от круглости траектории. Значения измеренных погрешностей совпадают со значениями определёнными при диагностике с использованием системы Renishaw.



Середина стола, радиус 50 мм, вращение на 360 град, подача 1000 мм/мин

Отклонение от круглости	53,2 мкм
Отклонение от перпендикулярности	38,8 мкм/м
Рассогласование приводов	0,50 мс
Отклонение от прямолинейности X	4,6 мкм/м
Отклонение от прямолинейности Y	1,4 мкм/м
Рассогласование шкал	66,9 мкм
Люфт X	4,9 мкм
Люфт Y	4,4 мкм
Выбросы обратного хода X	3,4 мкм
Выбросы обратного хода Y	2,9 мкм

Рис.7. Результаты теста (методика Renishaw ballbar) для середины стола.

Выводы

1. Результаты однократной вибрационной диагностики элементов механической системы металлорежущего станка позволяют зафиксировать наличие дефектов и идентифицировать деталь, к которой данный дефект относится. Степень развития дефекта определяется с большой погрешностью, так как величина «сильного» дефекта, заложенная в программный комплекс мониторинга и автоматической диагностики, может существенно отличаться от фактического.

2. Широко разрекламированная возможность осуществить ремонт оборудования по фактическому состоянию путем замены выявленной дефектной детали, по крайней мере применительно к металлорежущим станкам, вряд ли может быть технически осуществлена и экономически оправдана. Ряд дефектов, таких как дисбаланс патрона, механические ослабления конструкции ШУ могут быть устранены силами ремонтных служб отдела главного механика. Дефекты опор качения шпиндельных узлов, зубчатых передач коробок скоростей, шарико-винтовых передач и т.п. требует значительных по объему разборочно-сборочных работ и привлечения высококвалифицированного персонала.

3. Наибольший эффект вибрационная диагностика может принести при использовании ее методов в процессе изготовления и сборки МРС, так как позволяет установить ряд дефектов, которые другими методами идентифицировать сложно, а в ряде случаев невозможно. Для того, чтобы иметь возможность провести вибродиагностику в процессе эксплуатации МРС в конструкции должны быть предусмотрены места установки первичных преобразователей (минимальные затраты), в то время как встроен-

ные системы для вибродиагностики механики станка сегодня экономически не целесообразны.

Учебные стенды

Постановка достоверного диагноза о техническом состоянии металлорежущего станка, учитывая большое количество источников возбуждения вибрации, часто затруднена. Потому, важными задачами являются совершенствование методической базы, а также разработка и внедрение учебных стендов, позволяющих проводить обучение в условиях меняющихся настроек привода, дисбаланса, зазора-натяга подшипниковых опор и т.п. На кафедре «Станкостроение» разработаны несколько учебных стендов. Ниже дается описание одного из них.

Стенд вибрационной диагностики обладает не только учебным, но и научно-исследовательским потенциалом [14]. В рамках учебной программы функциональное назначение стенда можно разделить на следующие основные составляющие:

a) измерение вибрации и диагностика состояния опор ШУ;
b) измерение вибрации и диагностика состояния электродвигателя;
c) измерение вибрации и диагностика состояния ременной передачи;
d) балансировка вала в собственных опорах.

Структурная схема стенда представлена на рис.7.

Стенд представляет собой систему, состоящую из двухопорного вала 1, в передней опоре которого установлен радиальный роликовый подшипник 2 с короткими цилиндрическими роликами (тип 3182112 по ГОСТ 7634-75). В конструкции предусмотрена возможность изменять радиальный зазор-натяг в подшипнике 2. В задней опоре стенда установлены сдвоенные (по схеме О-дуплекс) шариковые радиально-упорные подшипники 4 (тип 246110 по ГОСТ 832-78). Вращение от асинхронного электродвигателя 6 на вал передаётся через клиноременную передачу 5. Изменение частоты вращения электродвигателя осуществляется частотным преобразователем 7. Внешняя нагрузка на вал задаётся и контролируется устройством нагружения 8.

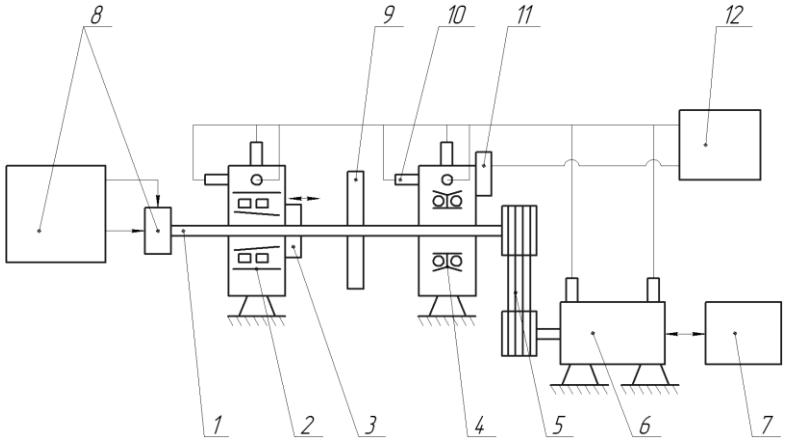


Рис. 7. Структурная схема учебного стенда

Между опорами вала установлен диск 9 с отверстиями по периферии, предназначенный для проведения испытаний по балансировке вала в собственных опорах. Вибрация на подшипниковых опорах вала и электродвигателя измеряется датчиками виброускорения 10 (акселерометрами), сигналы с которых, совместно с сигналом датчика оборотов 11, измеряющим скорость вращения вала, передаются на согласующий вход виброанализатора 12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркова Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: Учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003, – 160 с.
2. Баркова Н. А., Борисов А. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Расчёт основных частот вибрации узлов машин, параметров измерительной аппаратуры и практическая экспертиза: учеб. пособие / Н. А. Баркова, А. А. Борисов: СПбГМТУ. – СПб.. 2009. – 111 с.
3. А. В. Барков, Н. А. Баркова. Особенности диагностики низкооборотных подшипников качения [Электронный ресурс] // http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/18
4. ГОСТ 17734-88. Станки фрезерные консольные. Нормы точности и жесткости.
5. ГОСТ 30544-97. Станки металлорежущие. Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории.
6. Диагностика и мониторинг шпиндельных узлов металлорежущих станков / Козочкин М.П. [и др.] // СТИН. 2013. № 6. – С. 2–5.
7. Идрисова Ю.В., Кудояров Р.Г., Фецак С.И. Диагностика технического состояния приводов металлорежущих станков по параметрам качества обработанных поверхностей. //СТИН. – 2013. № 5. – С 6 - 9.
8. Надежность и диагностирование технологического оборудования. Изд-во «Наука». 1987. –231 с.
9. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования.: Учеб. пособие /СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. –384 с.
10. Савинов Ю. И. Современная комплексная безразборная диагностика технического состояния станков // СТИН. 2008. №9. –С. 21–26.
11. Телескопические системы Renishaw ballbar [Электронный ресурс] // http://www.renishaw.ru/ru/telescoping-ballbar-systems--6813
12. Фельдман В.Д. Некоторые особенности диагностирования технического состояния машин и механизмов с использованием приборов

кинематического контроля (кинематомеров) // http://oookin.ru/articles.html.
13. Шалаев Ф.Н., Строгий В.Г.. Алгоритм вибрационной диагностики узла механизма /Контроль. Диагностика. // 2013. № 2. – С.41-47.
14. А.с. СССР № 672532, G 01M 13/02. Способ оценки технического состояния механизма / Ф.Н. Шалаев. Опубл. 15.07.79 // Бюл. 1979. № 25.

P.Yu. Piskarev [1], V.A. Shmakov [2]

METODOLOGICAL AND TECHNICAL PROBLEM OF MACHIN TOOL DIAGNOSIS

[1] St.Petersburg OAO "Kirov-Stankomash", Russia;
[2]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The paper considers several aspects of diagnosis of machine tools related to obtaining reliable data on the technical condition of the machine, the possibilities of running diagnostics for organizing the actual state of repair and improving the competence of students via creating educational stands.

Key words: diagnostics, machine tool node, technical state, spectral analysis, repair, mount.

REFERENCES

[1] Barkov N. A. Vvedenie v vibroakysticheckyu diagnostiky rotornyx mashin i oborydovaniya: Ycheb. posobie. SPb.: Izd. Chentr SPbGMTY, 2003, – 160 p. (rus.)
[2] Barkova N. A., Borisov A. A. Vibrazionnaya diagnostiky mashin i oborydovaniya. Raschet osnovnych chastot vibrazii yzlov mashin, parametrov izmeritelnoy apparatyry i prakticheskaya xhpertiza: Ucheb. posobie. SPb.: Izd. Chentr SPbGMTY, 2009, – 111 p. (rus.)
[3] Barkov N. A., Barkova N. A. Osobennosti diagnostiki nizkooborotnych podshipnikov kachenya // http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/18 (rus.)
[4] GOST 17734-88. Stanki frezernye konsolnye. Normy tochnosti i gestkosti. (rus.)
[5] GOST 30544-97. Stanki metalloregychye. Metody proverki tochnosti i postoyanstva otrabotki krygovoy traektorii. (rus.)

[6] Diagnostika i monitoring shpindelnyx uzlov metalloreguchix stankov /Kozochkin M.P. [i dr.] //STIN. 2013. № 6. – Pp. 2–5. (rus.)
[7] Idrisova Yu., V., Kudoyarov R. G., Fezak S.I. Diagnostika technicheskogo sostoyaniya privodov mttalloreguchix stankov po parametram kachestva obrabotannyx poverchnosteyu. //STIN. 2013. № 5. – Pp. 6–9. (rus.)
[8] Nadegnost i diagnostika technologicheskogo oborudovaniya. Izd. Nauka, 1987. –231 p. (rus.)
[9] Nosov V. V. Diagnostika mashin i oborudovaniya.: Ucheb. Posobie. /SPb.: Izd. Politexn. Univ., 2012. –384 p. (rus.)
[10] Savinov Yu. I. Sovremennaya kompleksnaya bezrazbornaya diagnostika texnicheskogo sostoyaniya stankov //STIN. 2008. № 9. – Pp. 21–26. (rus.)
[11] Teleskopicheskie system Renishaw ballbar // http://www.renishaw.ru/ru/telescoping-ballbar-systems--6813 (rus.)
[12] Feldman V.D. Nekotorye osobennosti diagnostirovaniya texnicheskogo sostoyaniya mashin I mexanizmov s ispolzovaniem priborov kinematicheskogo kontrolya (kinevatometrov) // http://ookin.ru/articles.html. (rus.)
[13] Shalaev F. N., Strogi V.G. Algoritm vibrazionnou diagnostiki uzla mexanizma. /Kontrol. Diagnostika. //2013. № 2. – Pp.41-47 (rus.)
[14] A.s. SSSR № 672532, G 01M 13/02. Sposob ozenki texnicheskogo sosnoyaniya mexanizma /F.N. Shalaev. Opub. 15.07.79 // b. 1979. № 25. (rus.)

УДК 621.9.02

Е.Н. Сенькин[1], А.А. Окунев[2]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

[1]**Евгений Николаевич Сенькин**, к.т.н., доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия. Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

[2]**Александр Анатольевич Окунев**, доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия. Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

Аннотация

Рассматривается алгоритм определения числа эффективных режущих инструментов, основу которого составляет идея сканирования пространства параметров проектируемого инструмента или условий его эксплуатации методом ЛП – поиска, являющегося некоторым аналогом случайного поиска. Численный эксперимент на ЭВМ по определению эффективных условий фрезерования закаленной стали ступенчатой фрезой с композитом подтвердил пригодность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: оптимизация, ЛП-поиск, режущий инструмент, композиты, фрезерование.

Задачи оптимального проектирования режущего инструмента и определения наилучших условий его эксплуатации, которые в совокупности можно представить как синтез эффективного инструмента, решаются в рамках векторной оптимизации в два этапа [4, 7, 8]. На первом этапе, в результате машинного эксперимента, по известным параметрическим, функциональным и критериальным ограничениям определяется допустимое множество конструкций инструмента или условий его работы [3]. Используя известные методы теории принятия решений на множестве допустимых конструкций, осуществляется поиск эффективных инструментов. При такой постановке задачи синтеза любого инструмента множество его эффективных конструкций может быть найдено в режимах алгоритмических или диалоговых процедур конструктора с ЭВМ. При этом трудоемкость

различных алгоритмов определения множества эффективных инструментов различна. Отсюда очевидна значимость возможности предварительного, хотя бы и достаточно приближенного, определения числа эффективных (парето-оптимальных) режущих инструментов $|И^{П}|$. «Априорная» оценка числа $|И^{П}|$ позволяет не только сократить трудоемкость всего процесса автоматизированного проектирования инструмента и расход машинного времени, но и быстро менять стратегию конструктора, как на этапе внутреннего (параметрического) проектирования инструмента и расход машинного времени, так и на этапе формирования его «облика» (внешнего проектирования) [6].

В работе на примере фрезерования закаленной стали ХВГ (HRC 45-60) восьми ступенчатой торцевой фрезой (радиус первой ступени $R_1 = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $\Delta R_i = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi_{1i} = 15^{\circ}$, $\varphi_i = 35^{\circ}$, $\gamma_i = -5^{\circ}$, $\alpha_i = 8^{\circ}$, угловой шаг $\xi_i = 45^{\circ}$, $t_{\Sigma} = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м, $t_i = 2 \cdot 10^{-4}$ м, $i = \overline{1{,}8}$), оснащенной композитом 01 [5, 9], рассматривается алгоритм определения числа эффективных условий работы инструмента, который является составной частью задачи синтеза эффективного режущего инструмента. В состав набора критериев K_{ν} ($\nu = \overline{1{,}6}$), по которым оценивается условия обработки x_j ($j = \overline{1{,}3}$): ширина фрезерования $B \equiv x_1$, подача на оборот (ступень) $S_{об} \equiv x_2$ и скорость резания $V \equiv x_3$, вошли: K_1 - суммарная мощность гармоник периодической возмущающей силы резания при ступенчатом фрезеровании, K_2 - шероховатость обработанной поверхности (параметр R_a, мкм), K_3 – интенсивность процесса резания (м^3/мин), K_4 - стойкость фрезы (мин), K_5 - температура резания (°К) и K_6 - удельный расход композита 01 (мг/г).

Функциональная зависимость критериев K_{ν} от варьируемых параметров x_j определяется в виде традиционных эмпирических зависимостей [7]. Параметры x_j изменяются в пределах

$$0{,}030 \text{ м} \le x_1 \le 0{,}060 \text{ м};\ 0{,}025 \text{ мм/об} \le x_2 \le 0{,}05 \text{ мм/об};\ 1{,}16 \text{ м/с} \le x_3 \le 5{,}23 \text{ м/с} \quad (1)$$

Вычисление критериев K_{ν} в пространстве (1) - $D_x(x_1; x_2; x_3)$ осуществляются с использованием метода ЛП$_{\tau}$- поиска [10], который является некоторым аналогом глобального случайного поиска. Координаты $x_j^{(i)}$ ($i = \overline{1, N}$) в которых вычисляются значения критериев оптимальности, определяются как

$$x_j^{(i)} = x_j^H + q_j^{(i)}\left(x_j^B - x_j^H\right). \quad (2)$$

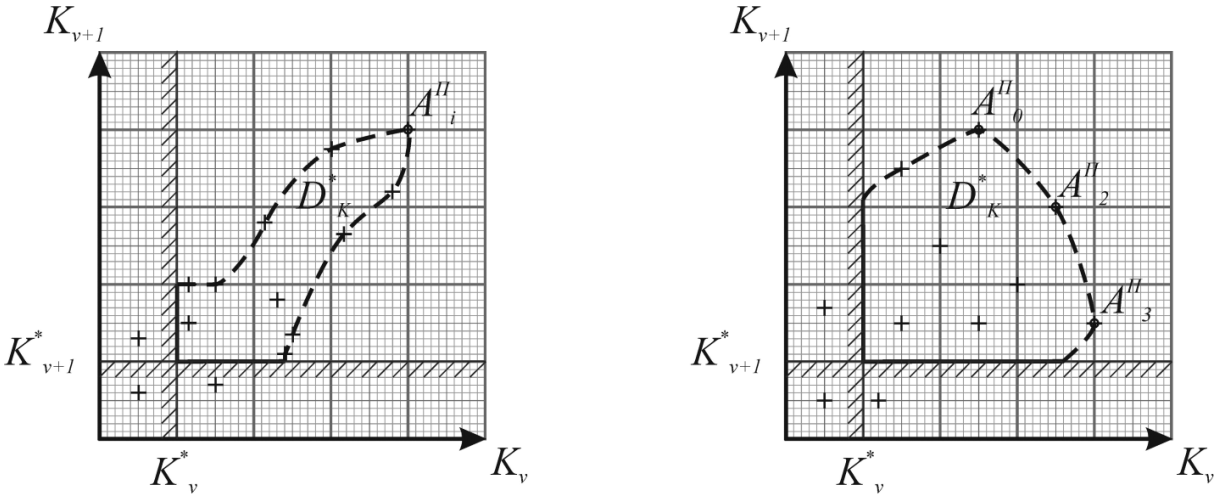
Здесь i – номер пробной точки x_j в D_x и $q_j^{(i)}$ – параметр Соболя [10]. Алгоритм их вычисления приводится в [10]. В нашем случае число пробных точек выбираются равным $N = 64{,}128$ и 256. По результатам расчета критериев в пробных точках строятся таблицы испытаний, в которых, в за-

висимости от поведения критериев ($K_\nu \to \max$ или $K_\nu \to \min$), массив значений $\{K_\nu(x_j^{(1)}),...K_\nu(x_j^{(N)})\}$ упорядочивается по схеме

$$\text{или} \begin{matrix} K_\nu(x_j^{(1)}) \ge K_\nu(x_j^{(2)}) \ge ...K_\nu(x_j^{(l)}) \ge ...K_\nu(x_j^{(l_\partial)}) = K_\nu^* \ge ...K_\nu(x_j^{(N)}) \\ K_\nu(x_j^{(1)}) \le K_\nu(x_j^{(2)}) \le ...K_\nu(x_j^{(l)}) \le ...K_\nu(x_j^{(l_\partial)}) = K_\nu^{**} \le ...K_\nu(x_j^{(N)}) \end{matrix} \quad (3)$$

Здесь K_ν^*, K_ν^{**} - критериальные ограничения, выбираемые конструктором на основании своего опыта или интуиции, индексы $1,2,...l,...N$ – указывают на порядок расположения критериев в таблице и $l_\partial = N_\partial$ $(1 < N_\partial < N)$– число допустимых конструкций (или условий обработки).

Для определения числа эффективных инструментов целесообразен переход к критериальному пространству K_ν (рис.1), в котором множеству допустимых конструкций соответствует множество $D_к^*$ $(D_к^{**})$ допустимых оценок A_i $(i = \overline{1, N_\partial})$, среди которых находятся и эффективные оценки $A_i^П$, причем их число $|A^П| = |И^П|$.



$K_v \to max,\ K_{v+1} \to max$
$|A^П| = 1$

$1 < |A^П| = 3 < N_\partial$

Рис. 1. Расположение эффективных оценок в плоскости критериев

Число эффективных оценок зависит от геометрии множества $D_к^*$ $(D_к^{**})$ (рис. 1) и, очевидно, $1 \le |A^П| \le N_\partial$, т.е. 1 - является точной нижней оценкой числа $|A^П|$. Для определения верхней оценки числа $|A^П|$ область $D_к^*$ $(D_к^{**})$ преобразуется следующим образом, используя условия упорядочивания критериев (3) в таблице испытаний, значения K_ν (а значит и оценки $A(K_\nu)$) можно строго ранжировать по номеру l_ν $(l_\nu = \overline{1, l_\partial})$ занимаемого ею места в таблице. Тогда при определении числа эффективных оценок можно использовать значения ранговых векторов $\bar{l}_\nu(\bar{l}_1,....\bar{l}_m)$, $\bar{l}_1(l_1^{(1)}, l_1^{(2)}...\bar{l}_1^{(l_\partial)})$.... Так, на-

пример, для пары критериев $K_1 - K_3$ из набора K_{1-6}, при ограничениях $K_1^{**} = 3 \cdot 10^3$ и $K_3 = 2 \cdot 10^{-6}$ м^3/мин, множество допустимых оценок $N_\partial = 12$. Ранжирование критериев K_1, K_3 и их нормализованных значений $\overline{K}_1$, $\overline{K}_3$ [7] представлено в таблице 1. Используя данные таблицы 1, в плоскости критериев $K_1(\overline{K}_1) - K_3(\overline{K}_3)$ строится область допустимых оценок $D_к$ (рис. 2), представляющая собою сетку целочисленных значений $l = 1,2,.....\ l_\partial = 12$ в виде квадрата, на которую наносятся значения A_i. Очевидно, что такое графическое представление множества допустимых оценок, позволяет построить его аналог в виде матрицы:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} \overline{K}_1 \\ \overline{K}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Таблица 1.

Фрагмент упорядоченной таблицы испытаний

l	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	10	33	55	49	39	12	19	42	56	40	30	28
$\frac{K_1 \cdot 10^2}{\overline{K}_1}$	$\frac{10{,}621}{0{,}000}$	$\frac{14{,}806}{0{,}256}$	$\frac{16{,}302}{0{,}347}$	$\frac{18{,}096}{0{,}451}$	$\frac{20{,}704}{0{,}617}$	$\frac{21{,}490}{0{,}665}$	$\frac{21{,}555}{0{,}669}$	$\frac{22{,}135}{0{,}705}$	$\frac{22{,}526}{0{,}728}$	$\frac{24{,}645}{0{,}858}$	$\frac{25{,}824}{0{,}918}$	$\frac{26{,}952}{1{,}000}$
i	10	49	42	33	12	40	30	39	28	55	56	19
$\frac{K_3 \cdot 10^{-6}}{\overline{K}_3}$	$\frac{2{,}259}{0{,}000}$	$\frac{2{,}339}{0{,}023}$	$\frac{2{,}530}{0{,}080}$	$\frac{2{,}969}{0{,}211}$	$\frac{3{,}120}{0{,}256}$	$\frac{3{,}148}{0{,}264}$	$\frac{3{,}270}{0{,}300}$	$\frac{3{,}457}{0{,}356}$	$\frac{3{,}601}{0{,}399}$	$\frac{3{,}840}{0{,}470}$	$\frac{3{,}843}{0{,}471}$	$\frac{5{,}620}{1{,}000}$

Переход от таблицы испытаний к матричной форме представления (4) множества допустимых оценок в виде булевых переменных (т. е. чисел 0,1) и ее графическому аналогу (рис. 2) имеет двойственное значение. Во-первых, появляется возможность построить простой алгоритм поиска эффективных оценок [7] и, во-вторых, определить точную верхнюю оценку

числа $|A^{П}|$, а значит и числа $|И^{П}|$. На двумерной решетке $D_к$ (рис. 2) строится семейство гиперплоскостей:

$$Г(0), Г(1) \to \overline{K}_1^{(1)} + \overline{K}_3^{(1)} = 1, ...Г(l) \to \overline{K}_1^{(l)} + \overline{K}_3^{(l)} = l, ...Г(2l_o). \quad (5)$$

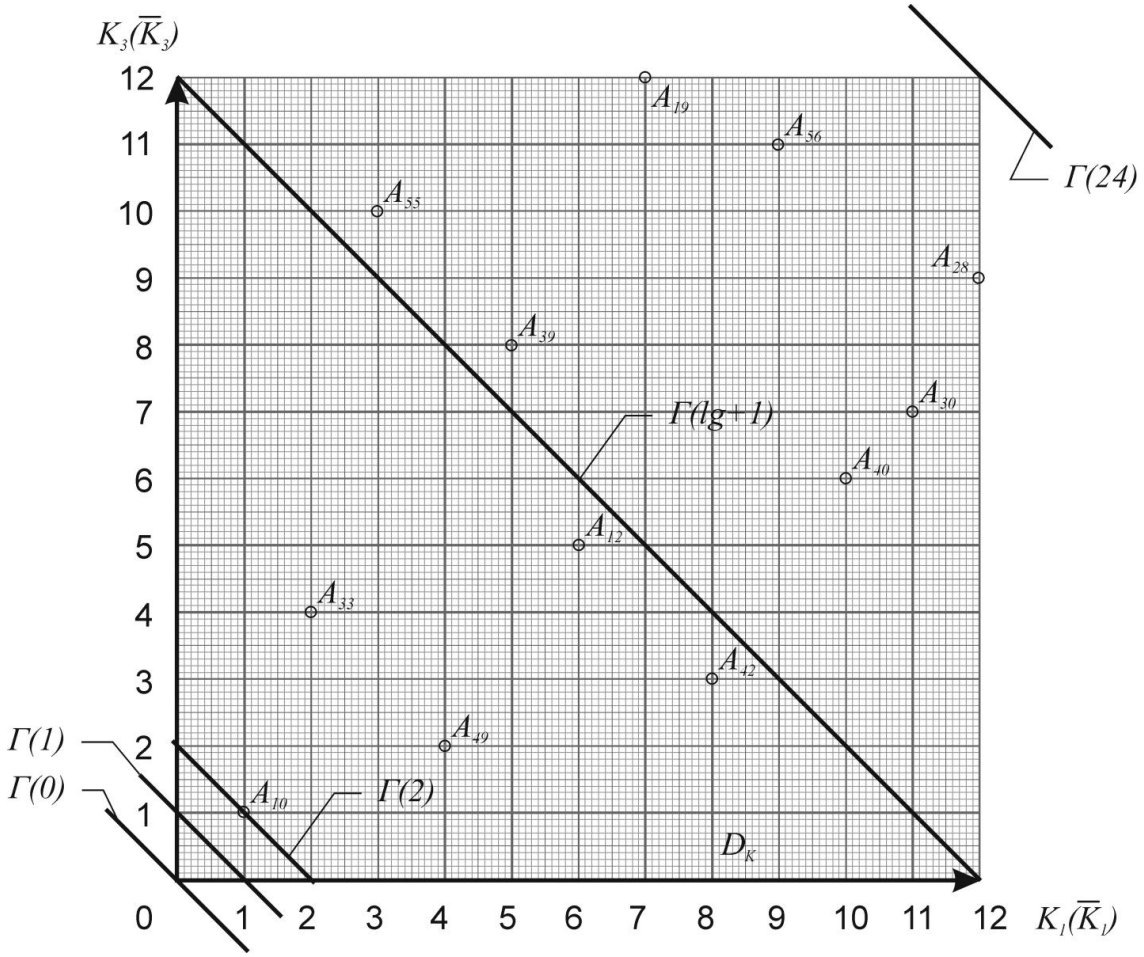


Рис. 2. Сетка (решетка) ранжированных критериев оптимальности $\overline{K}_1$, $\overline{K}_3$ ступенчатого фрезерования

Тогда искомое число эффективных оценок лежит на некоторой гиперплоскости $Г(l^*)$ из семейства (5). Для поиска $Г(l^*)$ и определения $|A^{П}|$, в рамках комбинаторного анализа, предложены следующие формулы [2], использование которых в практике инженера –конструктора весьма затруднительно.

В работе рассматриваются приближенный вариант вероятностного метода вычисления $|A^{П}|$ ($|И^{П}|$) [1]. Так как $ЛП_\tau$ – поиск пробных точек в пространстве параметров есть некоторый аналог случайного поиска, то, в первом приближении, можно считать, что и множество оценок есть аналог случайных величин. В работе [1] показано, что распределение эффективных оценок определяется лишь числом допустимых оценок и числом

критериев и среднее число $\left|A^{П}\right|$ выражается через математическое ожидание $M(N_{д},m)$ следующим образом:

$$\left|A^{П}\right| = M(N_{д},m) = \sum_{l=1}^{N_{д}} \frac{1}{l} M_{l}(m-1), \qquad (6)$$

где m – число критериев, по которым оценивается инструмент. Для соотношения (6) справедливы начальные условия $M(N_{д},1)=1$ и $M(1,1)=1$. При проектировании режущего инструмента (или выборе наилучших условий его эксплуатации) по двум критериям ($m=2$) после несложных преобразований формулы (6) получается следующее соотношение для определения среднего числа эффективных инструментов

$$\left|И^{П}\right| = \sum_{l=1}^{N_{д}} \frac{1}{l} = 1 + \frac{1}{2} + \ldots + \frac{1}{l} \quad . \qquad (7)$$

При малом числе допустимых конструкций ($N_{д} \le 10$) вычисление $\left|И^{П}\right|$ производится непосредственно суммированием членов ряда (7), при $N_{д} > 10$ можно использовать асимптотику ряда (7)

$$\left|И^{П}\right| \approx \ln N_{д} + C \quad . \qquad (8)$$

где $C = 0{,}577...$ – постоянная Эйлера. При многокритериальной оптимизации инструмента, когда число критериев равно трем, формула (6) приводится к виду

$$\left|И^{П}\right| = \sum_{l=1}^{N_{д}} \frac{1}{l} M(l,2) = 1 + \frac{M(2,2)}{2} + \frac{M(3,2)}{3} + \ldots \frac{M(l,2)}{l} \quad . \qquad (9)$$

При значениях $N_{д} > 100$ из (8) следует асимптотическая оценка для числа эффективных инструментов

$$\left|И^{П}\right| \approx \frac{1}{2} \ln^{2} N_{д} \quad . \qquad (10)$$

При значениях $N_{д} < 10$ величина $\left|A^{П}\right|$ определяется непосредственно из формулы (9), при $10 < N_{д} < p \cdot 10$ ($p = \overline{1,10}$)

$$\left|И^{П}\right| \approx \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{10+p}\right) \ln^{2} N_{д} \quad . \qquad (11)$$

Для проверки формул (8-11) был проведен машинный эксперимент по расчету условий фрезерования (x_1, x_2, x_3) закаленной стали ХВГ ступенчатой фрезой с использованием набора критериев $K_1 ... K_6$. Конструктор, исходя из имеющейся у него информации об условиях эксплуатации будущего инструмента, может сформировать из набора K несколько групп равноправных критериев. Например, C_6^2 групп по два критерия:

$$\{K_{\nu}, K_{\nu'}\}: (K_1, K_3), (K_1, K_4), \ldots \quad (\nu \neq \nu',\ \nu = \overline{1,6},\ \nu' = \overline{2,5}) \qquad (12)$$

или C_6^3 групп по три критерия:

$$\{K_1, K_2, K_6\},\ \{K_1, K_5, K_6\},\ \{K_1, K_4, K_6\} \text{ и т.д.} \qquad (13)$$

Подобная группировка локальных критериев качества и работоспособности режущего инструмента на первом этапе решения позволяет определить допустимое множество конструктивных или технологических решений, эффективных оценок и, в конечном счете, оптимальный инструмент (или режим работы) из решения двух- или трехкритериальной задачи оптимизации.

Используя предположения (12, 13) и комбинацию методов поиска эффективных оценок, например, метод прямоугольников – геометрический аналог свертки критериев Гермейера или алгоритм изложенный выше (рис. 3), находится на множестве $N_д$ число эффективных оценок $|A^П|$ ($|И^П|$) и сравнивается с расчетными их значениями. Результаты машинного эксперимента для случая двух критериев, проведенного при критериальных ограничениях: $K_1^{**} = 3 \cdot 10^3$, $K_4^{*} = 100$ мин., $K_6^{**} = 2 \cdot 10^{-2}$ мг/г, $K_5^{**} = 1123$ °К и $K_3^{*} = 2 \cdot 10^{-6}$ м^3/мин и результаты расчетов по формуле (8) представлены в таблице 2. Координаты найденных эффективных оценок $A^П(K_\nu, K_{\nu'})$ и соответствующих им эффективных условий фрезерования закаленной стали ХВГ представлены в таблице 3.

При машинном проектировании эффективного режущего инструмента с учетом трех критериев и более, истинное допустимое множество оценок определяется как пересечение множеств допустимых оценок, входящих пар критериев.

Так, например, для тройки критериев K_1 - K_4 - K_6

$$N_д(K_1, K_4, K_6) = N_д(K_1, K_4) \cap N_д(K_1, K_6) \cap N_д(K_4, K_6)$$

Таблица 2.

Расчетные и экспериментальные значения числа эффективных оценок ($m = 2$)

Пары критериев $K_\nu - K_{\nu'}$	N	$N_д$	$\|A^П\|$	$M(N_д, 2)$
$K_1 - K_4$	64 128 258	18 30 53	2 2 5	3,50 3,99 4,55
$K_1 - K_6$	64 128 256	15 30 48	4 5 6	3,32 4,00 4,46
$K_4 - K_6$	64 128 256	18 40 61	4 5 4	3,50 4,27 4,67
$K_3 - K_4$	64 128 256	16 29 40	3 6 4	3,38 3,96 4,27
$K_1 - K_3$	64 128 256	12 25 46	3 4 5	3,10 3,82 4,41

Используя имеющиеся таблицы испытаний, истинное допустимое

множество условий фрезерования закаленной стали ХВГ восьмиступенчатой фрезой с учетом например, критериев $\{K_1, K_4, K_6\}$ и $\{K_1, K_4, K_3\}$ определяется оценками, приведенными в таблице 4. Значения $M(N_\partial,3)$ вычисляются по формуле (9) и (11) (под чертой).

Таблица 3.

Параметры эффективного фрезерования стали ХВГ ($m=2, N=64$)

Критерии $K_\nu - K_{\nu'}$	Координаты оценок $A_i^{\Pi}(K_\nu, K_{\nu'})$	Координаты эффективных условий фрезерования $S\cdot10^{-2}$ мм/об, V м/с, $B\cdot10^{-2}$ м
$K_1\cdot10^3 - K_4$	A_{24}^{Π} (2,465, 179,1)	(2,734, 1,286, 5,906)
	A_{46}^{Π} (0,759, 173,0)	(2,539, 1,731, 5,203)
$K_1\cdot10^3 - K_6\cdot10^{-2}$	A_{26}^{Π} (0,981, 1,751)	(3,359, 2,302, 5,156)
	A_{10}^{Π} (1,062, 1,519)	(3,281, 2,937, 5,063)
	A_{3}^{Π} (1,540, 1,106)	(4,375, 4,209, 5,250)
	A_{19}^{Π} (2,156, 0,953)	(4,453 5,101, 5,344)
$K_4 - K_6\cdot10^{-2}$	A_{56}^{Π} (106,6, 0,976)	(2,930, 5,166, 5,484)
	A_{40}^{Π} (116,2, 1,094)	(2,852, 4,275, 5,578)
	A_{44}^{Π} (122,9, 1,358)	(3,164, 2,747, 5,953)
	A_{8}^{Π} (160,8, 1,811)	(2,656, 1,921, 5,813)
$K_3\cdot10^{-6} - K_4$	A_{44}^{Π} (2,396, 122,9)	(3,164, 2,747, 5,953)
	A_{40}^{Π} (3,148, 116,2)	(2,252 4,275, 5,578)
	A_{56}^{Π} (3,843, 106,6)	(2,930, 5,166, 5.484)
$K_1\cdot10^3 - K_3\cdot10^{-6}$	A_{19}^{Π} (2,156, 5,620)	(4,453, 5,101, 5,344)
	A_{55}^{Π} (1,630, 3,840)	(4,023, 3,891, 5,297)
	A_{10}^{Π} (1,062, 2,259)	(3,281, 2,937, 5,063)

Таблица 4.

Расчетные и экспериментальные значения числа эффективных оценок ($m=3$)

Критерии		Перечень допустимых оценок A_i	N_∂	$\lvert A^{\Pi}\rvert$	$M(N_\partial,3)$
$K_1 - K_4 - K_6$	64	$A_{26}, A_{10}, A_{12}, A_{42}, A_{56}, A_{40}, A_8, A_{30}$	8	4	4,45
	128	$A_{47}, A_{52}, \ldots\ldots\ldots\ldots A_{109}$	19	5	4,09/7,0
	256	$A_{34}, A_{98}, \ldots\ldots\ldots\ldots A_{42}$	30	6	8,79/8,78
$K_1 - K_4 - K_3$	64	$A_{10}, A_{40}, A_{42}, A_{56}, A_{30}, A_{12}$	6	3	3,74
	128	$A_{109}, A_{77}, A_{88}, A_{120}, A_{52}, A_{94}, A_{43}, A_{126}, A_{20}$	9	4	4,77
	256	$A_{115}, A_{51}, \ldots\ldots\ldots\ldots A_{236}$	13	4	6,07/5,31

Анализ полученных результатов (таблицы 2, 4) позволяет сделать вывод о пригодности вероятностного подхода к приближенному определению числа эффективных режущих инструментов.

В заключении следует отметить, что вопрос предварительного («априорного») определения числа эффективных режущих инструментов представляет интерес в практике металлообработки при подготовке функционально полной инструментальной базы данных САПР РИ и банка эффективных режимов резания САПР ТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградская Т.М. Среднее значение числа неподчиненных решений в многокритериальных задачах// Известия АН СССР. Техническая кибернетика – 1976 - №2. - с. 36-38.
2. Виноградская Т. М., Гафт М.Г. Точная верхняя оценка числа неподчиненных решений в многокритериальных задачах// Автоматика и телемеханика – 1974 - №9.- с. 111-118.
3. Колядин А.В. Устойчивость движения технологической системы станка при ступенчатом фрезеровании труднообрабатываемых материалов. Дисс. к.т.н.-Л.: ЛПИ, 1982. - 266 с.
4. Колядин А.В., Ординарцев И.А., Сенькин Е.Н. Оптимизация конструкций ступенчатых торцовых фрез// Станки и инструмент – 1983 - № 8.- с. 27-29.
5. Кудряшов Е.А., Никонов А.М. Технологические особенности промышленного использования инструментов из композитов// Вестник ЧитГУ – 2007 - №2 - с.5 - 10.
6. Сенькин Е.Н. Декомпозиция задачи проектирования режущего инструмента// Вестник машиностроения – 1985 - №12. - с. 39-42.
7. Сенькин Е.Н., Колядин А.В. Выбор эффективных конструкций и условий работы ступенчатыми фрезами, оснащенных композитом// Станки и инструмент – 1984 - №11. - с. 21-22.
8. Сенькин Е.Н., Колядин А.В. Оптимизация проектирования ступенчатых фрез// Известия ВУЗов. Машиностроение - 1984 - №5. - с. 109-113.
9. Сенькин Е.Н., Колядин А.В., Филиппов Г.В. Конструкции и эксплуатация фрез, оснащенных композитом – Л.: Машиностроение, 1988. - 63 с.
10. Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. - М.: Наука, 1981.- 112с.

E.N. Senkin, A.A. Okunev

DEFINING QUANTITY OF EFFECTIVE CUTTING TOOLS

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to the algorithm of defining quantity of effective metal cutting tools based on scanning the space of the designing tool parameters or its operating conditions by LP-search method that is an analog of random search. The computer numerical experiment of defining effective conditions of milling hardened steel by a composite square-shoulder mill has verified appropriateness of the suggested algorithm.

Key words: optimization, LP-search, cutting tools, composites, milling.

REFERENCES

[1] Vinogradskaja T.M. Srednee znachenie chisla nepodchinennyh reshenij v mnogokriterial'nyh zadachah// Izvestija AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika – 1976 - №2. - p. 36-38. (rus.)

[2] Vinogradskaja T. M., Gaft M.G. Tochnaja verhnjaja ocenka chisla nepodchinennyh reshenij v mnogokriterial'nyh zadachah// Avtomatika i telemehanika – 1974 - №9.- p. 111-118. (rus.)

[3] Koljadin A.V. Ustojchivost' dvizhenija tehnologicheskoj sistemy stanka pri stupenchatom frezerovanii trudnoobrabatyvaemyh materialov. Disc. k.t.n.-L.: LPI, 1982. - 266 p. (rus.)

[4] Koljadin A.B., Ordinarcev I.A., Sen'kin E.H. Optimizacija konstrukcij stupenchatyh torcovyh frez// Stanki i instrument – 1983 - №8.- p. 27-29. (rus.)

[5] Kudrjashov E.A., Nikonov A.M. Tehnologicheskie osobennosti promyshlennogo ispol'zovanija instrumentov iz kompozitov// Vestnik ChitGU – 2007 - №2 - p.5 - 10. (rus.)

[6] Sen'kin E.N. Dekompozicija zadachi proektirovanija rezhushhego instrumenta// Vestnik mashinostroenija – 1985 - №12. - p. 39-42. (rus.)

[7] Sen'kin E.N., Koljadin A.V. Vybor jeffektivnyh konstrukcij i uslovij raboty stupenchatymi frezami, osnashhennyh kompozitom// Stanki i instrument – 1984 - №11. - p. 21-22. (rus.)

[8] Sen'kin E.N., Koljadin A.V. Optimizacija proektirovanija stupenchatyh frez// Izvestija VUZov. Mashinostroenie - 1984 - №5. - p. 109-113. (rus.)

[9] Sen'kin E.N., Koljadin A.V., Filippov G.V. Konstrukcii i jekspluatacija frez, osnashhennyh kompozitom – L.: Mashinostroenie, 1988. - 63 p. (rus.)

[10] Sobol' I.M., Statnikov R.B. Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami. - M.: Nauka, 1981.- 112 p. (rus.)

УДК 621.910.71:536.24

Е.Н. Сенькин[1], А.А. Окунев[2]

СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РЕЗАНИИ

[1]**Евгений Николаевич Сенькин**, к.т.н., доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

[2]**Александр Анатольевич Окунев**, доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена аппроксимация зависимостей теплофизических характеристик обрабатываемых резанием материалов от температуры при помощи сплайн – функции $S(f,\theta)$. Результаты расчетов показали преимущество сплайн-аппроксимации перед обычными методами приближения многочленами в части аппроксимативных свойств, машинного представления и универсальности.

Ключевые слова: процесс резания, сплайн-аппроксимация, теплофизические характеристики.

Решение многих, практически важных, проблем обработки металлов резанием связано с необходимостью учета тепловых явлений, сопровождающих данный процесс [6]. В некоторых случаях достаточно знать средние значения температуры процесса (температуры резания), однако все чаще перед теорией процесса резания встают задачи (изучение и управление уровнем остаточных напряжений [1, 5], расчет инструмента на прочность и др.), когда необходимо знать и распределение температур в зоне стружкообразования, детали и инструмента.

В зависимости от обрабатываемого и инструментального материалов, режимов резания, вида и геометрии режущего инструмента значения температур (и градиентов) при резании могут изменяться в значительных пределах. Это обстоятельство может оказать существенное влияние на поста-

новку, нелинейной и нестационарной в общем случае, краевой задачи теплопроводности, выбор метода и точность ее решения [3].

В случае непрерывной обработки однолезвийным инструментом или, в более общем случае – прерывистого резания (одно – или многолезвийным инструментом) температурные поля в зоне стружкообразования, детали и режущем клине определяются из решения одного (1) или системы (1-2) уравнений теплопроводности (плоский случай)

$$c_1\gamma_1\frac{\partial\theta_1}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_1\frac{\partial\theta_1}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_2\frac{\partial\theta_2}{\partial y}\right]-\upsilon_x\frac{\partial\theta_1}{\partial x}-\upsilon_y\frac{\partial\theta_1}{\partial y}+q_V; \quad (1)$$

$$c_2\gamma_2\frac{\partial\theta_2}{\partial\tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_2\frac{\partial\theta_2}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_2\frac{\partial\theta_2}{\partial y}\right]. \quad (2)$$

Здесь индекс 1 относится к области D_1 (рис. 1), а индекс 2 – к области D_2 (режущий клин), кроме того $\theta_1=\theta_1(x,y)$, $(x,y)\in D_1$, $\overline{D}_1=D_1+S_1$ а граница S_1 может быть представлена как $S_1=\bigcup_{i=1}^{8}S_1^{(i)}$ (см. рис. 1), $\theta_2=\theta_2(x,y)$, $(x,y)\in D_2$, $\overline{D}_2=D_2+S_2$ и $c_{1,2}=c_{1,2}(\theta_{1,2})$, $\lambda_{1,2}=\lambda_{1,2}(\theta_{1,2})$. Поле скоростей $\vec{V}(\upsilon_x,\upsilon_y)$ в области D_1 и $q_V=q_V(x,y,\tau)-$ мощность внутренних тепловых источников, обусловленных пластической деформации, определяются на первом этапе, по известным алгоритмам [8]. Для случая прерывистого резания краевая задача теплопроводности может быть представлена в виде двух чередующихся k-ое число раз зада: задачи (уравнение 1 плюс Н и ГУ), определяющей теплообмен между областью D_1 и режущим инструментом за время (T_1) срезания припуска и задачи (уравнение 2 плюс Н и ГУ), определяющий процесс охлаждения инструмента (область D_2) на воздухе или с применением принудительного охлаждения в течение (T_2) холостого пробега инструмента.

При постановке и последующем решении задачи теплопроводности возникают определенные трудности, связанные с геометрией области D_1 и описанием граничных условий. При определении полей температур в D_1 и D_2 приходится учитывать различные механизмы теплообмена: лучеиспускание и взаимоизлучение (при обработке сложных поверхностей), естественную и вынужденную конвекцию, а также зависимость теплофизических параметров обрабатываемых материалов от температуры, которая изменяется при резании, как уже было отмечено, в широких пределах.

В общем случае начальные и граничные условия (Н и ГУ) для решения уравнений (1-2) в зависимости от вида и условий механической обработки могут быть весьма разнообразны. В частности, на границах $S_1=S_1\times[0,T_1]$ и $S_2=S_2\times[0,T_2]$ их можно представить в виде: начальные условия $(\tau=0)$:

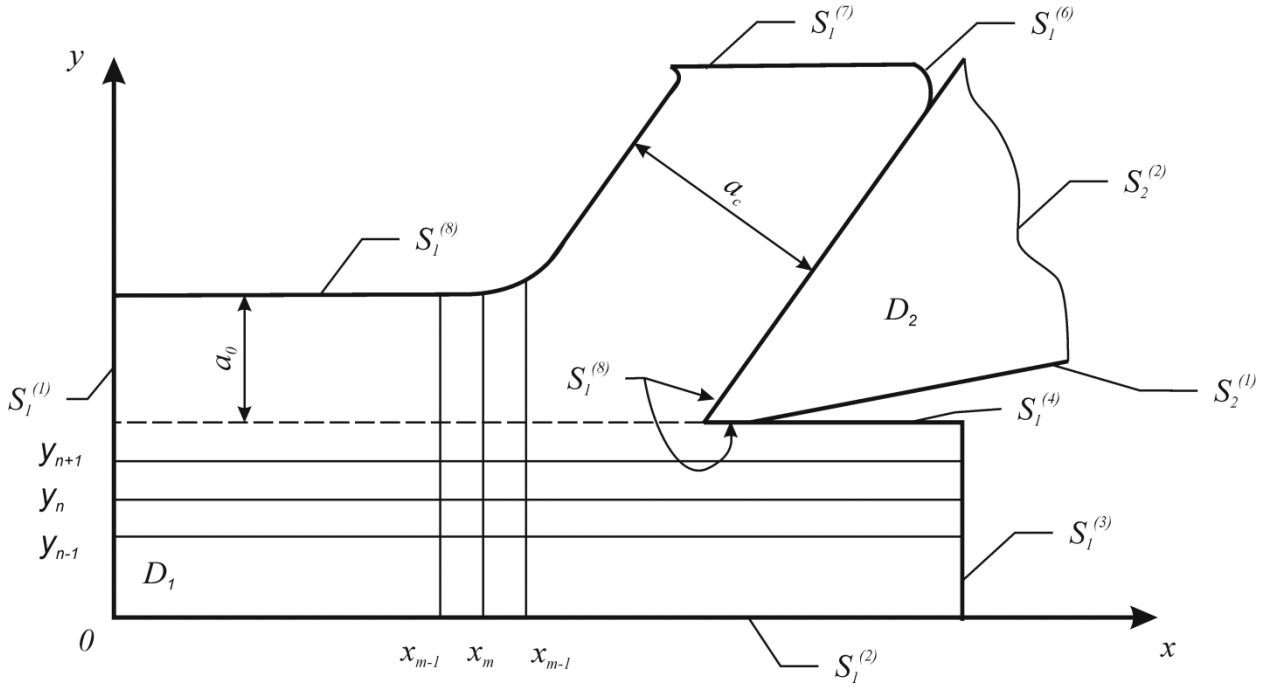


Рис. 1. К решению задачи теплопроводности при резании

$$\theta_1(x,y)=\theta_1^0=const\ ,\ \theta_2(x,y)=\theta_2^0=const \tag{3}$$

граничные условия:

$$\theta_1\big|_{S_1^{(1)}}=\theta_1^0=const; \tag{4}$$

$$\lambda_1\frac{\partial\theta_1}{\partial n}\bigg|_{S_1^{(2,3,7)}}=0;\ \lambda_2\frac{\partial\theta_2}{\partial n}\bigg|_{S_2^{(2)}}=0 \tag{5}$$

$$\lambda_1\frac{\partial\theta_1}{\partial n}\bigg|_{S_1^{(4,6,8)}}=-\alpha_1\left(\theta_1-\theta_{cp.}\right);\ \lambda_2\frac{\partial\theta_2}{\partial n}\bigg|_{S_2^{(1)}}=-\alpha_2\left(\theta_2-\theta_{cp.}\right) \tag{6}$$

$$\lambda_1^M\frac{\partial\theta_1}{\partial n}\bigg|_{S_1^{(+5)}}=-\alpha_1^{ин}\frac{\partial\theta_1}{\partial n}\bigg|_{S_1^{(-5)}} \tag{7}$$

Одним из эффективных методов численного решения нелинейной краевой задачи (1,3-7) или (1-7) следует считать метод конечных разностей, реализуемый на пространственной сетке $\overline{\omega}=\overline{\omega}_x\times\overline{\omega}_y$ в $\overline{D}_1$ и $\overline{D}_2$:

$\omega_x=\{x_m=m\cdot h_x, m=0,1,...M, h_x-$ шаг по оси x$\}$,

$\omega_y=\{y_n=n\cdot h_y, n=0,1,...N, h_y-$ шаг по оси y, причем $h_x=h_y\}$, и на сетке по времени –

$\omega_\tau=\{t_{j-\alpha/2}=(j-\alpha/2)/\tau,\ j=1,2,...j_0, \alpha=2,1; \tau=T_{1,2}/j_0; \tau=t_j-t_{j-1}, [0\le t\le T_{1,2}]\}$

с использованием экономичного локального – одномерного метода расщепления [7].

При обработке резанием многих конструкционных материалов их теплофизические характеристики ($c_{1,2}$ – удельная теплоемкость, $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности) изменяются в интервале температур, свойственных резанию, не только в широких пределах, но и по достаточно сложному закону [9, 10] (рис. 2, 3).

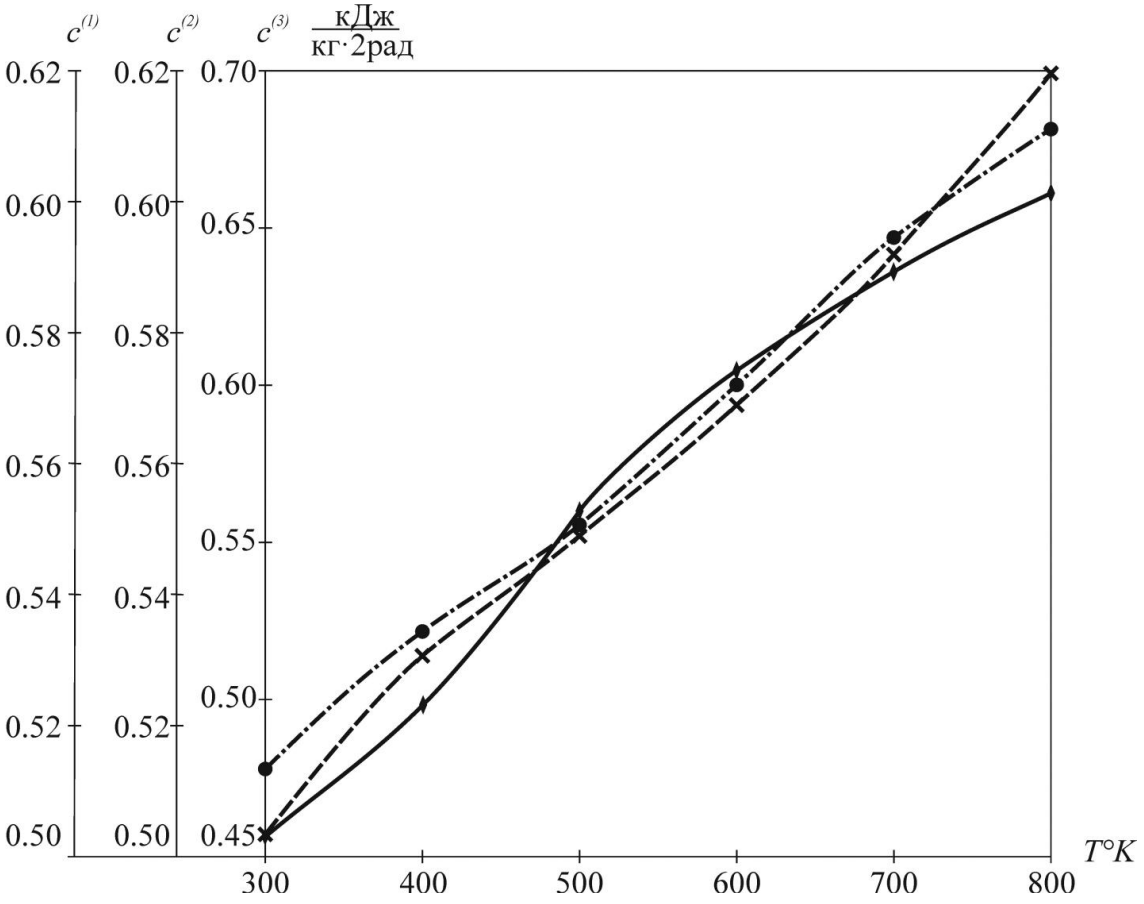


Рис. 2. Зависимость c от температуры:
—— - сталь У8 ($c^{(3)}$);
- - - - - - сталь 1Х18Н9ТЛ ($c^{(2)}$);
_·_·_ - сталь Х17Н13М2Т ($c^{(1)}$)

Так для закаленных сталей, при обработке которых лезвийных инструментом с композитом, как известно, температуры резания весьма велики ($\theta > 1000$ °К) [4], зависимость $c = c(\theta)$ имеет несколько экстремальных точек на интервале $\theta_{ср.} - \theta_{рез.}$ [9]. В краевые условия (6) входят коэффициенты пропорциональности ($\alpha_{1,2}$ – коэффициенты теплопередачи между поверхностью обрабатываемого металла и режущего инструмента с окружающей средой, $\varepsilon_{1,2}$ – степень черноты), которые также функционально зависят, помимо прочих фактов (форма областей D_1, D_2, скорости движения стружки и инструмента и др.) и от температуры – $\alpha_{1,2} = \alpha_{1,2}(\theta_{1,2})$, $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{1,2}(\theta_{1,2})$. При

решении краевых задач (1,3-7) или (1-7) с учетом нелинейности 1 рода (т.е. с учетом зависимостей $c_{1,2} = c_{1,2}(\theta_{1,2})$, $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,2}(\theta_{1,2})$) численным методом (методом конечных разностей или конечных элементов) встает проблема аппроксимации экспериментальных данных для $c_{1,2} = c_{1,2}(\theta_{1,2})$, $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,2}(\theta_{1,2})$ и др. Все, ранее используемые, методы аппроксимации реальных законов изменения теплофизических характеристик с изменением температуры [3] при решении уравнений (1,2) численными методами для широкой гаммы обрабатываемых и инструментальных материалов, режимов резания и разновидностей режущих инструментов мало эффективны, так как они, по существу, имеют локальный характер, не точны и трудоемки в реализации.

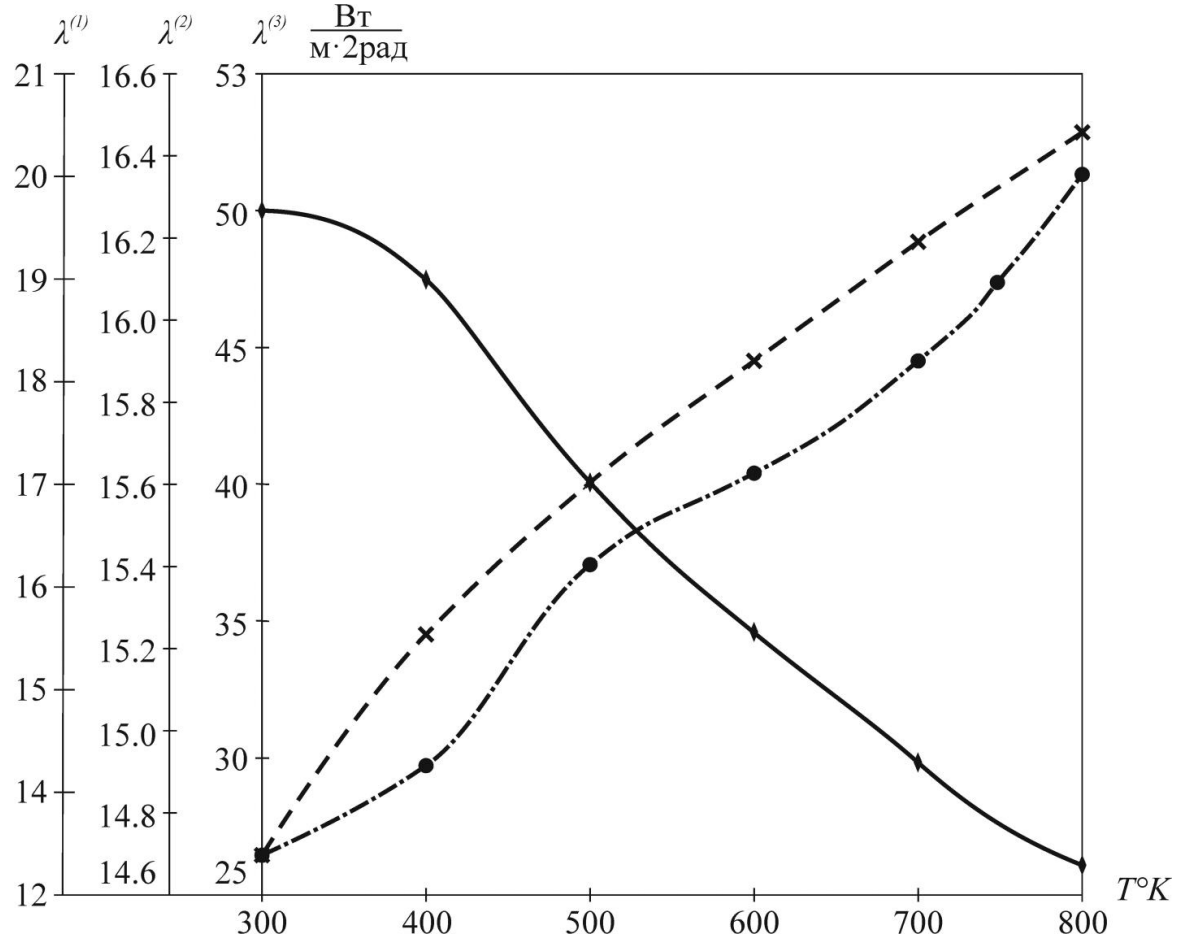


Рис. 3. Зависимость λ от температуры:
____ - сталь У8 ($\lambda^{(3)}$);
----- - сталь Х17Н13М2Т ($\lambda^{(2)}$);
_.._. - сталь 1Х18Н9ТЛ ($\lambda^{(1)}$)

Для аппроксимации зависимостей теплофизических характеристик обрабатываемых резанием материалов от температуры во всем интервале ее изменения во время эксперимента (и резания), предлагается использовать сплайн – функции $S(f,\theta)$ [2], применение которых имеет неоспоримое

преимущество перед обычными методами приближения многочленами: лучшие аппроксимативные свойства, лучшее машинное представление и, что очень важно при моделировании сложных процессов, универсальность.

В работе предложена стандартная процедура аппроксимации характеристик $c_{1,2} = c_{1,2}(\theta_{1,2})$, $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,2}(\theta_{1,2})$, и др., входящих в краевую задачу (1-7), на одномерной сетке $-\omega_\theta = \{\theta_i = i \cdot \Delta\theta, i = 1,2...K, \Delta\theta_i = (\theta_к - \theta_н)/K, \Delta\theta -$ шаг по температуре, $\theta_{н,к}$ – температура начала и конца экспериментального определения указанных характеристик$\}$.

Значения шага $\Delta\theta$ задается равным 100 °К или 100 °С (рис.2,3). В качестве аппроксимирующего сплайна выбран кубический сглаживающий сплайн $S(\theta)$, который на выбранной сетке $\overline{\omega}_\theta$ удовлетворяет граничные условия.

$$S''(\theta_н) = S''(\theta_к) = 0$$

и минимизирует функционал

$$J_1(f) = \int_{\theta_н}^{\theta_к} |f''(\theta)|^2 d\theta + \sum_{i=0}^{N} \rho_i^{-1} (f_i - z_i^0)^2 .$$

Здесь z_i^0 – экспериментальные значения характеристик c, λ в точках θ_i (на рис. 2, 3 эти значения обозначаются – $\Diamond, *, \bullet$), а $\rho_i > 0$ – весовые множители, алгоритм определения которых изложен в [2]. Если задаваться значениями $\rho_i = 0$, то сглаживающий сплайн $S(\theta)$ превращается в аппроксимирующий. В работе была осуществлена на ЭВМ БЭСМ – 6 численная реализация построения сплайн-функции $S(\theta)$, работающей как в режиме сглаживания ($\rho_i > 0$), так и в режиме аппроксимации. На рис. 2,3 представлены графики аппроксимации. ($\rho_i = 0$) зависимостей теплофизических характеристик (c, λ) ряда материалов (У8, Р18, 1Х18Н9ТЛ, Х17Н13М2Т) от температуры с использованием экспериментальных данных [9, 10]. Для построения графиков использованы специальные программы из библиотеки 20 GROM – 9 ЛНИ ВЦ АН СССР Универсальная программа сплайна – аппроксимации написана на языке «FOREX 3.30», время необходимое для аппроксимации одной характеристики составляет порядка 15 сек., а обращение к программе – 90 мксек.

В заключении следует отметить, что предлагаемая программа сплайн – аппроксимации зависимостей теплофизических характеристик обрабатываемых резанием материалов от температуры и реализованная на ЭВМ БЭСМ – 6 , обладающей терминальным сервисом высокого уровня, является составной частью пакета прикладных программ для решения краевой задачи теплопроводности при резании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В. Ф., Тихомирова Н.А. Расчёт остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при механической обработке с учётом структурно-фазовых превращений// Вестник машиностроения – 1993 - № 5-6. - с. 37-39.
2. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функции. – М.: Наука, 1980. - 352 с.
3. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. - 226 с.
4. Лобанов А.А. Температура резания при обработке закаленных сталей// СТИН – 2005 - №5. – с. 26 – 28.
5. Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Технологические остаточные напряжения. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.
6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
7. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 552 с.
8. Сенькин Е.Н. Построение модели процесса стружкообразования и перспективы ее использования // Исследование в области инструментального производства и обработки металлов.- Тула: ТПИ, 1980. - с. 78-87.
9. Теплофизические свойства веществ. Справочник// Под ред. Н.Б. Варгафтика.- М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. - 356 с.
10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. - 484 с.

E.N. Senkin, A.A. Okunev

SPLINE APPROXIMATION OF MATERIAL THERMAL CHARACTERISTIC DEPENDENCES ON CUTTING TEMPERATURE

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to the approximation of thermal characteristic machined material dependences on cutting temperature by the spline function $S(f,\theta)$. The calculation results have shown spline approximation advantage over traditional polynomial approximation methods comparing approximation properties, machine representation and universality.

Key words: cutting process, spline approximation, thermal characteristics.

REFERENCES

[1] Bezjazychnyj V. F., Tihomirova N.A. Raschjot ostatochnyh naprjazhe-nij v poverhnostnom sloe detalej pri mehanicheskoj obrabotke s uchjotom strukturno-fazovyh prevrashhenij// Vestnik mashinostroenija – 1993 - № 5-6. - p. 37-39. (rus.)

[2] Zav'jalov Ju.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. Metody splajn-funkcii. – M.: Nauka, 1980. - 352 p. (rus.)

[3] Kozdoba L.A. Metody reshenija nelinejnyh zadach teploprovodnosti. – M.: Nauka, 1975. - 226 p. (rus.)

[4] Lobanov A.A. Temperatura rezanija pri obrabotke zakalennyh stalej// STIN – 2005 - №5. – p. 26 – 28. (rus.)

[5] Podzej A.V., Sulima A.M., Evstigneev M.I. Tehnologicheskie ostatochnye naprjazhenija. - M.: Mashinostroenie, 1973. - 216 p. (rus.)

[6] Reznikov A.N. Teplofizika processov mehanicheskoj obrabotki materialov. - M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 p. (rus.)

[7] Samarskij A.A. Vvedenie v teoriju raznostnyh shem. – M.: Nauka, 1971. – 552 p. (rus.)

[8] Sen'kin E.N. Postroenie modeli processa struzhkoobrazovanija i perspektivy ee ispol'zovanija // Issledovanie v oblasti instrumental'nogo proizvodstva i obrabotki metallov.- Tula: TPI, 1980. - p. 78-87. (rus.)

[9] Teplofizicheskie svojstva veshhestv. Spravochnik// Pod red. N.B. Vargaftika.- M.-L.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1956. - 356 p. (rus.)

[10] Chirkin V.S. Teplofizicheskie svojstva materialov jadernoj tehniki. Spravochnik. – M.: Atomizdat, 1968. - 484 p. (rus.)

УДК 621.9 : 621.91.01

Е.Н. Сенькин[1], А.А. Окунев[2]

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ С КОМПОЗИТОМ

[1]**Евгений Николаевич Сенькин**, к.т.н., доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

[2]**Александр Анатольевич Окунев**, доцент кафедры «Станкостроение», ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: +7(812)534-1388, E-mail: mmfgak@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрен метод аналогового моделирования процесса сливного стружкообразования ЭГДА и его применение к случаю точения стали ШХ15 ($HRC_э$ 48) резцом с композитом 01. Результаты расчетов показали точность, достаточную для практического применения, а метод ЭГДА продемонстрировал свою простоту и эффективность.

Ключевые слова: процесс стружкообразования, аналоговое моделирование, ЭГДА, композиты.

Резание инструментом с композитом относится к тем процессам, для анализа которых практически невозможно использовать имеющиеся экспериментальные методы механики стружкообразования. Специфические особенности данного процесса (малые размеры сечения срезаемого слоя, высокие значения скоростей деформации, температур и их градиентов, низкая электропроводность некоторых композитов, существенное изменение поведения обрабатываемого материала за время стружкообразования [1, 4]) затрудняет как теоретический анализ его, так и прямое натурное экспериментальное исследование традиционными методами: координатных сеток, муар, микротвердости, оптически чувствительных покрытий и др.

В отсутствии приборов и методов, способных обеспечить надежную регистрацию кинематических, динамических параметров и температур в труднодоступных и малых по площади поверхностях быстродвижущегося

металла, важная роль на наш взгляд, должна принадлежать методам аналогового моделирования. В качестве такого метода предлагается использовать электрическое моделирование, в частности метод ЭГДА [8, 10], в основе которого лежит идея аналогии между электрическим полем, с одной стороны, и полями различной физической природы (течение вязкопластического материала и температурным) имеющие место при резании, с другой стороны.

Метод ЭГДА широко используется для решения теплофизических задач, примеров же использования его для определения параметров (вектора течения материала в зоне стружкообразования $\vec{V}$, компонент скоростей деформации ξ_{xx}, ξ_{yy}, ξ_{xy}, степени деформации сдвига Γ, работы стружкообразования A и мощность $\dot{A}$) при резании нет.

Учитывая практическую направленность работы, кратко остановимся на теоретическом обосновании применимости метода ЭГДА к анализу процесса сливного стружкообразования, имеющего место при резании закаленных сталей инструментом с композитом. Основной принцип моделирования при исследовании процесса стружкообразования, как процесса вязкопластического течения обрабатываемого материала, вытекает из решения уравнений теории пластичности с использованием вариационных принципов и, частности, принципа виртуальных скоростей [2] и суть его состоит в возможности измерения в ходе моделирования только кинематических параметров исследуемого процесса. Неизвестное поле $\vec{V}(\upsilon_x, \upsilon_y)$ скоростей двумерного (плоского) течения материала в области D может быть представлено в виде [2] суммы некоторого опорного $\vec{V}^0(\upsilon_x^0, \upsilon_y^0)$ поля и корректирующего $\vec{V}^K(\upsilon_x^K, \upsilon_y^K)$. Поле $\vec{V}^0(\upsilon_x^0, \upsilon_y^0)$ определяет в D течение идеализированного материала (среды) наделенного, например, свойствами идеальной жидкости. Поле $\vec{V}^K$, дополняя поле $\vec{V}^0$, учитывает реальные свойства обрабатываемого материала и контактные условия стружки с инструментом. Численные эксперименты на ЭВМ показали [9], что, несмотря на сильное допущение на природу поля $\vec{V}^0$, интегральные параметры ($\Gamma^0, \dot{A}_0$, A_0) процесса стружкообразования определенные на его основе, с достаточной точностью совпадают с результатами натурных экспериментальных исследований.

Из теории гидромеханики известно, что поле $\vec{V}^0$ определяется с помощью эквипотенциальной функции $\varphi(x, y)$ или функции тока $\psi(x, y)$, которые являются решениями уравнения Лапласа [7]. Последнее обстоятельство и дает основание использовать аналогию между движением идеальной среды в D и протеканием электрического тока в модели подобной D при одинаковых граничных условиях. Определить функции φ и ψ, а значит и поле $\vec{V}^0$, в процессе электрического моделирования можно с помощью интеграторов типа ЭГДА – 9/60 [10] или КММ – 12.

Рассмотрим методику электрического моделирования процесса стружкообразования при резании закаленных сталей на примере простейшей области течения D (рис. 1), геометрия которой определяется: глубиной резания t_0, толщиной образуемой стружки t_c, углом резания δ (в данном случае $\delta = \frac{\pi}{2}$).

Процесс резания осуществляется со скоростью $\vec{V}^0$. Скорость схода стружки определяется как $\vec{V}_c = \vec{V}_0 \cdot \left(\frac{t_c}{t_0}\right)^{-1}$, $(t_c > t_0)$. Моделирование выполняется на сплошных моделях, вырезаемых из электропроводной бумаги [10].

Введем систему координат Oxy (рис. 1а), связанную с вершиной режущего клина. Моделирование целесообразно выполнять в следующей последовательности.

1. Построение сетки линий тока $\psi(x, y) = const$ и линий равного потенциала $\varphi(x, y) = const$.

Опираясь на общие положения теории резания, можно отметить, что в недеформированной части D_1 области D (рис. 1а) линии тока определяется условием

$$\psi_j(x, y) = y_j,\ y_j = j \cdot \Delta y,\ \Delta y = \frac{t_0}{n},\ j = \overline{0, n}, \tag{1}$$

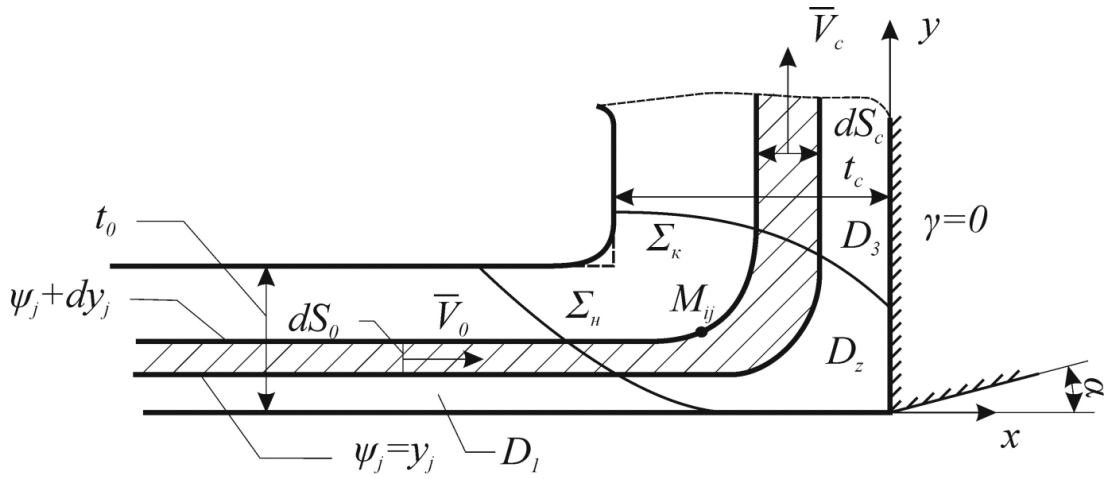
так как любая материальная частица здесь движется параллельно оси x. В части D_3, где процесс пластической деформации завершен (вторичные пластические деформации не учитываются) и стружка движется по передней поверхности режущего клина как твердое недеформируемое тело, геометрия линий тока также очевидна

$$\psi_j(x, y) = -x_j,\ x_j = j \cdot \Delta x,\ \Delta x = \frac{t_c}{n}. \tag{2}$$

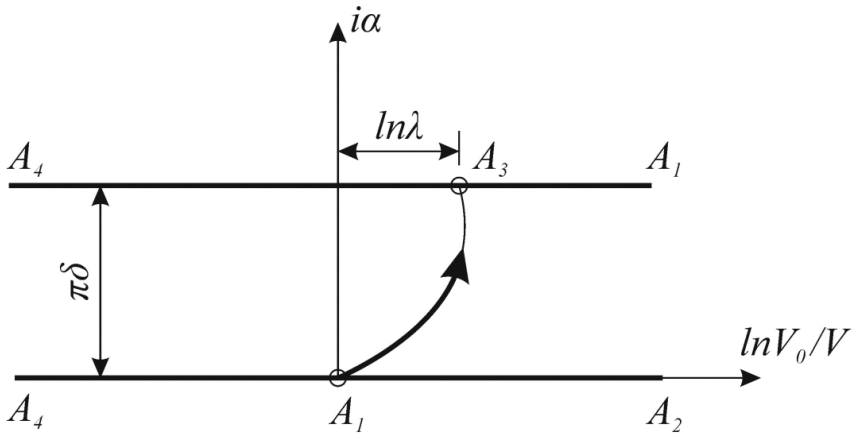
Передняя поверхность режущего клина, являясь частью границы области D, описывается уравнением $x = 0$ и является тоже линией тока. Очевидно, что на начальной Σ_H и конечной Σ_K границах зоны стружкообразования (пластической области) функция тока ψ должна быть непрерывна.

Геометрия линий тока $\psi_j = const$ в D_2 (рис. 1а) неизвестна и подлежит определению в процессе моделирования. Из закона постоянства потока ($V_0 t_0 = V_c t_c$) следует, что элементарная струйка тока, ограниченная линиями тока $\psi_j = y_j$ и $\psi_j = y_j + dy_j$ (рис. 1, а) с площадью поперечного сечения ds_c в зоне D_1 будет иметь сечение ds_c в зоне D_3, величина которого определяется соотношением $ds_c = ds_0 \cdot \frac{V_0}{V_c}$. Для определения полей кинематических параметров в зоне стружкообразования необходимо знать координаты x_{ij}, y_{ij} ($i = \overline{0, m}$, $j = \overline{0, n}$) материальных частиц M_{ij}, движущихся по линиям тока

$\psi_j = const$.



а)



б)

Рис. 1. а) область течения D_2 на плоскости $z = x + iy$;
б) область течения D_Q на плоскости $\varphi = \ln\dfrac{V}{V_0} + i\alpha$

Искомые координаты определяются положением узлов криволинейной сетки (φ, ψ), образуемой пересечением линий тока $\psi_j = const$ и линий $\varphi = const$. Построение такой сетки можно начинать с определения линий тока $\psi_j(x, y) = const$. Для этого модель $A_1A_2A_3A_4$ (рис. 2) области D вырезается по заданным геометрическим параметрам (t_0, t_c, δ) из электропроводной бумаги в некотором масштабе K. При этом по периметру модели оставляется припуск $A_1A_1' = (2-3)$ мм, предназначенный для закрепления ее на столе стенда [10] с помощью специальных шин-зажимов или медных шин-полос. Остановимся на реализации граничных условий при построении линий то-

ка. На границе модели $A_1A_2A_3$ можно задать функцию тока равную нулю, тогда на противоположенной границе $A_1A_4A_3$ очевидно $\psi = 1$, так как размер модели t_0 определяет поток материала проходящего через него. Так как вдоль лини тока функция тока сохраняет постоянное значение, то на границах A_1A_1 и A_3A_3 для функции тока выполняется условие – $\frac{\partial \psi}{\partial l} = 0$ (l – нормаль к соответствующим участкам границ модели). Окончательно граничные условия для функции ψ будут иметь вид:

$$\psi\big|_{A_1A_2A_3} = 0,\ \psi\big|_{A_1A_4A_3} = 1,\ \left.\frac{\partial \psi}{\partial l}\right|_{A_1A_1} = \left.\frac{\partial \psi}{\partial l}\right|_{A_3A_3} = 0 \qquad (3)$$

Принципиальная схема электрического моделирования процесса течения материала при резании с использованием интегратора ЭГДА – 9/60 приведена в работе [10]. Количество n линий тока ψ_j определяется из условий $n = \frac{V_0 t_0}{\Delta y}$. Конкретный выбор шага Δy, а значит и n зависит от целей, стоящих перед исследователем и требуемой точности решения. Исходя из общности решения, можно положить величину потока безразмерной и равной 1 (отсюда и $\psi\big|_{A_1A_4A_3} = 1$). Выбрав число n, линия тока $\psi_1(x, y) = const$ строится по точкам $(1_1 ... n_1)$, в которых электрический потенциал $\varphi_{эл}^{(1)} = \left(\frac{100}{n}\right)\%$. Находятся эти точки на модели с помощью измерительной иглы при ее перемещении от границы A_1A_1 к границе A_3A_3. Соединяя найденные точки $1_1 ... n_1$ плавной кривой получаем искомую линию тока $\psi_1 = const$ (рис. 2). в такой же последовательности строится все семейство линий тока $\psi_j = const$ ($j = \overline{0, n}$) (рис. 3). Линии $\varphi_i(x, y) = const$ ($i = \overline{0, m}$) строятся на модели методом обращения предыдущей задачи [10]. Граничные значения для функции φ будут иметь вид:

$$\varphi\big|_{A_1A_1} = 0,\ \varphi\big|_{A_3A_3} = 1,\ \left.\frac{\partial \varphi}{\partial l}\right|_{A_1A_2A_3} = \left.\frac{\partial \varphi}{\partial l}\right|_{A_1A_4A_3} = 0. \qquad (4)$$

2. Определение полей скоростей перемещения $\vec{V}^0(\upsilon_x^0, \upsilon_y^0)$ и компонент ξ_{xx}, ξ_{yy}, ξ_{xy} скоростей деформации.

Вектор скорости течения в каждой точке M_{ij} определяется как

$$\vec{V}_{ij}^0 = \vec{V}_0 \cdot \frac{\Delta \psi_0}{\Delta \psi_{ij}}. \qquad (5)$$

Здесь $\Delta \psi_0$ – отрезок линии тока ψ_j между двумя эквипотенциалями с шагом $\Delta \psi$ у границы A_1A_1, $\Delta \psi_{ij}$ – отрезок линии тока ψ_j, заключенный между эквипотенциалями φ_i, проходящей через точку M_{ij} и эквипотенциалью $\varphi_i(x, y) + \Delta \varphi_{эл}$.

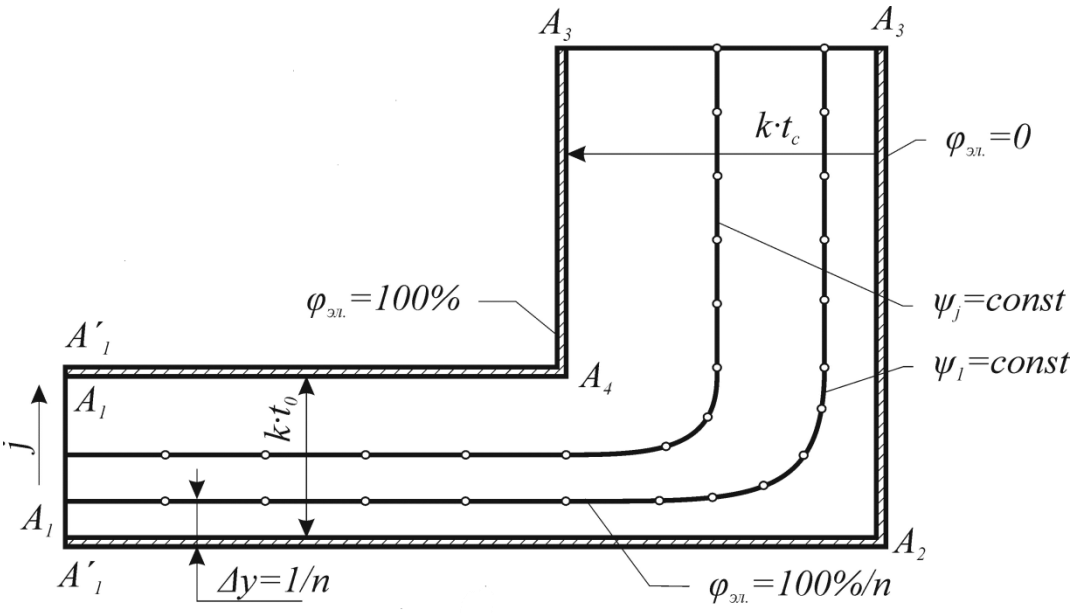


Рис. 2. Схема построения линий тока ψ_j

3. Определение величины степени деформации сдвига Γ^0.

Особое место среди кинематических параметров процесса стружкообразования занимает Γ^0, величина которой определяют накопленную (интегральную) деформацию частиц M_{ij} при их движении по линиям тока через пластическую область. Для определения значений Γ^0 методом ЭГДА на сплошных моделях их электропроводной бумаги, необходимо ввести дополнительную область течения D_Q материала, расположенную на плоскости [2] $Q = \ln\frac{V_0}{V} + i\alpha$, где текущие значения V и α определены выше. Для области D (рис. 1а) дополнительная область D_Q имеет вид, приведенный на рис. 1б. Используя область D_Q, значение и приращение степени деформации сдвига можно определить как [2]

$$\Delta\Gamma_{ij}^{\ 0} = 2\left|\Delta\psi_{ij}\right|, \qquad (6)$$

где $\left|\Delta\psi_{ij}\right|$ – путь, пройденный точкой $M_{ij}\left(\ln\frac{V_0}{V};\alpha\right)$ по линии тока $\psi_j = const$, исходящей из точки A_1 и входящей в точку A_3 (рис. 1б). Задачу определения значений Γ^0 методом электрического моделирования можно поставить и решать двояко: определять поле значений $\left\{\Gamma_{ij}^0\right\}$ в каждой точке M_{ij} или определять накопленной значение Γ^0 на границе $\Sigma_к$ (рис. 1а) зоны стружкообразования. Очевидно первый подход является более общим, так как он включает в себя и вторую часть задачи. Практическая же реализация второго случая проще, так как при этом достаточно на модели построить

только семейство линий тока $\psi_j\left(\ln\frac{V_0}{V};\alpha\right)=const$.

4. Численный пример.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности метода электрического моделирования на сплошных моделях процесса резания инструментом с композитом, рассмотрим случай точения стали ШХ15 ($HRC_э$ 48) резцом с композитом 01 [5], передний угол которого $\gamma=0^\circ$ ($\delta=90^\circ$). Были выбраны параметры резания: глубина $t_0=2{,}7\cdot10^{-5}$ м, $V_0=64$ м/мин. Значения коэффициента $K_t=\frac{t_c}{t_0}$ составило $2{,}08$. Семейство линий тока $\psi_j(x,y)=const$ $\left(j=\overline{0{,}6}\right)$, построенных по предложенной методике на модели вырезанной в масштабе $K=2{,}10^3$, приведено на рис. 3. Точки 1_j-15_j, определяющие j-ю линию тока, являются одновременно и узлами сетки (φ,ψ). Поэтому построение линий $\varphi_i=const$ очевидно. На рис. 4 приведена картина распределения значений степени деформации сдвига Γ^0 по линии тока j=3 для этих же условий резания.

Аналогов подобных решений для случая резания инструментом с композитом нет в литературе и поэтому для оценки его воспользуемся известными данными по исследованию кинематических параметров процесса резания обычным инструментом. Сопоставляя характер распределения линий тока (рис. 3) и величин Γ^0 (рис. 4) с экспериментальными данными работы [6], можно отметить удовлетворительное качество их совпадения.

Для количественной оценки полученных моделированием значений Γ^0 воспользуемся известным из теории резания соотношением, определяющим величину относительного сдвига для схемы с одной плоскостью сдвига [9] $\varepsilon=ctg\phi+tg\phi$, где $tg\phi=\frac{\cos\gamma}{\lambda-\sin\gamma}$. При $\lambda=2{,}08$ и $\gamma=0^\circ$ получаем, что на плоскости сдвига $0-7_6$ (рис. 3) $\varepsilon=2{,}56$. Используя данные по распределению Γ^0 (рис. 4) найдем среднее интегральное значение Γ_c^0 по точкам пересечения условной плоскости $0-7_6$ с линиями тока $\psi_j=const$:

$$\Gamma_c^0=\frac{1}{6}\left\{\frac{1}{3}\left[(3{,}5+3{,}1)+4(2{,}3+1{,}5+2{,}1)+2(1{,}8+1{,}7+3{,}1)\right]\right\}=2{,}41.$$

Здесь $\Gamma_0^0=3{,}5$ и $\Gamma_6^0=3{,}1$ – значения степени деформации сдвига для линий тока ψ_0 и ψ_6 в точках 0 и 7_6 соответственно. Таким образом и с количественной точки зрения ($\varepsilon=2{,}56$, $\Gamma_c^0=2{,}41$) результаты электрического моделирования Γ^0 удовлетворительны.

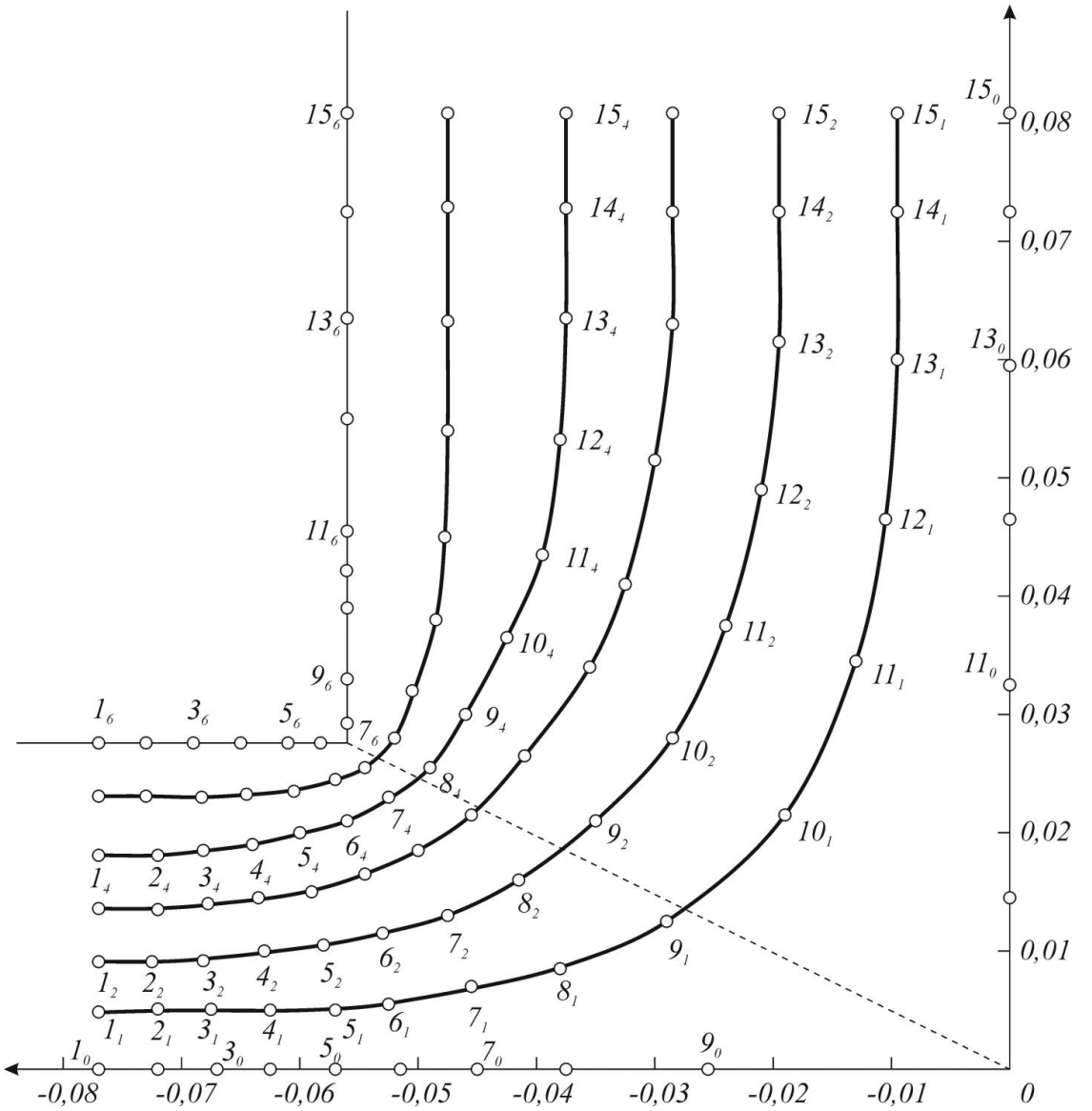


Рис. 3. Вид семейства линий тока для случая резания инструментом с углом $\gamma = 0^{\circ}$

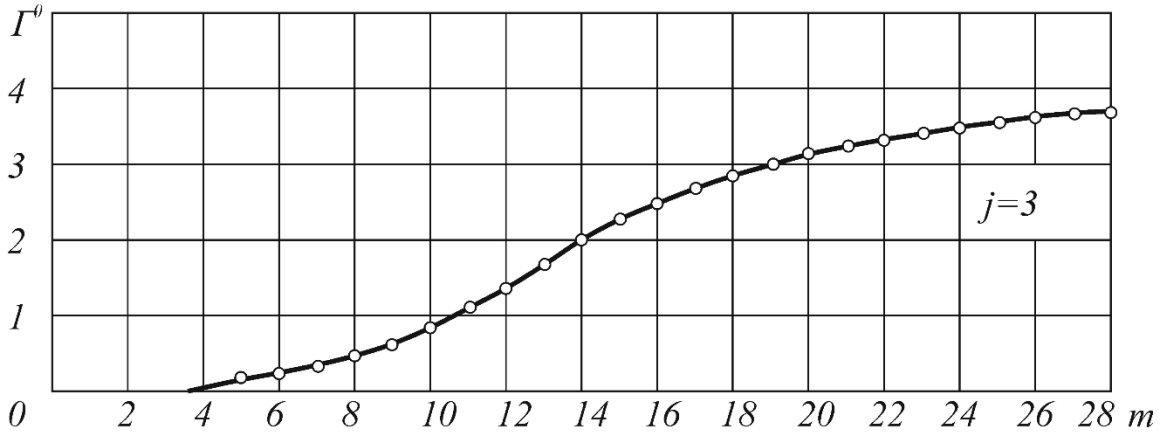


Рис. 4. Картина распределения величин Γ^0 в области D_z по линии тока j =3

Таким образом, метод электрического моделирования процесса резания инструментом с композитом прост и эффективен. Он позволяет с достаточной точностью получить информацию, имеющую практическое значение. Так, например, по величине Γ^0 представляется возможным в дальнейшем определить температурное поле в зоне стружкообразования и энергосиловые параметры искомого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аранзон М.А., Кулаков Г.А. Механика процесса точения высокопрочных сталей резцами из Эльбора-Р// Алмазы и сверхтвердые материалы – 1974 - №4 – с. 17-20.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456с.
3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов.- М.: Машгиз, 1956.- 368 с.
4. Каменкович А.С., Ипполитов Г.М., Музыкант Я.А. Лезвийный инструмент из Эльбора-Р и его применение. Обзор. – М.: НИИМАШ, 1974.- 55 с.
5. Кудряшов Е.А., Никонов А.М. Технологические особенности промышленного использования инструментов из композитов// Вестник ЧитГУ – 2007 - №2 - с.5 - 10.
6. Куфарев Г.Л., Океанов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 169с.
7. Милн-Томсон Л.М. Теоретическая гидромеханика.- М.: Мир, 1964.- 656 с.
8. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля.- М.: Наука, 1966.- 208 с.
9. Сенькин Е.Н. Построение модели процесса стружкообразования и перспективы ее использования// Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием. – Тула: ТПИ, 1980. – с.78-87
10. Фильчаков П.Ф., Панчишин В.И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. – К.: АН УССР, 1961. – 171с.

E.N. Senkin, A.A. Okunev

ELECTRIC MODELLING METAL-REMOVAL PROCESS BY TOOL WITH COMPOSITE INSERTS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article is devoted to the analog simulation method EGDA of a flow chip formation process and to its application for the case of turning bearing steel (HRC 48) by the composite, type 01. The calculation results have shown acceptable precision for practical application and method EGDA has demonstrated simplicity and effectiveness.

Key words: chip formation process, analog simulation, EGDA, composites.

REFERENCES

[1] Aranzon M.A., Kulakov G.A. Mehanika processa tochenija vysokoprochnyh stalei rezcami iz Yel'bora-R// Almazy i sverhtverdye materialy – 1974 - №4 – p. 17-20. (rus.)
[2] Gun G.Ja. Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem. – M.: Metallurgija, 1980. – 456 p. (rus.)
[3] Zorev N.N. Voprosy mehaniki processa rezanija metallov.- M.: Mashgiz, 1956.- 368 p. (rus.)
[4] Kamenkovich A.S., Ippolitov G.M., Muzykant Ja.A. Lezviinyi instrument iz Yel'bora-R i ego primenenie. Obzor. – M.: NIIMASH, 1974.- 55 p. (rus.)
[5] Kudrjashov E.A., Nikonov A.M. Tehnologicheskie osobennosti promyshlen-nogo ispol'zovanija instrumentov iz kompozitov// Vestnik CHitGU – 2007 - №2 - p. 5 - 10. (rus.)
[6] Kufarev G.L., Okeanov K.B., Govoruhin V.A. Struzhkoobrazovanie i kachestvo obrabotannoi poverhnosti pri nesvobodnom rezanii. – Frunze: Mektep, 1970. – 169 p. (rus.)
[7] Miln-Tomson L.M. Teoreticheskaja gidromehanika.- M.: Mir, 1964.- 656 p. (rus.)
[8] Rjazanov G.A. Opyty i modelirovanie pri izuchenii yelektromagnitnogo polja.- M.: Nauka, 1966.- 208 p. (rus.)
[9] Sen'kin E.N. Postroenie modeli processa struzhkoobrazovanija i perspektivy ee ispol'zovanija// Issledovanija v oblasti instrumental'nogo proizvodstva i obrabotki metallov rezaniem. – Tula: TPI, 1980. – p.78-87 (rus.)
[10] Fil'chakov P.F., Panchishin V.I. Integratory JeGDA. Modelirovanie potencial'nyh polej na jelektroprovodnoj bumage. – K.: AN USSR, 1961. – 171 p. (rus.)

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 625.032

К.В. Елисеев

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ В КОНТАКТЕ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ И РЕЛЬСОВ

Кирилл Валентинович Елисеев, ассистент кафедры Компьютерные технологии в машиностроении Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7770, E-mail: kir.eliseev@gmail.com

Аннотация

Для определения сил, действующих в контакте колеса и рельса во время движения подвижного состава, используются системы, включающие в себя измерительные колесные пары и алгоритмы обработки измеряемых величин. Существующие схемы не являются полными, в связи с чем разработан новый метод, позволяющий получать значения всех компонент сил и координат точек контакта. Качество метода подтверждено численными экспериментами.

Ключевые слова: Механика деформируемого твердого тела, измерение деформаций, моделирование, контактные силы, псевдообратная матрица, железные дороги

Введение

Силы, возникающие между колесами и рельсовым путем, являются важнейшими параметрами, характеризующими движение подвижного состава. Анализ контактного взаимодействия используется как для оценки качества пути, так и для анализа новых элементов подвески.

Непосредственное измерение сил затруднено, обычно используются измерения других величин, например деформаций и относительных перемещений, с последующим применением алгоритмов обработки полученных данных. К настоящему времени получили распространение две основные схемы расположения датчиков – на рельсовом пути и на колесной паре. Вторая схема более перспективна ввиду возможности проведения непрерывных измерений на протяженных участках, но требует значительных усилий при создании алгоритмов обработки.

В статье приведен обзор нескольких известных схем измерений, изложены основы новой схемы и приведены некоторые результаты ее применения.

Обзор существующих схем измерений

Работы, связанные с контактом колес и рельсов можно разделить на две группы. К первой относятся аналитические и численные исследования, базирующиеся на упрощенных моделях пути и подвижного состава. Самыми известными являются работы Дж. Калкера [7], в России Ромена Ю.С. [4]. Результаты позволяют изучить основные явления, возникающие во время движения, но не могут быть использованы для анализа реального движения с учетом особенностей пути.

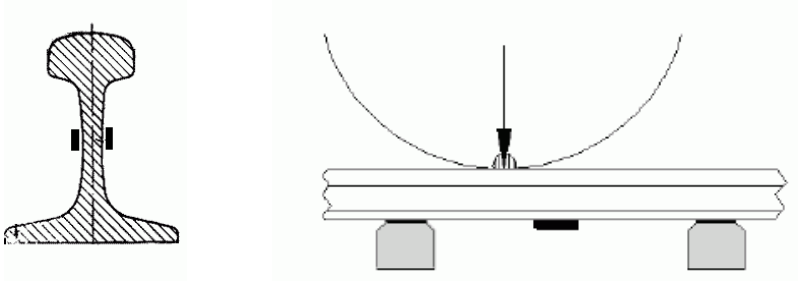
Ко второй группе относятся исследования, ставящие задачей получения характеристик контактного взаимодействия конкретного подвижного состава на реальных участках пути во время движения.

По месту расположения измерительной аппаратуры схемы измерений делятся на

- установленные на рельсовом пути;
- установленные на подвижном составе.

Основной недостаток первой группы – возможность проведения измерения на ограниченном заранее подготовленном участке. Один из вариантов реализации – вертикальная установка тензорезисторов с двух сторон шейки рельса, рис. 1, а. По сумме деформаций можно судить о вертикальной силе, а по разности – о поперечной.

В работе [10] предлагается использовать измерения деформаций для мониторинга путевых конструкций, например мостовых сооружений, для чего устанавливаются пьезоэлектрические измерители деформаций, рис. 1, б.



а б

Рис. 1. Примеры установки датчиков на пути.

Измерительные системы, устанавливаемые на подвижном составе в основном базируются на измерении деформаций колес посредством тензорезисторных датчиков. В этом случае при разработке схемы измерений необходимо увязать в единое целое следующие компоненты:

- колесную пару, геометрия колес которой определяет возможность установки тензометров и их расположение;
- измерительную аппаратуру с ограниченным числом каналов;
- калибровочный стенд;
- алгоритм вычислений сил и координат точек контакта.

Простейшие схемы основаны на установлении связи одной компоненты силы в контакте (обычно вертикальной или осевой) с одним измерителем деформаций.

Например, в системе на рис. 2, а используется 32 датчика на колесе. Часть датчиков установлены в специально вырезанные отверстия. Половина датчиков используется для определения вертикальной силы по сжатию диска, вторая половина – для осевой по изгибу. Измерения проводятся в момент совпадения одного из диаметров с датчиками с вертикалью [8].

В патенте [6] описана схема, включающая тензорезисторы, включенные диаметрально в полумостовые тензометрические схемы и размещенные по разные стороны от оси на концентричных диаметрах на внутренней стороны диска колес, рис. 2б. Блок синхронизации отвечает за определение момента вертикального расположения одного из измерительных диаметров и опрос соответствующих измерительных каналов. Полученные сигналы обрабатываются по специальному алгоритму.

Разработан метод непрерывной регистрации вертикальных и боковых сил взаимодействия колеса и рельса, включающий две мостовые схемы, смонтированные независимо друг от друга по кольцевым орбитам, содержащим радиально расположенные на концентрических окружностях поверхностей по обеим сторонам диска, тензодатчики с интервалом между ними по 45° [6]. Метод заключается в выборе комбинаций сумм и разностей показаний отдельных тензодатчиков в разных точках диска и оси, итоговые показания которых зависят только от одной компоненты силы.

В работе [9] описывается алгоритм определения только вертикальной силы по комбинации измерении тензорезистивных датчиков, которые установлены парами внутри и снаружи диска на одной окружности с шагом 45^0, рисунок 2в. Калибровка производится путем приложения постоянной по величине нагрузки $P0$, при этом точка приложения движется по окружности. Получается калибровочная функция $A(t) = P0/V0(t)$, где $V0(t)$ - регистрируемое измерение. Тогда сила $P(t)$ может быть восстановлена по измерению сигнала $V(t)$ как $P(t) = A(t)^{-1} \cdot V(t)$.

Эксплуатация первых измерительных колесных пар выявила их слабо место, связанное с проводной передачей сигнала с вращающихся частей на неподвижные. Предложен переход к измерению параметров на не вращающихся частях тележки [8]. По расстоянию до диска определяется его изгиб, а по нему осевая сила, рисунок 2г. Измерения вертикального перемещения оси относительно тележки дает оценку вертикальной силы. Для снижения ошибок измерений приходится применять дополнительные меры, а именно для учета зазоров использовать компенсационные датчики, а для снижения осевых смещений использовать подшипники с

уменьшенным осевым зазором и дополнительную обработка поверхности колеса.

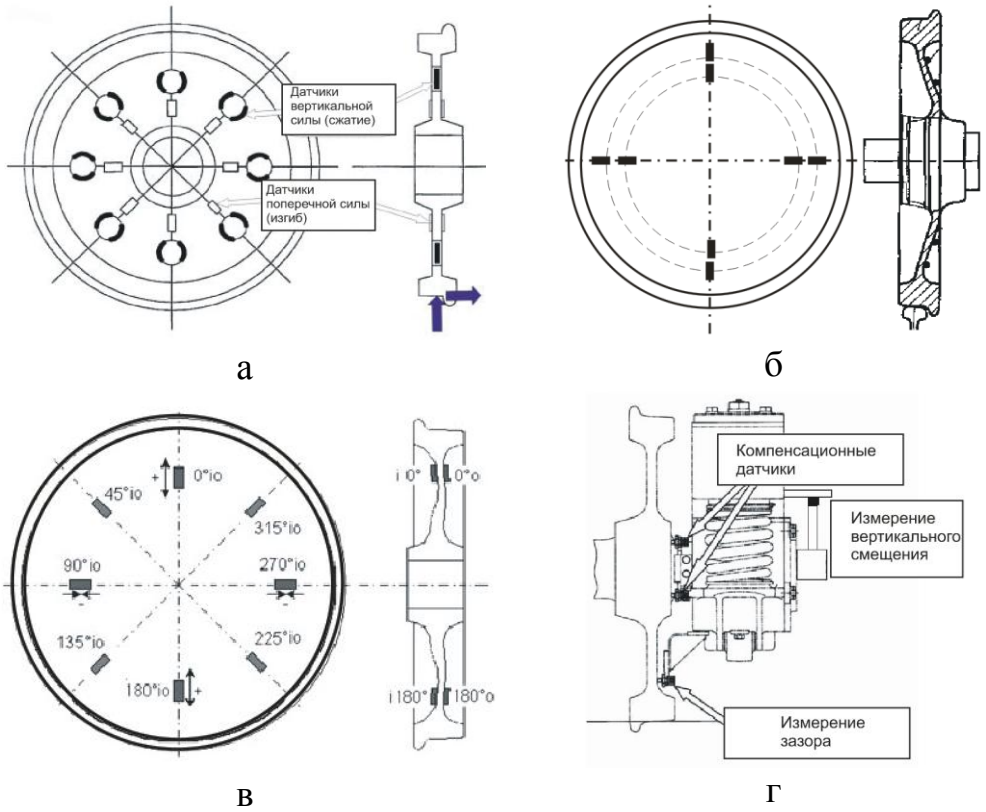


Рис. 2. Примеры установки датчиков

Приведенные выше схемы в той или иной мере обладают следующими недостатками:

- ни в одной не определяется осевая координата точки контакта и продольная компоненты силы
- не учтено влияние координаты точки контакта на результаты измерений
- требуются существенные модификации колеса или тележки, в том числе приводящие к снижению их ресурса
- схемы разработаны для определенных дизайнов колес и не все могут быть применены к новым перспективным вариантам.

Новая схема измерений

Рассматривается колесная пара типа РВ2Ш-957-Г, оборудованная колесами с криволинейным диском. Сечение колеса представлено на рисунке 3. В качестве измерительного и регистрирующего устройства используется радиотелеметрический комплекс, имеющий 64 канала.

В основе алгоритма лежит связь между приращениями измеряемых деформаций $\Delta\varepsilon$ и приложенных сил и координат точек контакта ΔR вида

$$\Delta\varepsilon = A\Delta R \qquad (1)$$

здесь матрица A — матрица Якоби размера $n \times m$.

Так как здесь число уравнений $n=64$ больше числа неизвестных $m=8$, система уравнений, как правило, не имеет точного решения. В этом случае, предлагается находить так называемое «псевдорешение», которое дает вектор-столбец ΔR, минимизирующий евклидову норму ошибки $\|A\Delta R-\Delta\varepsilon\|$,

$$\Delta R=\left(A^TA\right)^{-1}A^T\Delta\varepsilon \qquad (2)$$

Для вычисления коэффициентов матрицы A используется конечно-элементная модель колесной пары, закрепленной в подшипниках. Задаются силы, действующие со стороны рельсов на колеса и их приращения. Проводятся измерения деформаций на поверхностях дисков колес [2].

Анализ результатов расчетов привел к следующему варианту расстановки датчиков - на 2-х окружностях внутри каждого колеса, с шагом 22.5^0, измеряются радиальные деформации. Расстановка учитывает:

- зоны наибольшей чувствительности к изменениям сил;
- возможность восстановления распределения деформаций вдоль окружности;
- возможность определения угла поворота колеса.

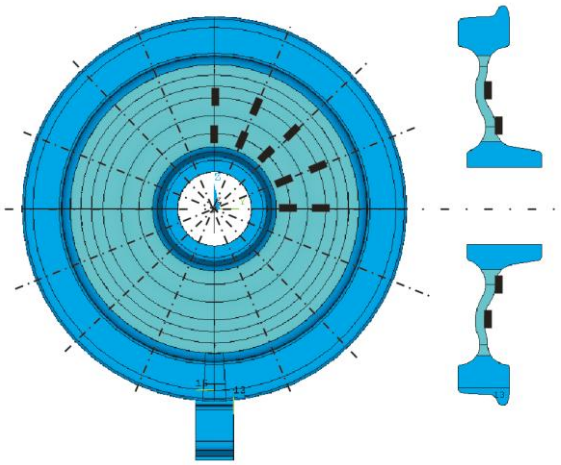


Рис. 3. Схема расстановки тензорезисторов на колесе (показаны на 1/4 диска).

Проведены численные эксперименты по восстановлению значений приложенных сил и координат точек их приложения в статике, получены удовлетворительные результаты. Разработана схема калибровки на стенде, позволяющая уточнить коэффициенты используемых в алгоритме матриц [1,2].

Учет инерционности диска и примеры расчетов

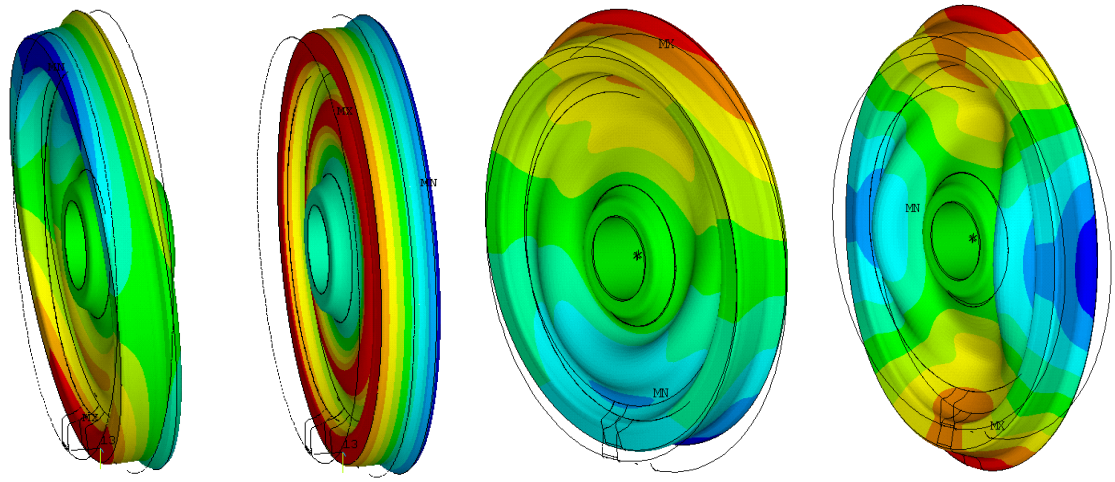
При разработке алгоритмов вычисления сил по измеренным деформациям в первую очередь учитывается поведение колесной пары при

статическом нагружении. Проверка и калибровка системы также в большинстве случаев возможна при статическом нагружении – стенды, моделирующие движение пары существенно более сложны в изготовлении. Также следует отметить, что проверить алгоритмы в динамике возможно только с применением моделей движения поезда.

В то же время вполне вероятно возникновение существенно динамических нагрузок, связанных с природой движения тележки по рельсам, параметрами вагона и пути, дефектами пути и колес [9].

В том случае, если спектры сил содержат гармоники с частотами, близким к собственным частотам колеса, соответствующие гармоники деформаций могут существенно превышать статические значения. Величины сил, вычисленные с учетом статической калибровки будут иметь завышенные значения.

Для используемого в измерительной паре колеса первая и вторая собственная частота составляет 152Гц, третья 223Гц. Особого внимания требуют формы 9-12 с частотами 958Гц и 1416Гц, для которых характерны существенные радиальные деформации в местах установки тензорезисторов, рис. 4.



Формы 1 и 2 Форма 3 Формы 9 и 10 Формы 11 и 12

Рис. 4. Собственные формы колебаний, осевые перемещения.

Для анализа возможности восстановления сил были проведены численные эксперименты с конечноэлементной моделью одного колеса. В точке контакта прикладывались гармонические нагрузки с низкими частотами (20Гц и 50Гц), околорезонансной (151Гц) и послерезонансной (175Гц).

Расчеты показали, что существенное влияние на результаты оказывает выбор коэффициента демпфирования β, который определяет матрицу демпфирования в уравнении движения

$$M\ddot{U} + B\dot{U} + CU = F \text{, где} \qquad (3)$$

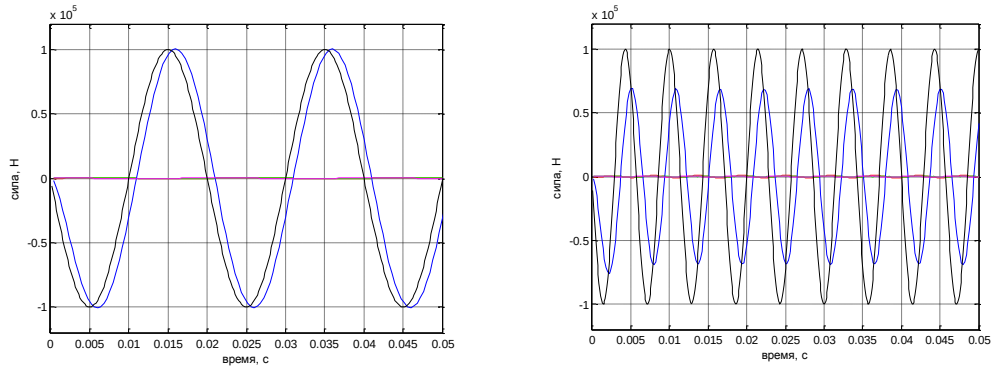
M – матрица масс,

B – матрица демпфирования, $B = \beta C$,

C – матрица жесткости,

U – вектор узловых координат, F – вектор узловых сил.

Так, при выборе слишком большого значения коэффициента $\beta = 0.01$с, получаются заниженные значения сил. В расчетах с нулевым демпфированием получены высокочастотные осцилляции решения, а на околорезонансной частоте неограниченный рост сил. При значении коэффициента $\beta = 0.001$с восстановлены силы для низких частот, рис. 5., а для высоких это демпфирование представляется завышенным. Результаты для высоких частот содержат такие дефекты как существенный сдвиг по фазе, восстановление лишних компонент сил.



Частота 50Гц Частота 175Гц

Рис. 5. Результаты восстановления вертикальной гармонической силы. Черные кривые - заданные силы, синие - восстановленные.

Таким образом можно сделать вывод о существенной роли демпфирования материала колеса. Также можно говорить об удовлетворительном восстановлении сил в частотном диапазоне до первой собственной частоты.

При движении состава на скоростях 80-120км/ч можно ожидать возникновения периодических сил в частотном диапазоне до 110Гц, которые обусловлены вращением колес при движении, периодичностью расположения шпал, длинными (300-450мм) дефектами пути.

В монографии [3] приведены спектральные плотности сил и ускорений, возникающих при движении электропоезда ЭР200. Наибольший вклад вносят гармоники с частотами 1-3Гц, отмечаются всплески в диапазоне 3-16Гц.

Таким образом, можно ожидать, что наиболее существенные гармоники сил в контакте попадут в допустимый диапазон и будут найдены.

Была проведена серия численных экспериментов, в которых использованы значения сил, полученные на модели движения вагонов на тележках 18-9810 и 18-9855 [5]. На рисунке 6 представлены примеры

зависимостей сил от времени и спектры амплитуд сил для случая движения нагруженного вагона по прямому участку пути.

Основной вклад вносят гармоники с частотами до 50-100Гц. Алгоритм дает возможность получить значения прикладываемых сил с требуемой точностью.

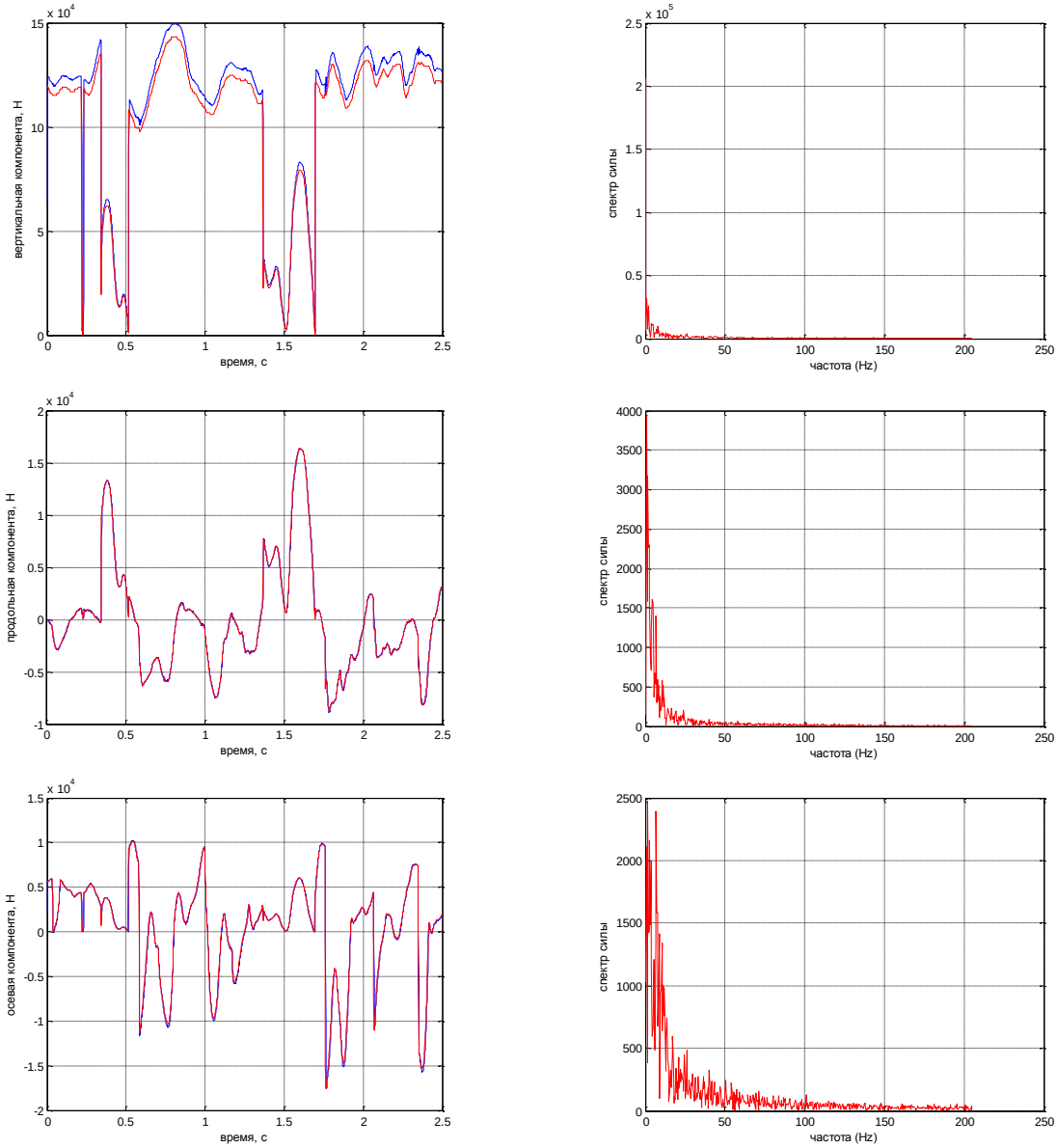


Рис. 6. Графики изменения задаваемых сил в контакте (красный) и восстановленных сил (синий) от времени. Спектры амплитуд сил.

Заключение

В статье приводится обзор известных современных схем определения сил в контакте колесной пары и рельсов. Дается краткое описание нового метода, позволяющего получать все компоненты сил и координаты точек контакта. Полученные результаты показывают, что ошибка в восстановлении динамически меняющихся сил не превосходят 5% для

вертикальной компоненты. Ведется работа по включению в анализ частот гармоник сил в диапазоне до 2000 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. 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.
3. Взаимодействие пути и подвижного состава при высоких скоростях движения и повышенных осевых нагрузках / Львов А.А. [и др.]; под ред. Львова А.А. – М. "Транспорт" 1978. –133 с.
4. Ромен Ю.С. Исследование бокового воздействия подвижного состава на путь с применением электронных вычислительных машин // Труды ВНИИЖТ Выпуск 385. – М.: «Транспорт» –1969. – с. 71-94.
5. Саидова А.В., Орлова А.М. Разработка математических моделей вагонов на тележках 18-9810 и 18-9855 для исследования износов колес // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна –2013. – №2 (44) – С. 118-123.
6. Пат. 2441206 РФ, УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И БОКОВЫХ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ КОЛЕСОМ И РЕЛЬСОМ/ Краснов О. Г., [и др.] -2010
7. Kalker J.J. Simplified theory of rolling contact // Delft progress report. Series C: Mechanical and aeronautical engineering and shipbuilding. – 1973. – Vol. 1. – P. 1-10.
8. Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations / Matsumoto A. [etc.] // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility – 2012.– Vol. 50, Supplement – P. 349-364.
9. 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
10. K. Sekuła , P. Kołakowski Identification of Dynamic Loads Generated by Trains in motion using Piezoelectric Sensors // PROCEEDINGS OF ISMA2010 INCLUDING USD201 – 2013.– p.1099-1118

K.V.Eliseev

MODERN METHODS OF CONTACT FORCES BETWEEN WHEELSET AND RAILS DETERMINING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Systems that contain instrumented wheelsets and algorithms of measurements evaluations are used to obtain contact forces between wheels and railway while car is moving. Existing schemes do not allow to obtain all contact characteristics, thus the new method of evaluations was developed. It allows evaluation of all contact forces components and contact points coordinates. Numerical experiments were conducted to prove method quality.

Key words: Structural mechanics, strain measurement, inverse problem, simulation, contact forces, railway technology

REFERENCES

[1] 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.)

[2] 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) – p. 262-270. (rus.)

[3] Interaction of track and rolling stock at high speeds and high axial loads / Lvov A.A. [etc.] – M. "Transport 1978. –133 p. (rus)

[4] Romen S.U. Study of side effects of rolling stock on the way with the use of computers// Works of VNIIZT vol. 385. – M.: Transport –1969. – c. 71-94. (rus)

[5] Saidova A.V., Orlova A., Development of mathematical models of cars carts 18-9810 and 18-9855 for the study of wheel wear// Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after acad. V. Lazaryana–2013. – vol.2 (44) – p. 118-123.(rus)

[6] Pat. 2441206 RU. , 02.11.2010 Device for measuring of vertical and lateral forces between wheel and rail / Krasnov O. G., [etc.] -2010

[7] Kalker J.J. Simplified theory of rolling contact // Delft progress report. Series C: Mechanical and aeronautical engineering and shipbuilding. – 1973. – Vol. 1. – P. 1-10.

[8] Continuous observation of wheel/rail contact forces in curved track and theoretical considerations / Matsumoto A. [etc.] // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility – 2012.– Vol. 50, Supplement – P. 349-364.

[9] 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

[10] K. Sekuła , P. Kołakowski Identification of Dynamic Loads Generated by Trains in motion using Piezoelectric Sensors // PROCEEDINGS OF ISMA2010 INCLUDING USD201 – 2013.– p.1099-1118

УДК 621.7

В.А. Клевцов, В.В. Максаров

ОБ ОСНОВАХ РАЗВИТИЯ «КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» В МАШИНОСТРОЕНИИ

Владилен Андреевич Клевцов**,** канд. техн. наук, доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(960)2517594 E-mail: sapr2k8@yandex.ru

Вячеслав Викторович Максаров**,** д-р техн. наук, профессор
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)7593504 E-mail: maks78.54@mail.ru

Аннотация

В работе представлены некоторые итоги реализации принципов системности, преемственности, унификации и автоматизации, как методологической основы развития базы технических знаний (БТЗ) и методики обучения. В качестве объекта иллюстрации выбран сегмент БТЗ, составляющий теорию технического проектирования и затрагивающий основные понятия «взаимосвязи» в системных объектах «техносферы». Предлагаемое совершенствование есть результат многолетней научно-педагогической деятельности авторов в области технического проектирования и его автоматизации (САПР). Результаты опробированы и внедрены в научной и педагогической сферах.

Ключевые слова: база знаний, методология, принципы, системность, преемственность, унификация, автоматизация, структура, теория, техническое проектирование, интегративное свойство, семантика, дедукция.

Раскрывая суть модного сейчас понятия «компьютерные технологии», следует сказать, что оно затрагивает проблему автоматизации информационного процесса. Применительно к машиностроению в качестве массовой разновидности последнего следует назвать процесс технического проектирования. Учитывая многообразие в этой области объектов проектирования, предложим свою версию семантики этого процесса:

> Проектирование – дискретный процесс «преобразования информации» с целью принятия решений, *ограничивающих должным образом неопре-*

делённость знания об «объекте проектирования» и описания результатов на соответствующем языке.

Значит и все структурные составляющие этого процесса имеют ту же семантику, но только с естественным различием на каждом шаге содержания «объекта познания», конкретизируемого по ходу этого процесса, осуществляющими его процедурами. Таково формальное толкование процесса, призванного реализовать положения «принципа преемственности» путём использования соответствующего «арсенала накопленных знаний».

Как же с учётом потенциально большого многообразия объектов проектирования подойти к решению рассматриваемой проблемы? Авторы дают ответ на этот вопрос с учётом своей многолетней научно-педагогической деятельности в этой области. Они считают, что главным условием успеха здесь и это подтверждает жизнь, служит наличие *прочного фундамента*, в котором следует выделять *методологическую и научную* составляющие с бесспорным приматом первой. Подчёркнутая иерархия отражает роль методологии в развитии научного знания и создания на её основе системы знаний (БТЗ) с должным развитием в ней понятийной и процедурной сторон. Состав методологии был озвучен ещё в 60-е годы прошлого столетия в рамках решения Государственной задачи комплексной автоматизации производства и, в частности, его технической подготовки, в которой процессы технического проектирования играют доминирующую роль.

Упомянутый состав включает четыре принципа: системности, преемственности, унификации и автоматизации, с разных сторон комплексно затрагивающих рассматриваемую проблему.

Но провозглашение принципов это всего лишь первый шаг в поступательном направлении, ибо принцип это всего лишь «лозунг», который становится «руководством к действию» только после раскрытия его сущности и разработки концепции, методики, алгоритмов реализации. Вот почему при выполнении научно-исследовательских работ по упомянутой выше тематике авторами было уделено особое внимание проработке именно этих сторон проблемы и предложены оригинальные трактовки положений по каждому принципу применительно к условиям реализации в технической области знаний и с учётом их сделаны определённые шаги в сторону её развития.

В настоящем докладе представлены некоторые результаты использования методологии для развития понятийной стороны «теории технического проектирования» объектов машиностроения с учётом необходимости её формализации. Приведём центральное понятие предметной области знаний в предлагаемой редакции:

Система − *конечное, взаимосвязанное множество элементов*, выделенных из окружения (среды), функционирование которых имеет *четкую целенаправленность* в рамках рассматриваемой проблемы (задачи) и оп-

ределенного при этом временного интервала.

Одним из основных исходных обобщенных понятий современной теории технического проектирования следует считать понятие «Т-система», охватывающее с определенной коррекцией соответственно объект проектирования, конструирования, изготовления, эксплуатации и технические средства, участвующие в соответствующих «процессах преобразования». Все они и образуют «техносферу» современного мира, представляющую собой область использования рассматриваемых понятий.

Как уже отмечалось выше, *исследование «Т-систем» предполагает выявление и описание положения и поведения их в пространстве*. Относительность понятия «Т-система» обуславливает конкретизацию так же относительного по содержанию понятия «*пространство*». Так, при *микроисследовании Т-системы рамки охватываемого при этом пространства ограничиваются объемом, занимаемым самой системой*, при *макроисследовании* они раздвигаются, но в любом случае ограничены и на каждом этапе исследования должны быть конкретизированы. Этим раскрывается смысл введенных при описании сути системного подхода понятий «реальное (внутреннее) окружение» с относительными пространственными границами, соответственно оговоренными выше и «полное окружение», рамки которого определяются в зависимости от постановки задачи исследования.

Отражая характерную для системного подхода относительность содержания понятий, дедуктивное направление их конкретизации при рассмотрении общих положений взаимосвязи будем оперировать обобщенными категориями: «объект», «взаимосвязь объектов». В конкретных же задачах исследования в роли «объекта» будут выступать: «Т-система», «элемент системы» любого уровня ее иерархической организации. Уточним, что под «*элементом системы*» при выявлении ее состава в ходе исследования морфологии *следует понимать часть ее, рассматриваемую на этапе исследования как единое целое*. Больше того, декларирование в методике системного исследования принципа «гомеостата» предполагает возможность и необходимость представления одного и того же объекта на одном этапе исследования как единого целого, а на другом – сложным образованием, дифференцируемым на составляющие элементы соответствующего содержания. Это, с одной стороны, отражает иерархизм организации системы, а с другой, возможность структурирования задачи исследования, этапности этого процесса, а, следовательно, облегчения решения проблемы.

При формировании обобщенного понятия «*взаимосвязь объектов*» будем исходить из принципа, что в системе все должно быть *функционально обусловлено*. Это требование касается всех компонентов ее морфологии: состава, связей, отношений, и т.д. Поэтому, выделяя информационную составляющую понятия, скажем, что «связь объектов» *это свойство взаимодействующих объектов, характеризующее «наложение» ею «ограничений*

неопределённости» в исполнении функции процесса, при этом формально оцениваемое степенями «свободы» в широком толковании последнего слова.

Конкретизация его и предполагает раскрытие функций такой взаимосвязи. Так, применительно к выделенному «в качестве объекта исследования» «топологическому» виду связей объектов *«свобода» означает информационную неопределенность в поведении их в пространстве в период функционирования, «степень» – меру в ее формальной оценке*. Модель ситуации с упомянутой неопределённостью наглядно иллюстрирует рис. 1, а, при этом «степень» её, как «мера полной неопределённости» для трёхмерного пространства, принято формально оценивать и описывать цифрой 6.

Сопоставим для восприятия смысла «ограничений» в ситуациях, иллюстрируемых моделями рис. 1, а, б, оставив пока в стороне оценку «меры» самих ограничений.

Учитывая, что поведение охватывает две возможные фазы существования системы: покоя (статического состояния) и движения, выделим при дифференцировании функций топологической связи две ее составляющих функции:

- устранения неопределенности взаимного положения;
- устранения неопределенности их взаимной подвижности для обеспечения согласованного относительного движения.

Для выполнения первой функции предусматривается *геометрическая*, второй – *кинематическая* связи, как составляющие разновидности вида. Приведем определение первого из выделенных понятий, используя упомянутый алгоритм конкретизации общего:

> Геометрическая связь взаимодействующих объектов – свойство, характеризующее «наложение» им ограничений потенциально возможной степени неопределенности взаимного положения первых в пространстве при рассматриваемом функционировании системы.

Обобщенные модели ситуаций взаимосвязи объектов представлены на рис. 1, б.

Говоря о сферах использования понятий, отметим, что *геометрическая* связь имеет место быть во все периоды существования «Т-систем» и на всех уровнях (гетерогенном, гомогенном) иерархического их строения. Отсюда подчеркнутая важность единой методики исследования и формирования понятий для описания их результатов.

При этом будем различать, с учётом объективности их наличия, в роли «объектов исследования» *бинарную геометрическую связь* двух объектов (модели рис. 1, б, в, г) и *структуру геометрической связности объектов* в выделяемом в качестве обособленного системном образовании (рис. 1, д). И здесь же покажем потенциальную многовариантность структуры с учётом численности охватываемого ею состава (рис. 1, д 1, 2, 3), выявленную и исследованную в теории графов, используемой для их моделирова-

ния в данных исследованиях. *Это весьма важная особенность системы, изучению которой следует уделить особое внимание*, ибо при проектировании системы разработчику необходимо с учетом этого осуществлять аргументированный выбор из этого возможного множества вариантов одного.

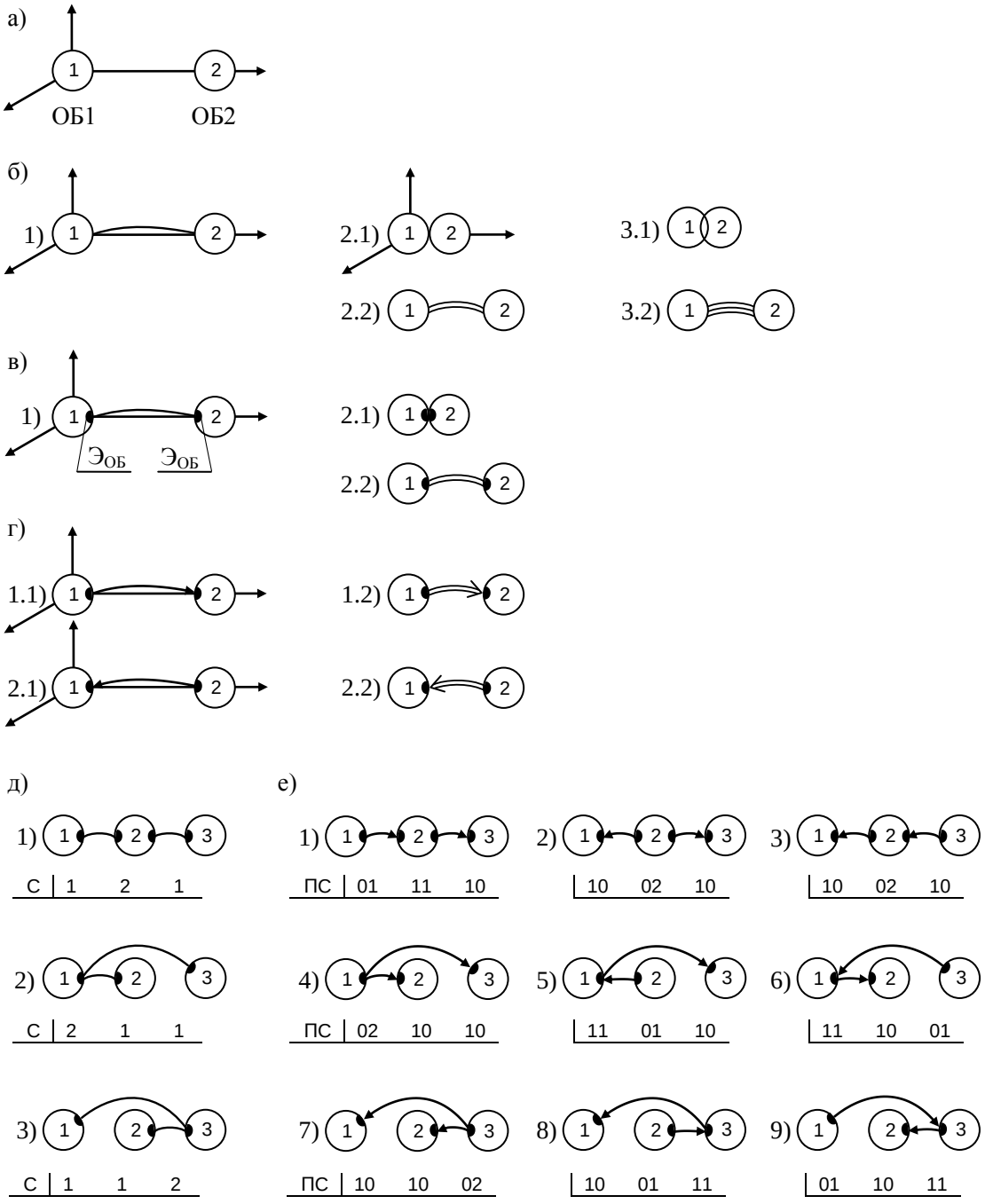


Рис. 1. Модели ситуаций геометрической взаимосвязи объектов

Между тем ни в регламентирующем документе [7], ни в современной учебной литературе это пожелание не нашло должной реализации, что следует считать недостатком, требующим устранения путём развития и фиксации соответствующих знаний.

При моделировании взаимосвязи для формального отражения её особенностей целесообразно использовать разработанный в теории графов аппарат и, в частности, численные показатели связности (С и ПС) объектов в моделях структур связей, называемых соответственно неориентированными (G) (рис. 1, д 1, 2, 3), ориентированными $\overline{G}$ (рис. 1, е 1 ... 9) графами. В них для первых С – число связей каждого объекта с другими в структуре (в теории графов- *степень вершины*), для вторых ПС– двухразрядное число, в котором первый разряд фиксирует число подходящих (полустепень подхода), второй – исходящих (полустепень исхода) связей в исследуемой структуре. Примеры фиксирования названных *показателей связности* приведены в одномерных таблицах, изображённых здесь же соответственно ниже для каждой графовой модели структур взаимосвязи объектов 1, 2, 3.

Среди *свойств*, характеризующих *связь*, с позиции системного подхода предлагается выделять *качественные* (признаки) и *количественные* (параметры) их разновидности. В отношении первых можно высказать лишь суждение типа «да – нет», то есть при взаимодействии этот признак (свойство) присутствует или нет. В рассматриваемой задаче исследования, этот признак способен смоделировать информацию о «степени свободы», как единичной мерной характеристике ограничений при взаимосвязи, но для оценки полной картины взаимосвязи объектов в трёхмерном пространстве рационально для большей информативности использовать матричное представление потенциально возможного комплекса таких характеристик (линейных – вдоль (L), угловых (α) – вокруг осей координат в принятой трёхмерной системе) с действительными значениями признака в каждой из них (рис. 2).

Учитывая гипотетически возможное разнообразие указанных характеристик (X_L ; Y_L ; Z_L ; X_α ; Y_α ; Z_α), положение любого рассматриваемого объекта можно уже частично представить единичным шестимерным вектором, каждый элемент которого характеризует наличие или отсутствие ограничений на положение объекта соответственно по каждой перечисленной выше разновидности.

Этот шестимерный вектор корректно описывается шестиклеточной таблицей, макет которой представлен ниже. Элементами ее выступают упомянутые признаки, рассматриваемые при моделировании как логические переменные, характеризующие наличие (1) или отсутствие (0) ограничений на положение объекта по каждой возможной разновидности.

Однако, с учётом вида (гомогенная или гетерогенная) Т-системы комплексные показатели признака со значениями названных логических переменных по каждой клетке матрицы будут различны.

Так, для первых он будет одноразрядным, для вторых-двухразрядным, каждый разряд которого отражает значение признака соответственно по каждому из двух потенциально возможных направлений для разновидностей характеристики ограничений. Всё это обусловлено как различием вида связей (*положения или сопряжения*), так и особенностями конструктивного обеспечения связи *сопряжения* в каждой паре взаимодействующих объектов.

Координаты / Вид ограничения	*X*	*Y*	*Z*
Линейное (L), вдоль оси			
Угловое (α), вокруг оси			

а)

0	0	0	00	00	00
0	0	0	00	00	00

б)

1	1	1	11	11	11
1	1	1	11	11	11

в)

0	1	1	00	01	01
0	1	1	00	10	10

Рис. 2. Макет «модели ограничений» и примеры из потенциально возможных её вариантов.

На рис. 2 приведены примеры нескольких из потенциально возможных вариантов заполнения матриц моделей для а) гомогенных, б) гетерогенных Т-систем.

В них первый ряд соответствует ситуации полного отсутствия ограничений, второй – полному их набору, третий – частичному набору ограничений.

Описание количественных свойств в технической литературе [5] осуществляется с использованием термина «размер» и таких его конкретных значений, как *минимальный, номинальный, максимальный* размеры. Но так как любая Т-система, и, в частности, её разновидность Т-система «деталь» (ТСД), это собирательный образ некоторого множества конкретных представителей системы, каждый из которых способен выполнить предписанную ей функцию, поэтому для отражения этого факта и с учётом потенциальной индивидуальности корректно использовать при описании

словосочетание «*параметр размера*» (Р), что подчёркивает наличие ограничений множественности значений последнего, определяемого числовыми рамками граничных значений.

При исследовании Т-систем (например, ТСД) рационально различать [1] по функциональному назначению *размеры элементов* и *размеры связей между элементами.* Именно этот фактор и регламентирует выбор в рамках множественного значения параметра Р их номинального значения $Р^{ном}$ и вычисления с учётом этого ВО, НО, $IT_Р$ при описании «параметра размера» в каждом конкретном случае.

И уже с учётом величины $Р^{ном}$ будем различать *три разновидности геометрических связей*: *положения* (рис. 1, б 1); *сопряжения* (рис. 1, б 2.1 2.2); *пересечения* (рис. 1, б 3.1 3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов В. А., Максаров В. В., Методология научного творчества: учебно-методический комплекс. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. – 109 с.
2. Клевцов В. А. Некоторые итоги реализации принципа системности при техническом проектировании // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 40 – СПб.: СЗТУ – 2010 – с. 139-148.
3. Клевцов В. А., Максаров В. В., Падун Б. С. Из истории формирования методологии развития техносферы // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 41 – СПб.: СЗТУ – 2011 – с. 201-227.
4. Клевцов В. А. Некоторые итоги реализации принципа системности при техническом проектировании // Проблемы машиноведения и машиностроения: Сборник трудов. Вып. 41 – СПб.: СЗТУ – 2011 – с. 246-266.
5. Допуски и посадки. Справочник. В2-х т. Т.I. / В. Д. Мягков, М. А. Палей, Н. Б. Романов, В. А. Брагинский. 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982 – Ч.1. – 543 с.
6. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 312 с., ил.
7. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. ГОСТ 21495-76. – М.: Госстандарт, 1976

V.A. Klevtzov V.V. Maksarov

ON THE BASIS OF COMPUTER TECHNOLOGIES DEVELOPMENT IN MECHANICAL ENGINEERING

National Mineral Resources University (Mining University), Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents some results of implementation of the principles of system, succession, unification and automatization, as a methodological basis for development of technical knowledge base (BTZ) and teaching methods. BTZ segment comprising theory of technical engineering and touching upon principles of interrelation in system objects of technosphere was chosen as an illustration of the subject matter. Improvements in said segment after years of authors' research and teaching in the field of technical design and automation (SAPR) have affected conceptual and procedural sides of the problem. Results were tested and implemented in scientific and educational spheres.

Keywords: knowledge base, methodology, principles of system, succession, unification, automatization, structure, theory, technical engineering, integrative property, semantics, deduction.

REFERENCES

[1] Klevtzov V. A., Maksarov V. V., Metodologija nauchnogo tvorchestva: uchebno-metodicheskij kompleks. – SPb: Nacional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet «Gornyj», 2013. – 109 p. (rus.)

[2] Klevtzov V. A. Nekotorye itogi realizacii principa sistemnosti pri tehnicheskom proektirovanii // Problemy mashinovedenija i mashinostroenija: Sbornik trudov. Vyp. 40 – SPb.: SZTU – 2010 – p. 139-148. (rus.)

[3] Klevtzov V. A., Maksarov V. V., Padun B. S. Iz istorii formirovanija metodologii razvitija tehnosfery // Problemy mashinovedenija i mashinostroenija: Sbornik trudov. Vyp. 41 – SPb.: SZTU – 2011 – pp. 201-227. (rus.)

[4] Klevtzov V. A. Nekotorye itogi realizacii principa sistemnosti pri tehnicheskom proektirovanii // Problemy mashinovedenija i mashinostroenija: Sbornik trudov. Vyp. 41 – SPb.: SZTU – 2011 – pp. 246-266. (rus.)

[5] Dopuski i posadki. Spravochnik. V2-h t. T.I. / V. D. Mjagkov, M. A. Palej, N. B. Romanov, V. A. Braginskij. 6-e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1982 – Ch.1. – 543 p. (rus.)

[6] Kulagin V. V. Osnovy konstruirovanija opticheskih priborov: Ucheb. posobie dlja priborostroitel'nyh vuzov. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1982. – 312 p., il. (rus.)
[7] Bazirovanie i bazy v mashinostroenii. Terminy i opredelenija. GOST 21495-76. – M.: Gosstandart, 1976 (rus.)

ИННОВАЦИОННОЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 330.322.011

Д.А. Гаранин[1], А.А. Клавдиев[2]

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ИНВЕСТИЦИОННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

[1]Гаранин Дмитрий Анатольевич, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра предпринимательства и коммерции
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(911) 924-09-55, E-mail: garanin@kafedrapik.ru

[2]Клавдиев Александр Александрович, к.т.н., доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: kss1959@mail.ru

Аннотация

Оценка эффективности инвестиционных проектов предполагает оценку абсолютной и относительной эффективности. Последняя основывается на сравнении проекта с эталонным (аналогичным). Это ставит проблему обоснованного выбора инвестиционных проектов с использованием современного математического аппарата, позволяющего снизить субъективность, повысить уровень обоснованности принимаемых решений, при этом отвечающего принципам адекватности, точности и надежности. Авторы предлагают подход сравнения инновационных проектов, основанный на теории подобия.

Ключевые слова: инновации, инвестиции, эффективность.

Оценка эффективности инвестиционных проектов предполагает оценку абсолютной и относительной эффективности. Последняя основывается на сравнении проекта с эталонным (аналогичным) с применением, как правило, традиционных показателей коммерческой эффективности (NPV, PI, IRR, ROI). Однако, в инновационной сфере значительные трудности вызывает выбор аналогичного проекта, который часто не имеет прямых аналогов, обладает уникальностью. Одновременно возникает необходимость оценки большого количества (потока) уникальных, малых по инвестициям инвестиционных проектов, различающихся сферами, объектами инвестиций, размером требуемых инвестиционных ресурсов. Это ставит проблему обоснованного выбора инвестиционных проектов с использованием современного математического аппарата, позволяющего снизить субъектив-

ность, повысить уровень обоснованности принимаемых решений, при этом отвечающего принципам адекватности, точности и надежности. Выработанные предложения позволят снизить уровень инвестиционного риска, повысить скорость принятия инвестиционных решений, снизят длительность прединвестиционной стадии жизненного цикла инвестиций.

Оценка эффективности инвестиций заключается в исследовании эффективности инвестиционных решений в условиях ограниченной, неполной и часто недостоверной информации, что требует проработки вопросов формирования научно обоснованных инвестиционных решений. Разработка методологии принятия решений по тому или иному инвестиционному проекту с использованием системного подхода позволит развить теорию экономико-математического моделирования, теорию принятия решений и методов анализа и управления сложными экономическими процессами.

Одним из основных принципов системного подхода применительно к проблеме управления инвестиционными процессами является принцип неопределенности и стохастичности. Суть его состоит в том, что изменение параметров инвестиционного проекта в ходе его реализации происходит под влиянием различных, в том числе случайных воздействий. При этом необходимо учитывать, что исходная информация, которую реально удается собрать и подготовить для решения задачи, оказывается, как правило, в значительной степени неполной и неточной. Статистическому анализу может быть подвергнута лишь некоторая часть всей совокупности параметров (характеристик), статистическое обследование всей генеральной совокупности затрудняется малым объемом наблюдений.

Решений проблемы обоснования инвестиционных решений на стадии принятия решения об инвестировании является применение теории подобия и моделирования.

Учение о подобии и моделировании возникло более четырехсот лет тому назад. Леонардо да Винче, Микеланджело, Галилеем делались попытки обосновать методы моделирования и применять их в различных областях: архитектуре, механике, геометрии, астрономии. Однако первые научные формулировки условия подобия были получены И. Ньютоном в его работе «Математические начала натуральной философии», в которой он рассматривает движение материальных тел и устанавливает законы их подобия. Им были открыты пути применения и моделирования механических систем и их критерии.

Академик М.В. Кирпичев [1] в своих работах показал, что теория подобия является теорией эксперимента и моделирования. Она указывает, каким образом нужно ставить опыт, обрабатывать опытные данные, а также обобщать и распространять полученные результаты на другие объекты.

В настоящее время актуальнейшей проблемой является развитие тео-

рии подобия применительно к задачам исследования больших, сложных и неоднородных систем и объектов.

Теория подобия имеет несколько аспектов получения и обобщения информации о свойствах сложных систем по результатам исследования аналогов и физических явлений. Она является основой для построения системных методов обоснования технических решений задач управления.

Несмотря на многообразие работ, посвященных методам сокращения объемов и продолжительности наблюдений для производства стохастических оценок различного вида, отсутствуют эффективные методы, базирующиеся на едином подходе к решению задач на основе использования разнородной информации, имеющейся в ограниченном объеме.

В общем виде теория подобия показывает, что любая функциональная зависимость между физическими параметрами исследуемого объекта может быть представлена в виде зависимостей между критериями подобия, составленными из физических параметров. При этом различают полное, неполное (частичное, локальное, функциональное), приближенное и другие виды подобия, используемые в соответствующих способах моделирования [3].

Особое место занимает стохастическое подобие, описание которого дается как в «теории стохастического подобия», так и в «стохастической теории подобия». Суть обоих постановок сводится к описанию подобия стохастических объектов методами теории вероятностей и математической статистики. Используя геометрическую интерпретацию, отметим, что речь в данном случае может идти о подобии множества многоугольников, стороны которых имеют случайные размеры.

Таким образом, объектами исследования теории стохастического подобия в рассматриваемой постановке являются выборки наблюдений случайных величин, допускающие любую физическую интерпретацию.

В обобщенном понятии подобие явлений определяется как пропорциональность друг другу всех величин, характеризующих явления, а коэффициенты пропорциональности (константы подобия) сохраняют постоянное значение во всех точках системы для определенного наименования величин, но являются различными для величин разного наименования. Подобие явлений можно также выражать и так называемыми инвариантами подобия (idem), что означает «то же самое».

Необходимо отличать понятия «константа подобия» и «инвариант подобия». Константа сохраняет постоянное значение во всех точках системы, но она будет иной, когда одна пара подобных явлений заменяется другой. Инвариант подобия, наоборот, различен для разных точек системы, поскольку он изображает одну из величин этой системы, имеющую разное численное значение в разных точках системы. Инвариант подобия не меняется при переходе от одного явления к любому другому, подобному ему,

т.е. сохраняет одно и то же значение в сходственных точках всей группы подобных явлений.

Константы подобия не являются произвольными. Связь величин, входящих в константы подобия, определяется закономерностью физического явления и выражается в виде уравнений. Наличие такого уравнения, устанавливающего зависимость между величинами, налагает определенные ограничения и на константы подобия.

Здесь прослеживается связь понятий «константа подобия» и «инвариант подобия» стохастически подобных явлений с регрессией случайных величин, характеризующих эти явления. Действительно, пусть наблюдаются два явления, характеризуемые двумя системами (векторами) случайных параметров (величин) $(X_1, X_2, ..., X_i, ..., X_n)$ и $(Y_1, Y_2, ..., Y_j, ..., Y_n)$ одинаковой размерности n. Нормированная корреляционная матрица имеет вид [8]

$$\left\| r_{ij} \right\| = \begin{Vmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & \dots & r_{nn} \end{Vmatrix}, \qquad (1)$$

где r_{ij} – коэффициент корреляции между X_i и Y_j.

Тогда диагональная матрица $\left\| r_{ij} \right\|$ с элементами $r_{ij} = 0$, если $i \neq j$, содержит коэффициенты корреляции, наилучшего приближения линейной регрессии x на y с коэффициентами регрессии $\beta_{ij} = r_{ij} \dfrac{\sigma_x}{\sigma_y}$, где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения случайных величин x и y соответственно[10].

Рассмотрим основные положения теории подобия.

Первая теорема подобия формулируется следующим образом [3]: у подобных явлений критерии подобия численно одинаковы (необходимые условия подобия).

Подобные явления характеризуются рядом определенных свойств.

1. Величины, определяющие явления во всех точках системы, в которых протекают процессы данного явления, относятся в сходственных точках к одноименным величинам из группы подобных явлений, как постоянные числа. Каждой величине отвечает свое число, различное для каждой пары явлений. При этом необходимо иметь в виду, что изучаемые явления протекают и в геометрически подобных системах.

2. Величины, характеризующие рассматриваемое явление, независимы друг от друга, а между ними существуют определенные связи. Если эти

связи могут быть выражены в виде математических зависимостей, то последние для подобных явлений буквенно одинаковы.

Суть второй теоремы подобия (π – теоремы) заключается в переносе данных единичного опыта на все явления, подобные ему, при помощи критериальных уравнений. То есть, функциональная зависимость между характеризующими процесс величинами может быть представлена в виде зависимости между составленными из них критериями подобия.

Третья теорема подобия устанавливает признаки, по которым можно узнать, подобны ли два явления друг другу. Теорема исходит из того, что известны уравнения, которые связывают между собой величины первого явления, и эти уравнения связи отвечают также условиям существования неограниченного числа подобных первому явлению, т.е. возможно существование группы подобных явлений.

Кроме того, известны следующие дополнительные положения к основным теоремам подобия [3].

1. Сложные системы подобны, если подобны соответствующие им подсистемы и равны критерии подобия, составленные из величин, не входящих в какую-либо из подсистем.

2. Условия подобия, справедливые для систем с постоянными параметрами, можно распространить и на системы с переменными параметрами при условии совпадения относительных характеристик переменных параметров.

3. Условия подобия, справедливые для изотропных (однородных) систем, могут быть распространены на анизотропные (неоднородные) системы, если анизотропия в сравниваемых системах относительно одинакова.

Рассмотрим условия подобия явлений:

1. Геометрическое подобие систем и буквенная одинаковость уравнений связи (необходимое условие).

2. Подобие условий однозначности явления, выделяющего его из группы других (необходимое условие). Если эти условия такие же, как и у первого явления, только численные значения величин, входящих в них, у второго явления другие, то эти величины называют моновалентами. Соответственно, условия однозначности называют условиями моновалентности явления. Выбор констант подобия в подобных системах не произволен, ибо существуют обуславливающие равенства, требующие, чтобы индикаторы подобия, полученные из уравнений связи, равнялись единице.

3. Необходимым условием подобия является равенство единице индикаторов подобия, составленных из констант величин, входящих в условие однозначности. Этому требованию отвечает равенство критериев, которые носят название определяющих, ибо их инвариантность входит в условия, определяющие подобие явлений.

Таким образом, третья теорема подобия состоит в том, что подобны те

явления, которые происходят в геометрически подобных системах, подчиняются одним и тем же уравнениям связи, у которых моноваленты находятся в численно постоянном отношении и составленные из них критерии равны.

Следовательно, явления подобны, если их выраженные в относительных единицах моноваленты и моновалентные критерии одинаковы.

Представленные принципы подобия в стохастическом смысле основаны на том, что параметры, входящие в критерии подобия, являются случайными величинами, а сами критерии подобия – функциями этих случайных величин [3]. Тогда ***подобие стохастически определенных физических систем должно основываться на равенстве функций распределения параметров (величин), характеризующих эти системы.***

Решение задачи оценки стохастического подобия двух систем, характеризующихся случайными параметрами, проводится путем проверки статистической гипотезы о равенстве функций распределений этих параметров. Для этого необходимо знать закон распределения выбранного критерия.

Таким образом, в стохастической постановке условием подобия является равенство функций распределения случайных величин (параметров). Если сравнивать два инвестиционных проекта, для которых получены оценки функций распределения их параметров, то условие приближенного стохастического подобия, согласно первой теоремы подобия, можно записать в виде близости выборочных критериев подобия по вероятности [4]. В соответствии с третьей теоремой подобия достаточным условием подобия двух инвестиционных проектов является равенство любых двух соответствующих критериев подобия этих проектов, составленных из их основных параметров и начальных (граничных) условий. Определяющие критерии составляются из независимых между собой величин, которые входят в условия однозначности (геометрические соотношения, физические параметры, краевые условия, начальные и граничные).

Рассмотрим типичную для практики принятия инвестиционных решений постановку задачи сравнения рентабельности (ROI) двух инвестиционных проектов. Для определенности положим, что при прочих равных условиях данные проектов различаются объемами инвестиций и размерами доходов (прибыли). Исходя из условий, положим эти величины случайными.

Выбрав в качестве обобщенных показателей инвестиционных проектов вероятность $P_1\{x_1 \le X_1, x_2 \le X_2, ..., x_n \le X_n\}$ инвестирования и вероятность получения соответствующего дохода $P_2\{y_1 \le Y_1, y_2 \le Y_2, ..., y_n \le Y_n\}$, можно сформулировать критерий сто-

хастического подобия исследуемых инвестиционных проектов в виде отношения

$$Q = \frac{F_1(x_1, x_2, ..., x_n)}{F_2(y_1, y_2, ..., y_n)}, \quad (2)$$

где $F_1(\cdot)$ и $F_2(\cdot)$ – функции распределения параметров (характеристик) $x_1, x_2, ..., x_n$ и $y_1, y_2, ..., y_n$ первого и второго инвестиционных проектов соответственно численностью n .

Отметим связи критерия (2) с существующими понятиями:

1. Выражение (2) представляет собой равномерно наиболее мощный критерий отношения правдоподобия [9].

2. При $Q = 1$ выражение (2) вырождается в тождество, которое в теории вероятностей используется как вероятностное интегральное преобразование случайных величин из разных генеральных совокупностей.

3. При $F_2(\cdot) = 1$ выражение (2) вырождается в стохастический супериндикатор [5], который используется для идентификации законов распределения выборок преимущественно малого объема.

Очевидно, что величина Q в выражении (2) является случайной. Тогда, введя в рассмотрение функцию распределения этого отношения (критерия стохастического подобия), можно оценить критерий, используя понятие уровня значимости α , используемого для проверки статистических гипотез.

Согласно лемме [9] случайная величина $z = F(x)$, где $F(x)$ – функция распределения, равномерно распределена в интервале [0;1].

Тогда распределение случайной величины Q является результатом следующей теоремы.

Теорема. Отношение меньшей из двух независимых случайных величин, равномерно распределенных в интервале [0;1], к большей есть случайная величина, равномерно распределенная в интервале [0;1].

Доказательство 1. Пусть даны две независимые случайные величины z_1 и z_2 , равномерно распределенные в интервале [0;1]. Плотность их совместного распределения после упорядочения ($z_1 \le z_2$) выглядит следующим образом [6]

$$f(z_1, z_2) = 2!\, f_{z_1}(z_1)\, f_{z_2}(z_2) = 2, \quad (3)$$

где $f_{z_1}(z_1)=1$ и $f_{z_2}(z_2)=1$ – плотности распределения независимых случайных величин z_1 и z_2.

Плотность распределения случайной величины $y=\dfrac{z_1}{z_2}$ имеет вид [7]

$$g(y)=-\int_{-\infty}^{0} z_1 f(z_1,yz_1)dz_1+\int_{0}^{\infty} z_1 f(z_1,yz_1)dz.$$

Подставив в это выражение плотность совместного распределения (3), и, отбросив первый интеграл, поскольку $z_1\in[0;1]$, получим

$$g(y)=\int_{0}^{1} z_1 f(z_1,yz_1)dz_1=\int_{0}^{1} 2z_1 dz_1=2\cdot\frac{z^2}{2}\Bigg|_{0}^{1}=1. \qquad (4)$$

Выражение (4) соответствует плотности равномерного распределения отношения y. Теорема доказана.

Для подтверждения сказанного на рис. 1 приведена типичная гистограмма распределения случайной величины q, построенная по результатам вычислительного эксперимента.

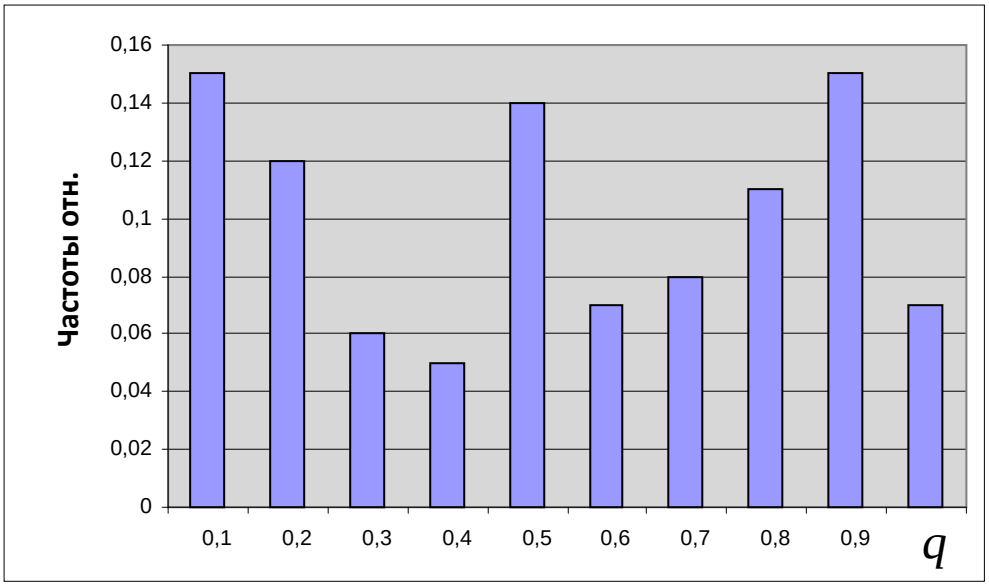


Рис. 1. Гистограмма распределения случайной величины по результатам вычислительного эксперимента

Эмпирическая функция распределения для нее изображена на рис. 2.

Можно показать, что статистика критерия Колмогорова для проверки гипотезы о равномерном распределении случайной величины q равна

$$\lambda = D\sqrt{n} = |\max(\Delta)|\sqrt{n} = 0{,}07\sqrt{100} = 0{,}7.$$

Вероятность $P(\lambda) = 0{,}711$, что значительно больше уровня $\alpha = 0{,}1$. Поэтому оснований отвергнуть гипотезу о равномерном распределении случайной величины q в интервале [0;1] не имеется [8].

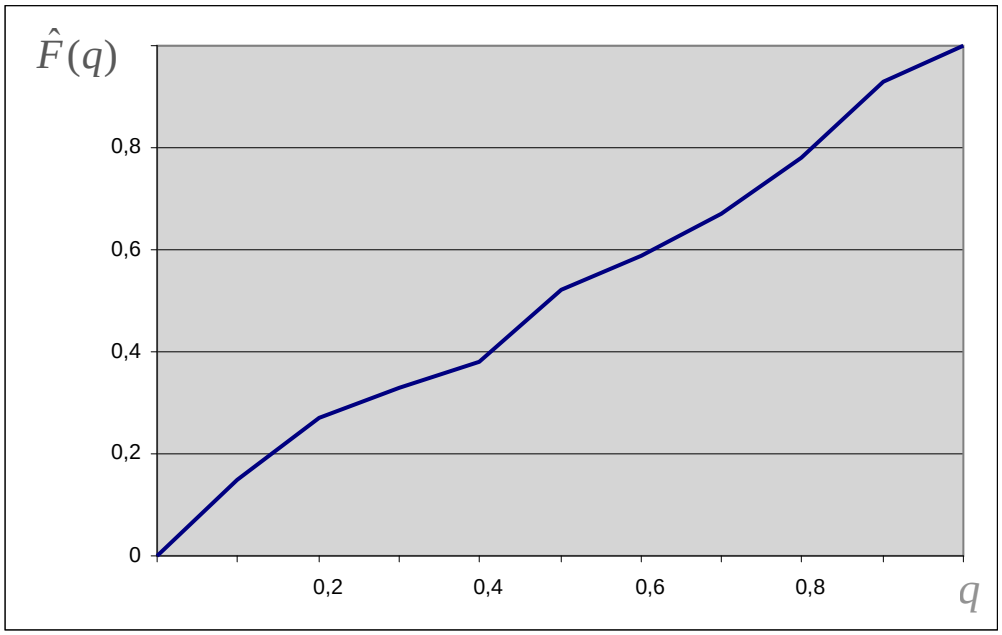


Рис. 2. Эмпирическая функция распределения случайной величины по результатам вычислительного эксперимента

Для сравнения на рис. 3 приведена гистограмма эмпирического распределения простого отношения двух независимых равномерно распределенных в интервале [0;1] случайных величин.

Как видно из рис. 3, данное распределение ничего общего с равномерным не имеет. Кроме того, у него достаточно длинный «хвост», что затруднило бы принятие решений из-за слабой различимости пороговых значений критерия на «хвосте».

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента (имитационного моделирования) свидетельствуют о справедливости выражения (4) для описания плотности распределения критерия (2).

Теперь для проверки гипотезы о стохастическом подобии двух ИП, характеризуемых двумя выборками наблюдений их параметров, достаточно сравнить расчетное значение критерия (2) с теоретическим, проинтегрировав плотность (4) по области, ограниченной уровнем значимости α. Очевидно, что для равномерного закона это не представляет никаких затруднений.

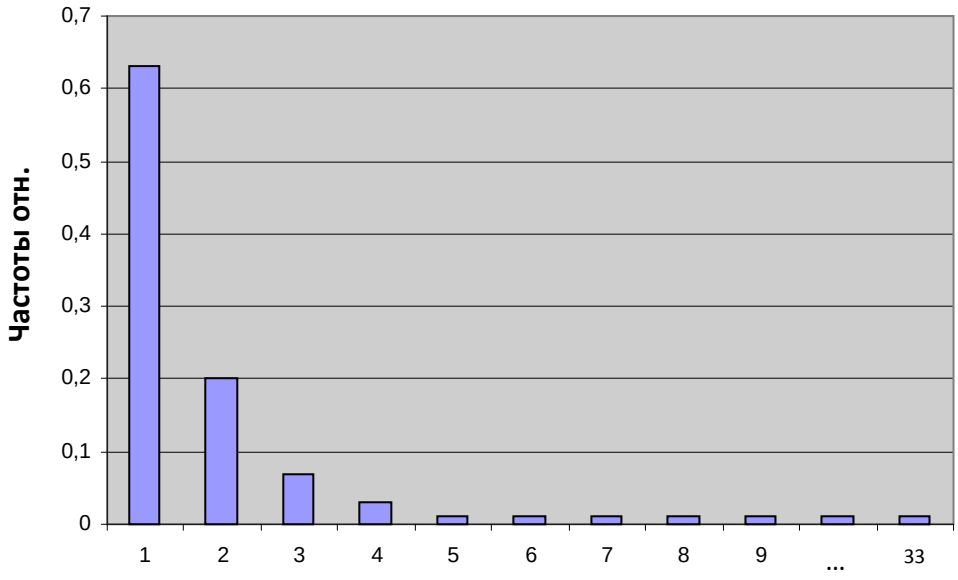


Рис. 3. Гистограмма эмпирического распределения простого отношения двух независимых равномерно распределенных в интервале [0;1] случайных величин.

Обобщая сказанное, необходимо отметить, что теория стохастического подобия является некоторым обобщением теории вероятностей и математической статистики на теорию подобия. Она занимает промежуточное положение между полной неопределенностью и теорией вероятностей с математической статистикой (которые оперируют законами распределения и их параметрами) и позволяет делать вывод о подобии стохастических объектов в определенных условиях. Ее использование дает возможность проведения определенных манипуляций со стохастически подобными объектами. Дальнейшее развитие теории стохастического подобия позволит продвинуться в исследовании непредельных распределений, которые мало описаны в классической теории вероятностей и математической статистике. Особенно той их части, которая даст возможность манипулировать выборками малого объема и цензурированными выборками, извлекая из них максимум информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирпичев М.В. Теория подобия. М.: АН СССР, 1953. – 213 с.
2. Чхаидзе. Н. Методы подобия и математического моделирования в исследовании сложных систем. Тбилиси: Издательский дом «Технический университет», 2009. – 193с.
3. Надежность и эффективность в технике: Справочник: Т. 4.: Методы подобия в надежности/Под общ. ред. В.А.Мельникова, Н.А.Северцева. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

4. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
5. Мартыщенко Л.А., Воловик А.В., Клавдиев А.А. и др. Методы нормирования надежности сложных систем оружия. - Л.: МО, 1992.- 330с.
6. Джонсон Н, Ф. Лион. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 560 с.
9. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 523 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
11. Лукашевич Н.С., Гаранин Д.А. Оценка инвестиционной привлекательности проектов на основе обобщенного показателя и снижения уровня субъективности // 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. 441-449.
12. Гаранин Д.А., Лукашевич Н.С. Оценка инвестиционной привлекательности проектов с использованием обобщенного показателя и снижением уровня субъективности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics.- 2013. -Т. 2. № 163. -С. 103-108.

D.A. Garanin[1], A.A. Klavdiev[2]

STOCHASTIC SIMILARITY OF THE INNOVATIVE PROJECTS IN INVESTMENT PLANNING

[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia
[2]National Mineral Resources University

Abstract

Evaluating the effectiveness of investment projects involves an assessment of both absolute and relative effectiveness. The last one is basis on comparison with the similar project. This raises the problem of informed choice of investment projects using modern mathematical technique which allows reducing the subjectivity, improving the validity of solutions, while meeting the principles of

adequacy, accuracy and reliability. The authors suggest the approach to comparison of innovative projects based on similarity theory.

Key words: innovations, innovative activities, costs of innovation.

REFERENCES

[1] Kirpichev M.V. Teoriia podobiia. M.: AN SSSR, 1953. – 213 p. (rus)
[2] Chhaidze. N. Metody` podobiia i matematicheskogo modelirova-niia v issledovanii slozhny`kh sistem. Tbilisi: Izdatel`skii` dom «Tekhnicheskii` universitet», 2009. – 193 p. (rus).
[3] Nadezhnost` i e`ffektivnost` v tekhnike: Spravochnik: T. 4.: Metody` podobiia v nadezhnosti/Pod obshch. red. V.A.Mel`nikova, N.A.Severtceva. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 280 p. (rus)
[4] Gukhman A.A. Vvedenie v teoriiu podobiia. M.: Vy`sshaia shkola, 1973. – 296 p. (rus).
[5] Marty`shchenko L.A., Volovik A.V., Clavdiev A.A. i dr. Metody` normirovaniia nadezhnosti slozhny`kh sistem oruzhiia. - L.: MO, 1992.- 330 p.
[6] Johnson N, F. Leeon. Statistika i planirovanie e`ksperimenta v tekhnike i nauke. Metody` obrabotki danny`kh. – M.: Mir, 1980. – 610 p. (rus).
[7] Venttcel` E.S., Ovcharov L.A. Pricladny`e zadachi teorii veroiatnostei`. – M.: Radio i sviaz`, 1983. – 416 p. (rus).
[8] Venttcel` E.S. Teoriia veroiatnostei`. – M.: Gosudarstvennoe izdatel`stvo fiziko-matematicheskoi` literatury`, 1962. – 560 p. (rus).
[9] Gnedenko B.V., Beliaev Iu.K., Solov`ev A.D. Matematicheskie metody` v teorii nadezhnosti. – M.: Nauka, 1965. – 523 p. (rus).
[10] Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlia nauchny`kh rabotneykov i inzhenerov. – M.: Nauka, 1984. – 832 p. (rus).
[11] Lukashevich N.S., Garanin D.A. Ocenka investitcionnoi` privlekatel`nosti proektov na osnove obobshchennogo pokazatelia i snizheniia urovnia sub``ektivnosti // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obra-zovanie: materialy` 3-i` Mezhdunarodnoi` nauchno-prakticheskoi` konfe-rentcii. Pod. red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova.–SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. p. 441-449 (rus).
[12] Garanin D.A., Lukashevich N.S. Ocenka investitcionnoi` privlekatel`nosti proektov s ispol`zovaniem obobshchennogo pokazatelia i snizheniem urovnia sub``ektivnosti // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. E`konomicheskie nauki = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. 2013. T. 2. № 163. p. 103-108 (rus).

УДК 334.764.44

С.Ю. Грибов

ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ХОЛДИНГЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ Т. СААТИ

Сергей Юрьевич Грибов, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел.: (921) 425-6476, e-mail: s_gribov@inbox.ru

Аннотация

В статье рассмотрен пример нахождения метода расчета синергетического эффекта в инновационном промышленном холдинге с использованием метода анализа иерархий Т. Саати. Применение данного метода позволяет лицу, принимающему решение, выбрать наилучшее решение поставленной задачи с учетом его предпочтений. Пример иллюстрирует процедуру принятия решения в холдинге с учетом трудно оцениваемых в числовом выражении факторов таких, как навыки и умения персонала, возраст, оперативность разработки и внедрения инноваций в производство.

Ключевые слова: синергетический эффект, инновации, производство, холдинг, рейтинг, критерий.

В условиях глобализации современные организации являются успешными только в случае, если осуществляют значительные инвестиции в инновации. Это позволяет достаточно быстро вывести на рынок новый продукт, получить конкурентное преимущество. Многие инновационные промышленные и научно-исследовательские организации имеют сложную холдинговую структуру. Холдинги концентрируют значительные экономические, организационные, технологические, интеллектуальные ресурсы, научно-производственный потенциал. Крупнейшие индустриальные державы ежегодно тратят на инновации около 1000 долларов в расчете на душу населения.

Для эффективного управления, руководству холдинга необходимо понимание принципов достижения и сохранения эффекта синергии, поэтому определение методов оценки синергетического эффекта важно при принятии решений о финансировании инновационных разработок и

оценке инновационных проектов.

Под синергетическим эффектом понимается согласованное, взаимно усиливающееся действие двух и более подсистем, в результате объединения которых объединенная система производит больший эффект, нежели простая сумма входящих подсистем [4, 6].

Для принятия управленческих решений помимо сравнительной оценки затрат требуется учитывать ряд критериев, трудно или вообще не поддающихся количественной оценке. Например, когда требуется оценить влияние объема инноваций по отраслям промышленности на экономику, здравоохранение и в итоге на общее благосостояние страны. Аналогично, на выбор метода расчета синергетического эффекта в инновационном промышленном холдинге могут, например, повлиять возраст и наличие у персонала необходимых навыков. Так, например, решения о создании рабочей группы для разработки инновационного продукта или о недружественном поглощении одной компании другой могут не привести к получению ожидаемого синергетического эффекта из-за переоцененных возможностей персонала или существенной разницы в корпоративных культурах или менеджменте двух компаний [1].

Руководство холдинга при проведении расчетов синергетического эффекта того или иного подразделения холдинга, в зависимости от сложившейся в холдинге ситуации, оказывается перед выбором, что выгоднее для организации:

- передать услугу на аутсорсинг;
- создать в холдинге подразделение – аналог имеющегося на рынке;
- создать подразделения в каждой дочерней организации холдинга;
- ликвидировать подразделения в каждой дочерней организации и создать единое централизованное подразделение и др. [12].

Для достижения этих целей в холдинге предлагается использовать метод анализа иерархий Т. Саати как методологическую основу при решении задач выбора альтернатив посредством их многокритериального рейтингования. Основная область применения метода — поддержка принятия решений посредством иерархической композиции задачи и рейтингования альтернативных решений [8].

В качестве примера выберем инновационный промышленный холдинг, состоящий из материнской компании и нескольких дочерних организаций.

Предположим, рассматриваются следующие альтернативы проведения инновационных разработок в холдинге:

- централизованно в материнской компании;
- в каждой дочерней организации;
- приобретение на рынке;
- организовать подразделение в холдинге (в случае, если услуга была передана на аутсорсинг).

Цель: выбрать метод расчета синергетического эффекта в холдинге среди множества альтернатив с учетом заданных критериев.

Для достижения цели составляем шкалу предпочтений (табл.1).

Таблица 1

Шкала предпочтений

Степень предпочтения	Оценка в баллах
очень сильное	10
сильное	8
среднее	5,5
умеренное	3
отсутствие предпочтения (равное значение)	1

Вторым этапом построим иерархию, упорядочивающую критерии и определяющую общие выгоды для рассматриваемых методов.

Рис.1. Иерархия критериев

Третьим этапом определяем наиболее значимые критерии выбора. Для этого обычно прибегают к оценкам экспертной комиссии, которая, ориентируясь на опыт, интуицию и знания, определяет важность критерия

для предприятия в виде матрицы попарных сравнений (табл. 2). При сопоставлении используется 10-балльная шкала предпочтений.

Таблица 2

Матрица попарных сравнений критериев

Критерий	Наличие необходимых навыков	Быстрота внедрения в производство	Экономия затрат	Возраст персонала
Наличие необхо-димых навыков	1	3	10	8
Быстрота внедрения в производство	1/3	1	6	3
Экономия затрат	1/10	1/6	1	1
Возраст персонала	1/8	1/3	1	1
Сумма	1,56	4,50	18,00	13,00

Четвертым этапом производим расчет весовых коэффициентов (табл. 3) и определяем наибольшее собственное значение λ_{max} и значения индекса согласованности и отношение согласованности по формулам:

$$R = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} W_{ij}} \times \left(\sum_{i=1}^{n} \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} W_{ij}}\right)^{-1},$$

где i - индекс строки матрицы попарных сравнений; j - индекс столбца матрицы попарных сравнений; W_{ij} - экспертные оценки.

$$\lambda_i = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{1j} & w_{1n} \\ w_{i1} & w_{ij} & w_{in} \\ w_{n1} & w_{nj} & w_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_1 \\ R_i \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_i \\ \lambda_n \end{pmatrix},$$

$$\lambda_{max} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{R_i}\right)/n,$$

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1},$$

где λ_{max} - наибольшее собственное значение обратно симметричной матрицы М; n - количество столбцов и строк матрицы.

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СС}},$$

где *ИС* - индекс согласованности экспертных оценок; *СС* - случайная согласованность экспертных оценок матрицы размерностью *n*.

В общем случае под согласованностью подразумевается то, что при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них [8]. Согласованность обратно симметричной матрицы считается приемлемой при значениях $\lambda_{max} \geq n, \text{ОС} \leq 0{,}10$.

Таблица 3

Весовые коэффициенты

Критерий	Весовой коэффициент
Наличие необходимых навыков	0,62
Быстрота внедрения в производство	0,25
Экономия затрат	0,06
Возраст персонала	0,07
Итого	1,00

$$\lambda_{max} = 4{,}06, \text{ИС} = 0{,}02, \text{ОС} = 0{,}02.$$

Пятым этапом производим сравнение объектов по критериям и определение весовых коэффициентов аналогично 4 этапу (табл. 4-7).

Таблица 4

Сравнение объектов по наличию необходимых навыков

Наличие необходимых навыков	Централизация	Создание подразделения-аналога	Аутсорсинг	Децентрализация	Весовой коэффициент
Централизация	1	5	3	9	0,58
Создание подразделения- аналога	1/5	1	2	6	0,21
Аутсорсинг	1/3	½	1	5	0,16
Децентрализация	1/9	1/6	1/5	1	0,04

$$\lambda_{max} = 4{,}22, \text{ИС} = 0{,}07, \text{ОС} = 0{,}08.$$

Таблица 5

Сравнение объектов по скорости внедрения в производство

Скорость внедрения в производство	Централизация	Создание подразделения-аналога	Аутсорсинг	Децентрализация	Весовой коэффициент
Централизация	1	4	4	10	0,60
Создание подразделения-аналога	1/4	1	2	3	0,19
Аутсорсинг	1/4	1/2	1	7	0,16
Децентрализация	1/10	1/3	1/7	1	0,04

$$\lambda_{max} = 4{,}25, \text{ИС} = 0{,}08, \text{ОС} = 0{,}09.$$

Таблица 6

Сравнение объектов по экономии затрат

Экономия затрат	Централизация	Создание подразделения-аналога	Аутсорсинг	Децентрализация	Весовой коэффициент
Централизация	1	9	6	6	0,68
Создание подразделения- аналога	1/9	1	1	4	0,13
Аутсорсинг	1/6	1	1	2	0,12
Децентрализация	1/6	1/4	1/2	1	0,06

$$\lambda_{max} = 4{,}28, \text{ИС} = 0{,}09, \text{ОС} = 0{,}10.$$

Таблица 7

Сравнение объектов по возрасту персоналу

Возраст персонала	Централизация	Созд. подразделения-аналога	Аутсорсинг	Децентрализация	Весовой коэффициент
Централизация	1	1	1	1	0,25
Создание подразделения-аналога	1	1	1	1	0,25
Аутсорсинг	1	1	1	1	0,25
Децентрализация	1	1	1	1	0,25

$$\lambda_{max} = 4{,}00, \text{ИС} = 0, \text{ОС} = 0.$$

На шестом этапе определяем окончательное решение. Для этого рассчитываем рейтинг каждого объекта, который представляет собой сумму весовых коэффициентов, соотнесенных с весовым коэффициентом соответствующего критерия (табл. 8). Результат сводим в табл. 9.

В результате расчетов можно сделать вывод, что, учитывая предпочтения лица, принимающего решения, для него очевиден выбор альтернативы с максимальным значением итогового коэффициента, то есть «централизация».

Таблица 8

Сводные результаты моделирования

Объект / критерий	Наличие необходимых навыков	Быстрота внедрения в производство	Экономия затрат	Возраст персонала
Централизация	0,58	0,60	0,68	0,25
Создание подразделения-аналога	0,21	0,19	0,13	0,25
Аутсорсинг	0,16	0,16	0,12	0,25
Децентрализация	0,04	0,04	0,06	0,25
Весовой коэффициент критериев	0,62	0,25	0,06	0,07

Таблица 9

Расчет приоритетов

Объект/ критерий	Наличие необхо-димых навыков	Быстрота внедрения в производство	Экономия затрат	Возраст персонала	Итоговый коэффи-циент	**Прио-ритет**
Центра-лизация	0,36	0,15	0,04	0,02	0,57	**1**
Создание подразде-ления-аналога	0,13	0,05	0,01	0,02	0,21	**2**
Аутсорсинг	0,10	0,04	0,01	0,02	0,17	**3**
Децентра-лизация	0,03	0,01	0,00	0,02	0,06	**4**
Сумма	1,00				1,00	**-**

Приведенный пример показал, что в ситуации, когда трудоемких математических расчетов оказывается не достаточно для окончательного принятия решения, применение метода анализа иерархий позволяет учесть факторы, которые трудно или вовсе не поддаются числовой оценке. Метод Т. Саати в такой ситуации становится незаменимым как способ поддержки принятия решений посредством иерархической композиции задачи и рейтингования альтернативных решений. Ценность метода заключается в его возможном применении при огромном количестве уровней иерархии и

множестве используемых критериев, что актуально при анализе сложных структур управления инновационных промышленных холдингов.

Изучение форм проявления, методов расчета синергетического эффекта в управлении чрезвычайно важно при построении современной гибкой, конкурентоспособной, инвестиционно-привлекательной холдинговой структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адизес, И. Управление жизненным циклом корпорации: пер. с англ. под науч. ред. А.Г. Сеферяна. – СПб.: Питер, 2007. – 384 с.
2. Веснин В.Р. Корпоративное управление: Учебное пособие. – М: МГИУ, 2008. – 150 с.
3. Грант Р.М. Современный стратегический анализ: пер. с англ. под ред. В.Н. Фунтова. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 560 с.
4. Каплан, Р.С., Нортон, Д. Стратегическое единство: создание синергии организации с помощью сбалансированной системы показателей: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 384 с.
5. Кемпбелл, Э., Саммерс Лачс, К. Стратегический синергизм, 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 416 с.
6. Логинова Н.А., Экономическая синергетика: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2012. –128 с.
7. Пригожин А.И. Дезорганизация: Причины, виды, преодоление. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 402 с.
8. Саати Т. Принятие решений. Методы анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
9. Черезов А.В., Рубинштейн, Т.Б. Корпорации. Корпоративное управление. – М.: Экономика, 2006. – 478 с.
10. Корпоративный менеджмент: Учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Менеджмент орг.» / [И.И. Мазур и др.]; под общ. ред. И.И. Мазура и В.Д. Шапиро. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Омега-Л, 2008. – 781 с.
11. Дуболазов В.А. Организация и деятельность предпринимательских структур: Учеб. пособие / Дуболазов В.А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 275 с.
12. Грибов С.Ю. Особенности расчета синергетического эффекта в холдинге [Электронный ресурс] // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 3-ей международной научно-практической конференции. 2013. URL: http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/419_425.pdf

S.Y. Gribov

THE SELECTION OF THE METHOD OF CALCULATION IN THE HOLDING USING T. SAATI'S HIERARCHY ANALYSIS TECHNIQUE

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper considers the example of finding the optimum method of calculation in the holding using T. Saati's hierarchy analysis technique. The application of the method provides the opportunity to researcher who makes decisions to choose the optimal solution of the problem in consideration of his preferences. The example demonstrates the decision-making procedure in the holding taking into account the factors which are difficult to estimate in numeric expression such as stuff' s skills and abilities, efficiency of realization and introduction of R & d.

Keywords: synergy, innovation, production, holding, rating, criteria.

REFERENCES

[1] Adizes I. Upravlenie zhiznennym ciklom korporacii: transl. from eng. under sci. edition A.G. Seferjana. – SPb.: Piter, 2007. – 384 p. (rus).
[2] Vesnin V.R. Korporativnoe upravlenie: Uchebnoe posobie. – M: MGIU, 2008. – 150 p. (rus).
[3] Grant R.M. Sovremenny`i` strategicheskii` analiz: per. s angl. pod red. V.N. Funtova. – 5-e izd. – SPb.: Peter, 2008. – 560 p. (rus).
[4] Kaplan R.S., Norton, D. Strategicheskoe edinstvo: sozdanie sinergii organizacii s pomoshh'ju sbalansirovannoj sistemy pokazatelej: transl. from eng. – M.: Vil'jams, 2006. – 384 p. (rus).
[5] Loginova N.A., Jekonomicheskaja sinergetika: Textbook. - M.: INFRA-M, 2012. –128 p. (rus).
[6] Prigozhin A.I. Dezorganizatciia: Prichiny`, vidy`, preodolenie. – M.: Al`pina Biznes Buks, 2007. – 402 p. (rus).
[7] Saati T. Prinjatie reshenij. Metody analiza ierarhij. – M.: Radio i svjaz', 1993. – 278 p. (rus).
[8] Cherezov A.V., Rubinshtei`n, T.B. Korporatcii. Korporativnoe upravlenie. – M.: E`konomika, 2006. – 478 p. (rus).
[9] Korporativny`i` menedzhment: Ucheb. posobie dlia studentov, obuchaiushchikhsia po spetcial`nosti «Menedzhment org.» / [I.I. Mazur i dr.]; pod obshch. red. I.I. Mazura i V.D. Shapiro. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Omega-L, 2008. – 781 p. (rus).

[10] Dubolazov V.A. Organizatciia i deiatel`nost` predprinimatel`skikh struktur: Ucheb. posobie / Dubolazov V.A. – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. – 275 p. (rus).
[11] S.Y. Gribov. Osobennosti rascheta sinergeticheskogo jeffekta v holdinge [On-line resourse] // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. Materials of 3-rd International scientific and practical conference. 2013. URL: http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/419_425.pdf

УДК 378.14

В. А. Дуболазов[1], Н.В.Неелова[2]

О ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ИННОВАЦИОННОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

[1]Виктор Андреевич Дуболазов, д.э.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)535-8108, E-mail: dubolazov-va@mail.ru.

[2]Наталья Владимировна Неелова, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-7482, E-mail: neelova@kafedrapik.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы развития инновационного предпринимательства в России, организации вузовской подготовки специалистов в этой области, опыт кафедры предпринимательства и коммерции ИЭИ СПбГПУ. Авторы считают наиболее перспективным обучение инновационному предпринимательству по магистерским программам бакалавров технических направлений.

Ключевые слова: инновационное предпринимательство, инноватика, образовательные программы, магистратура, бакалавриат.

В настоящее время экономика России находится в состоянии стагнации, а во многих отраслях – рецессии. Предкризисное состояние проявлялось давно, с тех пор как цены на нефть и газ перестали повышаться. Особенно тревожное положение в промышленности, в том числе в машиностроении. Ключевой проблемой является низкий спрос на инновации в российской экономике, перекос в сторону импорта готовой продукции из-за рубежа в ущерб внедрению собственных разработок. Импортируются не технологии производства, а станки, медицинская техника, компьютеры, бытовая техника, информационные системы и т.п. В итоге Россия все больше впадает в зависимость от других стран (промышленную, продовольственную, информационную и т. д.). Примером может служить сегодняшняя ситуация с блокировкой платежных систем «Visa», «MasterCard».

Вариант ориентированного на импорт технологического развития приведет к дальнейшему ослаблению отечественной инновационной системы, в том числе к снижению бюджетных расходов на науку, образование, инновации и инвестиции.

В будущем, что уже очевидно, источником экономического роста будут изобретения, основанные на научных открытиях, новые продукты, технологии, услуги и т.п., модернизация существующих производств. Для этого необходимо активизировать, выдвинуть на одно из первых мест инновационную деятельность [1].

Остановимся на понятии инновационной деятельности, данной в п. 2 ст. 6 Федерального закона от 26.06.2006 №135-ФЗ «О защите конкуренции»: Инновационная деятельность – деятельность, приводящая к созданию нового невзаимозаменяемого товара при снижении расходов на его производство и (или) улучшении его качества [6].

Важной составляющей инновационного развития является коммерциализация результатов инновационной деятельности на основе развития предпринимательской активности, конкуренции без излишнего вмешательства государства, коррупции, чиновничьего беспредела [10].

Поэтому вполне закономерно появилось понятие инновационное предпринимательство – процесс создания и коммерческого использования технологических нововведений в области товаров и услуг, создания новых рынков, удовлетворения новых потребностей. Инновационное предпринимательство – новаторский процесс создания чего-то нового, готовность предпринимателя взять на себя риск создания нового инновационного продукта или улучшения существующего и возникающую при этом финансовую и социальную ответственность [4].

Перед Россией стоит задача выйти на передовые задачи в области инновационной деятельности, инновационного предпринимательства на международной арене, что требует иметь передовую науку, образование [2, 3] . От этого в первую очередь будет зависеть уровень благосостояния населения и геополитическая роль страны.

В настоящее время в России остается низкой восприимчивость бизнес-структур к технологическим инновациям. В 2009г. разработку и внедрение технологических инноваций в РФ осуществляли 9.4% общего количества промышленных предприятий, в Германии – 71,8%, Бельгии – 53,6%, Эстонии – 52,8%, Финляндии – 52,5%, Швеции – 49,6%. Доля затрат на технологические инновации в общем объеме затрат на производство отгруженных товаров, выполнение работ и оказание услуг на предприятиях промышленного производства в РФ составили 1,9%, в Швеции – 5,4%, в Финляндии – 3,9%, в Германии – 3,4%. С 2005 по 2009г. доля средств российских предпринимательских структур на исследования и разработки уменьшилась с 30 до 26,6% при увеличении доли средств госу-

дарства с 61,9% до 66,5%. Экспорт высокотехнологичной продукции гражданского назначения в общем объеме экспорта в 2008г. составил: России – 0,25%, Китая – 16,3%, США – 13,5%, Германии – 7,6% [9, 10].

Низкая эффективность инновационной системы в России приводит к увеличению оттока из страны конкурентоспособных кадров, технологий, идей и капитала.

Из вышеприведенного видно, сколь большая задача стоит перед разными секторами государства, в том числе перед высшим образованием. Для прорыва в инновационной деятельности требуются талантливые честолюбивые с современными знаниями молодые специалисты, причем потребность в них будет значительно больше, чем раньше [11].

Не вдаваясь в глобальные проблемы совершенствования организации, финансирования и управления наукой и образованием в стране, остановимся на некоторых проблемах подготовки специалистов по инновационному предпринимательству в вузах, в частности, в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» [5].

1. Необходимо развивать инженерное образование, повышая его престижность, подчеркивая важность, укрепляя материальную базу, улучшая финансирование и т.д. В первую очередь в ведущих технических вузах, имеющих многолетние традиции, сохранивших высококвалифицированных ученых-преподавателей. Вузы в свою очередь должны работать в тесном контакте с работодателями, чтобы выпускники технических специальностей могли себе найти хорошо оплачиваемую и перспективную работу, а не идти в менеджеры по продажам, составляя конкуренцию выпускникам менеджерских специальностей и дисквалифицируясь в своей области.

В стране нужно создать систему эффективных материальных и моральных стимулов для притока наиболее квалифицированных специалистов, активных предпринимателей, творческой молодежи в сектора экономики, определяющие инновационное развитие, а также в обеспечивающие это развитие образование и науку [10].

2. Сейчас, в первую очередь за рубежом, многие вузовские образовательные программы технической и научно-исследовательской направленности включают модули обучения инновационному предпринимательству (технологическому предпринимательству, научному предпринимательству и т.п.) с изучением базовых аспектов предпринимательства (управление продуктом, управление проектами, исследование и выход на рынок, бизнес-планирование). Это очень важно для выявления entrepreneurial-minded студентов и предоставления им дополнительной возможности для развития – создания своего бизнеса. Это смелое, даже дерзкое предложение в условиях, когда при переходе на подготовку бакалавров в программах инженерных и исследовательских специальностей оставили в полном объеме многие гуманитарные, естественные, экономические и другие «непро-

фильные» дисциплины, в результате чего мало времени осталось на дисциплины специальностей. Но дисциплины по предпринимательству могут быть альтернативными другим, по выбору, факультативными. Время и качество обучения по ним покажут, насколько эти дисциплины будут востребованы студентами и приживутся.

В вузах надо стимулировать междисциплинарные исследования, разработки по полному циклу инновационного продукта (в курсовых и дипломных проектах, научно-исследовательской работе студентов).

3. На наш взгляд, наиболее перспективно обучение инновационному предпринимательству в магистратуре. Выпускник бакалавриата по техническому направлению, проработав два года и более (как, например, в Стокгольмском королевском технологическом институте) и проявив интерес и способности в области управления и бизнеса, поступает в магистратуру на программу «Инновационное предпринимательство», «Производственный менеджмент» и т.п. Очевидно, что квалификация и возможности карьерного роста таких выпускников просто несравнимы с другими.

В странах, в том числе в России, где в магистратуру можно поступать сразу после окончания бакалавриата, успешно будут работать магистерские программы «Инновационное предпринимательство», особенно для специалистов технических направлений, которые имеют или планируют иметь свой бизнес, а, главное, имеют инженерную (научную) идею для организации бизнеса.

Фокусирование инженерных образовательных программ на развитии и стимулировании бизнес-навыков и навыков предпринимательства, в том числе путем введения в учебные планы дисциплины по инновационному предпринимательству, будет содействовать появлению большого количества перспективных стартапов и развитию малого инновационного предпринимательства.

4. Интересен в этом плане опыт кафедры предпринимательства и коммерции СПбГПУ в организации магистерской программы «Технологическое предпринимательство», по которой учатся выпускники бакалавриата и специалитета технических и исследовательских институтов (факультетов) параллельно с обучением по магистерским программам своих основных направлений. В магистратуру по технологическому предпринимательству, в первую очередь, принимаются лица, имеющие предпринимательскую, инженерную, научную идею. Базой для обучения технологическому предпринимательству будет Российско-Германский центр для инноваций и предпринимательства «Политех Strascheg», создаваемый в СПбГПУ совместно с Центром предпринимательства Strascheg Университета прикладных наук г. Мюнхен, Германия. В программе заложена подготовка проектов студентов к грантам «Фонда содействия развитию малых

форм предприятий в научно-технической сфере» по программе УМНИК и подготовка к подаче заявки по программе СТАРТ.

Одна из проблем параллельного обучения по двум магистерским программам – нехватка времени для аудиторных занятий и трудоемкость освоения двух программ. Решается она частичным перезачетом одинаковых дисциплин или переведением одной из программ на заочную форму с элементами дистанционного обучения.

5. Большую роль в развитии инновационного предпринимательства призвана играть система непрерывного образования. В России в возрастной группе от 25 до 64 лет участие населения в перспективном образовании в 2008г. составило 24,8%, в Великобритании – 37,6%, Германии – 41,9%, в Финляндии – 77,3% [10], то есть перспективы видны.

Формы послевузовского образования разнообразны и, в общем-то, достаточны. Это второе высшее образование, различные краткосрочные формы повышения квалификации от 500 до 40 часов, семинары, конференции. Неразвитость в России этих форм, и даже наметившийся спад в востребованности второго высшего образования требует самостоятельного исследования и здесь не обсуждаются. Кафедра предпринимательства и коммерции СПбГПУ имеет двадцатилетний опыт организации второго высшего образования по специальностям «Бухгалтерский учет, анализ и аудит», «Маркетинг», 240-часового и 40-часового повышения квалификации бухгалтеров и аудиторов по программам Института профессионального бухгалтеров и аудиторов России (ИПБ России), двухлетний опыт организации второго высшего образования по программе «Технологического предпринимательства» и другие. Во многих вузах закрылся или сократился прием на второе высшее образование и краткосрочные программы повышения квалификации. В этой области успешно работают только авторитетные вузы, предлагающие актуальные программы, обеспечивающие высокий уровень занятий с привлечением практикующих специалистов, с необходимой требовательностью при аттестации слушателей. В условиях жесткой конкуренции на рынке труда людям необходимы знания по востребованным, хорошо оплачиваемым специальностям, в том числе в области экономики, менеджмента, финансов, предпринимательства. Мода на наличие двух-трех и более дипломов, часто полученных без особого труда, лишь заплатив деньги, постепенно, к счастью, проходит.

6. Важную роль в инновационном развитии страны и подготовке специалистов в этой области, в том числе по инновационному предпринимательству, имеют международные образовательные программы, международная мобильность бакалавров и магистров с включенным обучением в течение семестра в зарубежном вузе, получение двух дипломов отечественного и зарубежного вузов по согласованным учебным программам, обмен аспирантами, стажировки преподавателей, проведение летних школ с

участием зарубежных студентов и т.д. Все эти формы имеют место на кафедре предпринимательства и коммерции, в основном, по предпринимательству, показали высокую результативность. Они получают все более широкое распространение, хорошо проработаны в организационном и даже финансовом плане, поэтому здесь обсуждаться не будут.

Актуален и полезен опыт обучения на кафедре магистров из разных стран по международной магистерской программе «International Business Development» на английском языке. Программа быстро получила признание, по ней учатся магистры из Германии, Англии, Франции, США, Мексики, Китая, Узбекистана и других стран в основном дальнего зарубежья. К проведению занятий привлекаются зарубежные профессора, практические работники из бизнеса. Широко обсуждаются и выполняются проекты, проводятся деловые игры и рассматриваются кейсы из реальной деятельности. Важно, что российские магистры изменили отношение и повысили интерес к учебе [5].

В стране, в том числе в СПбГПУ, необходимо создание и развитие новых вузовских программ обучения в партнерстве с наиболее успешными мировыми вузами и (или) крупнейшими инновационными компаниями.

7. Отдельно остановимся на учебной программе подготовки бакалавров по направлению 222000 «Инноватика». Областью профессиональной деятельности бакалавров по этому направлению в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) является инновационное развитие страны, регионов, территорий, отраслей и предприятий народного хозяйства, в том числе процессы инновационных преобразований, инфраструктура инновационной деятельности, информационное и технологическое обеспечение инновационной деятельности, нормативно-правовое и финансовое обеспечение инновационной деятельности, инновационное предпринимательство [7].

Бакалавры по инноватике готовятся к следующим видам деятельности: производственно-техническая, организационно-управленческая, экспериментально-исследовательская, проектно-конструкторская. Бакалавр по инновационному предпринимательству – дополнительно в области создания и ведения предпринимательской деятельности в области нововведений (технического, научного предпринимательства).

Изучив основную требования ФГОС и около тридцати учебных программ вузов подготовки бакалавров по направлению инноватика, по разным ее профессиям, разработав свою учебную программу по профилю «Инновационное предпринимательство» мы сформулировали следующие предложения.

7.1. В профессиональном цикле программы примерно поровну должны быть конструкторско-технологичесие дисциплины по важнейшим отраслям промышленности (в первую очередь в соответствии с основной от-

раслевой направленностью вуза) и по организационно-экономическим и предпринимательским дисциплинам, в том числе по управлению продуктом, управлению проектом, маркетингу, исследованию рынков и потребителей, в том числе мировых, бизнес-планированию, организации и деятельности предпринимательских структур, стартапам, управлению качеством, правовым вопросам интеллектуальной собственности и т.д. В связи с этим необходима актуализация образовательных стандартов, разработка новых ФГОС по инноватике.

7.2. Подготовка бакалавров и магистров по инноватике и инновационному предпринимательству может быть успешно организована в первую очередь в ведущих технических (политехнических) вузах, имеющих соответствующую материальную базу и профессиональные преподавательские кадры по технико-технологическим и исследовательским дисциплинам, на инженерно-экономических факультетах, имеющих инфраструктуру, традиции и квалифицированные преподавательские кадры в области подготовки бакалавров и магистров по производственному менеджменту, промышленному маркетингу, управлению качеством, предпринимательству и т.п.

7.3. В вузах, готовивших бакалавров и магистров по инновационному предпринимательству, должна быть соответствующая инфраструктура: технопарк и (или) бизнес-инкубатор, центр студенческого предпринимательства и т.п., способствующие доведению до предпринимательского продукта и выводу на рынок преподавательских и студенческих разработок.

7.4. С переходом от подготовки специалистов к подготовке бакалавров учебный план бакалавров по менеджменту и экономике был сокращен (с 5 до 4 лет), к сожалению, в основном, за счет специальных дисциплин. Многие дисциплины могут быть без особого ущерба исключены из учебного плана, в том числе по инновационному предпринимательству, так как в течение многих лет они изучались в школе (история, русский язык) или могут быть кратко рассмотрены как разделы других дисциплин (документоведение, экономика природопользования, корпоративная ответственность, информационная безопасность, психология и др.). Проблема не только в том, что они дают мало знаний по профилю подготовки, повторяют пройденное, занимают часы, которые могли бы быть отданы под специальные дисциплины, а главное в том, что в этих курсах, часто преподаваемых «случайными» людьми – не учеными в соответствующей области, мало учат студентов работе, творчеству.

7.5. Большая проблема учебных планов подготовки бакалавров – практика на предприятиях. Разве можно говорить серьезно о двухнедельных практиках под разными названиями после первого, второго и третьего курсов, когда у студентов еще проходит дополнительная сессия, требуется

время на оформление пропусков на предприятия. Нет никакой производственной практики перед выпускной бакалаврской работой. Наверное, надо сделать одну длительную производственную практику и найти время перед выпускной работой. С магистрами проще, они, как правило, работают, и занятия у них проводятся (отличное решение) вечером и по субботам, используются интерактивные и дистанционные технологии обучения.

8. Все большую тревогу вызывает качество подготовки выпускников вузов, особенно очно-заочной, заочной и дистанционной форм обучения. По данным некоммерческого партнерства «Руссофт» [8] в 2012г. менее 10% российских компаний оценили работу системы образования в РФ хорошо, а остальные или не удовлетворены ее работой, или имеют к ней серьезные замечания [8]. Надеемся, это в меньшей степени относится к нашей кафедре, но проблема огромнейшая. Наверное, стоит сослаться на слабую подготовку в школах, но вузы усугубляют ее. Принимают на коммерческой основе заведомо слабых абитуриентов, любым способом «удерживают» в вузе – ведь они платят, а денег в вузе мало. Плагиат в рефератах, курсовых проектах и работах и даже в дипломных проектах, списывание на экзаменах и зачетах, которые проходят часто в виде тестирования, завышение оценок, феминизация преподавательского состава, снижение числа ученых – докторов и кандидатов наук, «старение» преподавателей и т.п. приводит к тому, что вузы выпускают посредственных специалистов.

В вузах низкая оплата преподавателей, крошечные стипендии, нехватка общежитий и т.п. Ситуация в общем-то известна, но без ее решения, без должного финансирования и совершенствования системы образования трудно надеяться, что высшая школа сможет в ближайшее время оказать существенное положительное влияние на инновационное развитие страны. Предстоит большая работа по корректировке образовательных программ, внедрению новых технологий обучения в целях формирования навыков, необходимых для инновационной экономики.

9. Не касаясь глобальных проблем создания предпринимательской инфраструктуры в стране, в том числе для инновационного предпринимательства, остановимся на одной проблеме в этой области. В 90-е годы прошлого века в начале перестройки на кафедру по большому конкурсу поступили выпускники знаменитых петербургских школ 239, 470, 30. Учились они блестяще, глаза горели. Многие дисциплины читались им на английском языке. Большинство из них, начиная со 2-3 курса, работали, кормили родителей. Все они сделали блестящую карьеру, работают топ-менеджерами в крупных фирмах, банках, имеют собственный бизнес, уехали за границу, где также не затерялись. При встрече на вопрос, почему сейчас не такие студенты, ответ один – не тот менталитет, нет мотивации.

Долгое время занимаясь преподаванием предпринимательства, имея собственный бизнес, мы можем с уверенностью сказать, что в настоящее время созданы сносные условия для открытия и ведения своего дела, наша налоговая система не самая страшная, постепенно создается и совершенствуется предпринимательская инфраструктура. Но все равно большинство выпускников вузов идут на госслужбу, наемными работниками.

Ключевые для инновационного предпринимательства личные качества: мобильность, желание обучаться в течение всей жизни, склонность к предпринимательству и принятию риска, у нашего населения в целом недостаточно развиты по сравнению со странами с высокой инновационной активностью.

Семья, система непрерывного образования должна развивать в детях и молодежи жажду успеха, лидерство, успешность, способность к риску и принятию ответственности на себя.

В Санкт-Петербурге много профильных технических вузов с хорошими традициями, научными школами, интересных и исследовательских умов. Люди более трудолюбивы и ответственны. Сохранилось некоторая преемственность, поэтому Санкт-Петербург и СПбГПУ должны стать центрами инновационного (технического, научного) предпринимательства.

При выступлении на конференции будут представлены учебные планы по инновационному предпринимательству нескольких вузов и предлагаемые авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белицкая А.В. Инновации и инновационная деятельность: проблемы определения и правового закрепления // Предпринимательское право.- 2011.- №3.- С.4-9
2. Борисов О.И. Благоприятный налоговый климат для инновационной деятельности как антикризисная мера в России и зарубежных странах // Налоги. -2011.- N 3. -С. 37 - 44.
3. Друева А.А. Государственное стимулирование инновационной деятельности в Российской Федерации // Безопасность бизнеса.- 2012.- №3.- С.4-6
4. Дуболазов В.А. Организация и деятельность предпринимательских структур: учебное пособие.— Санкт-Петербург, 2013. — [Электронный ресурс]. URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3590.pdf (дата обращения: 30.12.2013)
5. Дуболазов В.А., Щеголев В.В. Обучение предпринимательству в вузе //Бизнес-образование.- 2012.- №1.- С.44 -47
6. О защите конкуренции: федеральной закон РФ от 26.06.2006 №135-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

7. Об утверждении и введении в действие федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 222000 – инноватика (квалификация (степень) бакалавр): приказ Министерства образования и науки РФ от 25.01.2011 №97. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Об утверждении стратегии развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014-2020 годы и на перспективу до 2015 года. Распоряжение Правительства РФ от 01.11.2013 №2036-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
9. Россия и страны мира. 2012: статистический сборник.- М.: Росстат, 2012. – 380с.
10. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 №2227-р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
11. Трифонов О., Шаранин А. Ключевое звено. Анализ проблем инновационной деятельности и подготовки кадров // Кадровик. Кадровый менеджмент (управление персоналом). -2013.- N 1. - С. 78 - 82.
12. Танцура Н.П., Блинов Л.Н., Соколов И.А. Инновационно-системный подход к преподаванию химии в технических вузах // 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. 172-178

V.A.Dubolazov, N.V.Neelova

ABOUT TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF INNOVATIVE ENTREPRENEURSHIP

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The paper discusses the development of innovative entrepreneurship in Russia, organization of university education in this area, the experience of the Entrepreneurship and Commerce department of the Institute of Industrial Economics and Management SPbSPU. Authors believe that the most promising innovative entrepreneurship training is training of bachelors in technical fields at master programs.

Key words: innovative entrepreneurship, innovations, study programs, master degree programs, bachelor degree programs

REFERENCES

[1] Belickaya A.V. Innovacii i innovacionnaya deyatel'nost': problemy opredeleniya i pravovogo zakrepleniya // Predprinimatel'skoe pravo.- 2011.- N 3.- P.4-9. (rus.)

[2] Borisov O.I. Blagopriyatnyi nalogovyi klimat dlya innovacionnoi deyatel'nosti kak antikrizisnaya mera v Rossii i zarubezhnyh stranah // Nalogi. -2011.- N 3. -P. 37 - 44. (rus.)

[3] Drueva A.A. Gosudarstvennoe stimulirovanie innovacionnoi deyatel'nosti v Rossiiskoi Federacii // Bezopasnost' biznesa.- 2012.-N3.- P.4-6. (rus.)

[4] Dubolazov V.A. Organizaciya i deyatel'nost' predprinimatel'skih struktur: uchebnoe posobie.- Sankt-Peterburg, 2013. - [Elektronnyi resurs]. URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3590.pdf (data obrasheniya: 30.12.2013). (rus.)

[5] Dubolazov V.A., Shegolev V.V. Obuchenie predprinimatel'stvu v vuze //Biznes-obrazovanie.- 2012.-N1.- P.44 -47. (rus.)

[6] O zashite konkurencii: federal'noi zakon RF ot 26.06.2006 N 135-FZ. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». (rus.)

[7] Ob utverzhdenii i vvedenii v deistvie federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo standarta vysshego professional'nogo obrazovaniya po napravleniyu podgotovki 222000 - innovatika (kvalifikaciya (stepen') bakalavr): prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 25.01.2011 N 97. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». (rus.)

[8] Ob utverzhdenii strategii razvitiya otrasli informacionnyh tehnologii v Rossiiskoi Federacii na 2014-2020 gody i na perspektivu do 2015 goda. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 01.11.2013 N 2036-r. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». (rus.)

[9] Rossiya i strany mira. 2012: statisticheskii sbornik.- M.: Rosstat, 2012. – 380p. (rus.)

[10] Strategiya innovacionnogo razvitiya Rossiiskoi Federacii na period do 2020 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 08.12.2011 N2227-r. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». (rus.)

[11] Trifonov O., Sharanin A. Klyuchevoe zveno. Analiz problem innovacionnoi deyatel'nosti i podgotovki kadrov // Kadrovik. Kadrovyi menedzhment (upravlenie personalom). -2013.- N 1. -P. 78 - 82. (rus.)

[12] Tantcura N.P., Blinov L.N., Sokolov I.A. Innovatcionno-sistemny`i` podhod k prepodavaniiu himii v tekhnicheskikh vuzakh // Sovre-mennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy` 3-i` Mezhdu-narodnoi` nauchno-prakticheskoi` konferentcii. Pod. red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova.–SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. P. 172-178 (rus.)

УДК 334.722.1

А. М. Ефимов[1], С.В. Салкуцан[2]

Поддержка малого инновационного бизнеса в машиностроительной отрасли

[1]Алексей Михайлович Ефимов, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-7482, E-mail: a.efimov@spbstu.ru

[2]Сергей Владимирович Салкуцан, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-7482, E-mail: salkutsan@spbstu.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы изменения макроэкономической ситуации в России, определяющей необходимость и способы поддержки малого инновационного бизнеса в машиностроительной отрасли, показаны направления и отличия в поддержке по федеральным округам России. Показаны и проанализированы параметры деятельности научно-технологических парков и бизнес-инкубаторов, как объектов, формирующих потенциал инновационного развития бизнеса. Результаты выявили различия в результатах поддержки инновационного бизнеса по федеральным округам, научно-технологическим паркам, вследствие чего определены направления дальнейших исследований в указанной области.

Ключевые слова: поддержка, инновации, машиностроение, научно-технический парк, технопарки

Актуальность исследования направлений и опыта поддержки инновационного бизнеса подтверждается возрастающей тенденцией снижения конкурентоспособности продукции отечественных обрабатывающих производств, в том числе и в машиностроении (рис. 1).

Следует отметить, что несмотря на отрицательную динамику изношенности и отсутствия оборудования, недостаточность спроса на продукцию предприятий как на отечественном, так и на международном рынке имеет положительную динамику. Данный факт вызван, скорее всего, низкой конкурентоспособностью выпускаемых продуктов обрабатывающих производств, что говорит об отставании используемых

технологий и/или морального и функционального устаревания используемого оборудования.

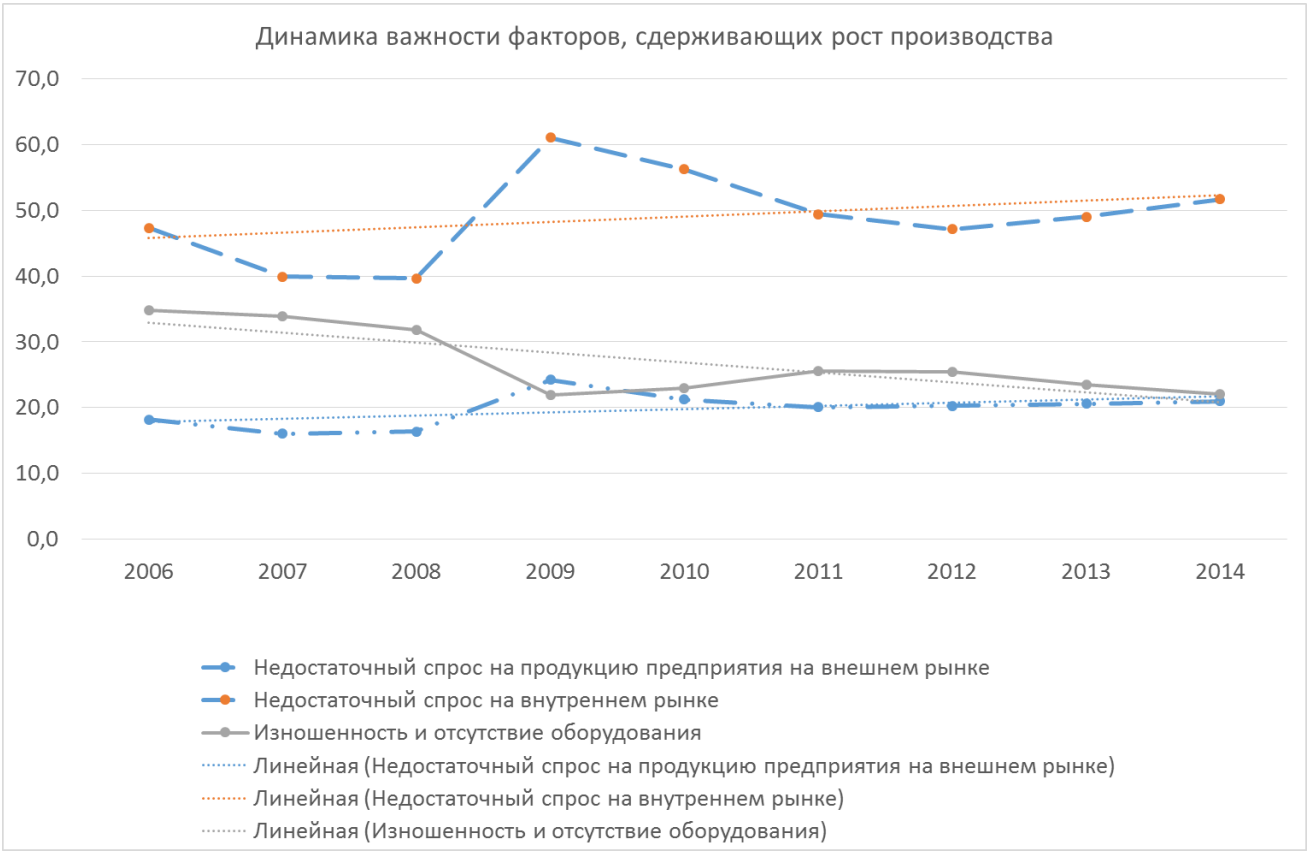


Рис.1. Динамика важности факторов, сдерживающих рост производства, %
(Удельный вес респондентов, отметивших указанный фактор, как ограничивающий деятельность организации. Федеральная служба государственной статистики)

Одновременно следует помнить, что машиностроение является одной из крупнейших отраслей обрабатывающей промышленности. Значение машиностроительного комплекса на современном этапе развития национальной экономики и обеспечения конкурентного паритета или преимущества в долгосрочной перспективе переоценить невозможно. Важнейшая задача и миссия машиностроения заключается в обеспечении итерационного развития промышленного производства через результаты наукоемкого инжиниринга, их внедрении в технологии действующих предприятий и повышения качества и функциональности результирующих продуктов. Таким образом, вопрос поддержки и развития инновационного бизнеса в машиностроительной отрасли, и особенно малого, безусловно представляет особый интерес.

В настоящее время большинство стран определили инновации как необходимый инструмент для обеспечения конкурентоспособности в

мировой экономике в долгосрочном периоде. Это приводит к постоянному росту в абсолютном и относительном выражении расходов на проведение научных исследований и разработок в различных отраслях промышленности. В России инновации также признаются как на законодательном, так и на уровне исполнительной власти, однако существующие механизмы еще далеки от идеальных, что подтверждается низким уровень расходов на создание новых и доработку существующих товаров, разработку и внедрение новой техники и технологий, низкого оборота патентов, что в результате приводит даже не к стагнации, а к падению конкурентоспособности российской обрабатывающей промышленности (рис. 2, 3).

Рис. 2. Один из показателей по целям работы Минпромторга России, характеризующие достижение поставленных целей

На рис. 3 явно наблюдается отставание инновационного развития малого машиностроительного бизнеса.

Документами, определяющими политику Российской Федерации по развитию ее промышленного потенциала, является Указ Президента РФ от 7 мая 2012 г. № 596 «О долгосрочной государственной экономической политике», государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2012 года № 2539-р а также отраслевые стратегии и программы. В соответствии с указанными политикой и программами региональными законодательствами, учитывающими возможности поддержки в отдельных субъектах и федеральных округах в целом, принимаются собственные программы поддержки развития машиностроительной отрасли, что

приводит к отличию темпов роста инновационного бизнеса в различных регионах.

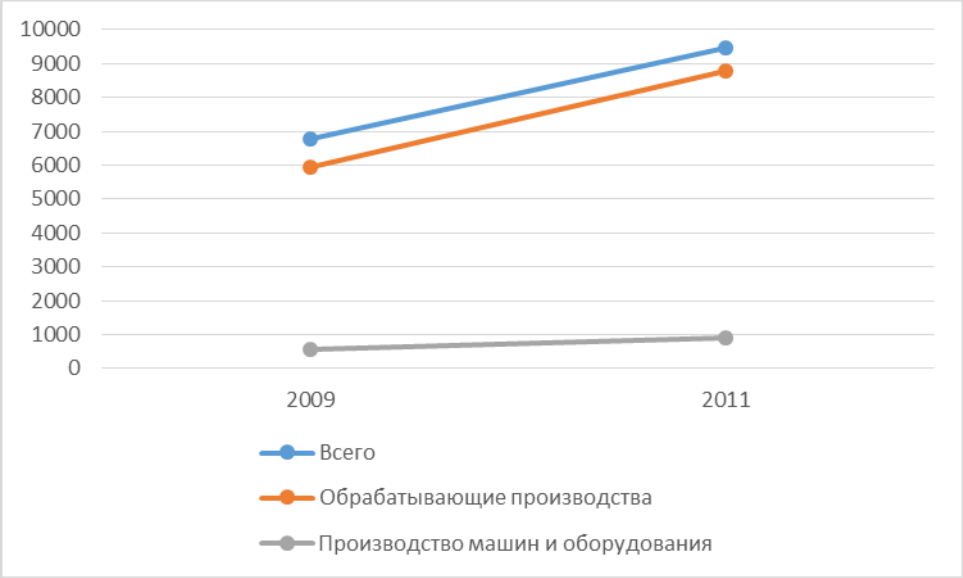


Рис. 3. Затраты на технологические инновации малых предприятий по годам, млн.руб.

Среди мер государственной поддержки следует указать несколько блоков:

1) федеральные целевые программы;

2) система субсидий процентных ставок по банковским кредитам и взносов в уставные капиталы, направленная на сохранение и развитие промышленного капитала;

3) финансирование НИОКР вне рамок федеральных целевых программ;

4) набор нормативно-правовых и фискальных инструментов, обеспечивающих устойчивое функционирование отраслей промышленности, их инновационное развитие и модернизацию, а также выравнивание условий входа на зарубежные рынки;

5) создание эффективной системы технического регулирования, совершенствование национальной системы стандартизации и обеспечения единства измерений;

6) защита внутреннего рынка от давления импорта;

7) привлечение ресурсов государственных институтов развития для реализации инвестиционных проектов.

В сфере высокотехнологичного машиностроения приняты и действуют 10 комплексных государственных программ:

1. Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности (2012–2020 гг.)

2. Развитие транспортной системы (2013–2020 гг.)

3. Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 гг.

4. Развитие судостроения на 2013–2030 гг.

5. Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.

6. Космическая деятельность России на 2013–2020 годы.

7. Развитие науки и технологий (2013–2020 гг.)

8. Экономическое развитие и инновационная экономика (2013–2020 гг.)

9. Энергоэффективность и развитие энергетики (2013–2020 гг.)

В качестве примера приведем плановые значения общей величины финансирования государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» - более 3,5 трлн руб. Из них средства федерального бюджета выделяется 234,6 млрд руб., из средств государственных внебюджетных фондов – 207,5 млрд руб., а средства юридических лиц составят 3 078 млрд руб.

Таким образом государство создает условия и практику инициирования финансирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий.

Одним из инструментов, используемым в этой области, можно назвать развитие деятельности научно-технических парков, организованных ведущими вузами России.

В современном мире существует несколько моделей построения технопарков. Большинство являются коммерческими организациями и управляются в соответствии с рыночными законами. Технопарки, создаваемые при университетах, несомненно, имеют свою особенность. Часть университетских технопарков представляют собой бизнес-центры, сдающие в аренду помещения. Наиболее привлекательной является модель распределенного технопарка. Это позволяет снять ограничение на развитие технопарка, связанное с площадью имеющихся помещений. Распределенный технопарк позволяет вовлекать гораздо большее количество участников, интегрируя научно-исследовательские центры и лаборатории университета.

К такому современному технопарку предъявляется ряд требований, например, технопарк должен обладать следующими инструментами поддержки:

- инфраструктурной;
- финансовой;
- образовательной.

Наилучшим образом университетскими технопарками решен вопрос образовательной поддержки. Обучение остается их ключевой компетенцией. Многочисленные программы дополнительного образования и курсы повышения квалификации предоставляют малым инновационным

предприятиям широкий выбор образовательных траекторий. Например, в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (кафедра предпринимательства и коммерции) реализованы краткосрочные образовательные мероприятия по предпринимательству, бизнес-планированию, управлению проектами, маркетингу и продвижению и т.д. Запущена магистерская программа «Технологическое предпринимательство», ориентированная на бакалавров технических направлений, планирующих создание своего бизнеса в научно-технической сфере. Аналогичные программы распространены в немецких и финских университетах, в нашей стране только в трех университетах существуют подобные магистерские программы. Единственным инструментом, практически не реализованным российскими университетами, остаются менторские программы. Менторские программы позволяют преодолевать «долину смерти» с минимальным финансовым риском для начинающих предприятий. Менторы представляют собой высококвалифицированных специалистов, чьи компетенции позволяют определять направления развития проекта.

Инфраструктурная поддержка для предприятий малого бизнеса заключается в предоставлении офисных и производственных помещений, центров коллективного пользования и прототипирования. В СПбГПУ примером такого центра коллективного пользования являются НТК «Машиностроительные технологии». Сочетание CAD и CAE технологий с аддитивными технологиями создает возможность быстрого прототипирования и создания за несколько дней серий функциональных деталей и узлов, на создание которых в традиционном производственном процессе может быть потрачено несколько месяцев.

Финансовая поддержка заключается в предоставлении доступа к различным источникам финансирования и оказание консультационной поддержки этого процесса. Этот элемент реализован наиболее слабо. Эндаумент фонды, как основной инструмент для венчурного финансирования со стороны университетов практически не работает в настоящее время. Размеров таких фондов хватает только на выплаты стипендий студентам. Для сравнения: эндаумент-фонд в Томском политехническом университете составляет 5 млн. руб., а фонд кембриджского университета достигает 5 млрд. фунтов стерлингов, что безусловно позволяет университету вкладывать в свои рискованные спин-офф компании. Российские университеты предпочитают пользоваться государственными системам финансового обеспечения. Основным игроком на рынке государственного финансирования НИОКР для малых предприятий является Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (с октября 2013 года Технопарк «Политехнический» СПбГПУ является официальным представителем

Фонда содействия в Санкт-Петербурге).

Проанализируем показатели работы научно-технических парков в РФ (табл.1, 2).

Таблица 1

Валовые показатели научно-технических парков (НТП) России по федеральным округам

	Ед.изм.	Федеральный округ								Итого
		СЗ	Ц	Ю	СК	П	У	С	Д	
Объем инновационной деятельности	млн.руб.	2076	11642	2111	3904	1508	553	3631	206	25631
Количество производимых образцрв наукоемкой продукции	шт.	207	889	352	34	380	72	232	48	2214
Количество инновационных проектов, представленных к освоению	шт.	159	620	126	84	180	182	350	43	1744
Число рабочих мест	шт.	823	4693	1418	415	857	821	1791	192	11010
Количество малых инновационных предприятий	шт.	142	416	170	56	257	151	263	51	1506
Количество фирм сферы услуг	шт.	20	647	24	9	59	210	47	26	1042
Площадь офисных и производственных помещений	тыс.кв.м	28,6	481,2	12,3	13,0	40,2	40,1	29,1	7,2	651,7
Объем привлеченных средств	млн.руб.	1048	3845	138	142	737	365	552	84	6909
Объем оказанных услуг	млн.руб.	327	305	109	51	53	41	86	38	1010
Количество НТП в ФО	шт.	10	31	8	4	20	9	13	5	100

Таблица 2

Средние показатели НТП России по федеральным округам

	Ед.изм.	Федеральный округ							
		СЗ	Ц	Ю	СК	П	У	С	Д
Объем инновационной деятельности	млн.руб.	207,6	1164,2	211,1	390,4	150,8	55,3	363,1	20,6
Количество производимых образцрв наукоемкой продукции	шт.	20,7	88,9	35,2	3,4	38,0	7,2	23,2	4,8
Количество инновационных проектов, представленных к освоению	шт.	15,9	62,0	12,6	8,4	18,0	18,2	35,0	4,3
Число рабочих мест	шт.	82,3	469,3	141,8	41,5	85,7	82,1	179,1	19,2
Количество малых инновационных предприятий	шт.	14,2	41,6	17,0	5,6	25,7	15,1	26,3	5,1
Количество фирм сферы услуг	шт.	2,0	64,7	2,4	0,9	5,9	21,0	4,7	2,6
Площадь офисных и производственных помещений	тыс.кв.м	2,9	48,1	1,2	1,3	4,0	4,0	2,9	0,7
Объем привлеченных средств	млн.руб.	104,8	384,5	13,8	14,2	73,7	36,5	55,2	8,4
Объем оказанных услуг	млн.руб.	32,7	30,5	10,9	5,1	5,3	4,1	8,6	3,8

Для визуализации в качестве основных валовых показателей, характеризующих деятельность НТП определим (рис. 4, 5):

- площадь офисных и производственных помещений (тыс. кв. м, ось абсцисс);

- число новых рабочих мест (шт., ось ординат);
- объем инновационной деятельности (млн. руб., площадь пузырьков).

Визуализация на рис. 4 позволяет определить качественные отличия НТП Центрального федерального округа, чьи показатели значительно превосходят аналогичные показатели НТП прочих округов.

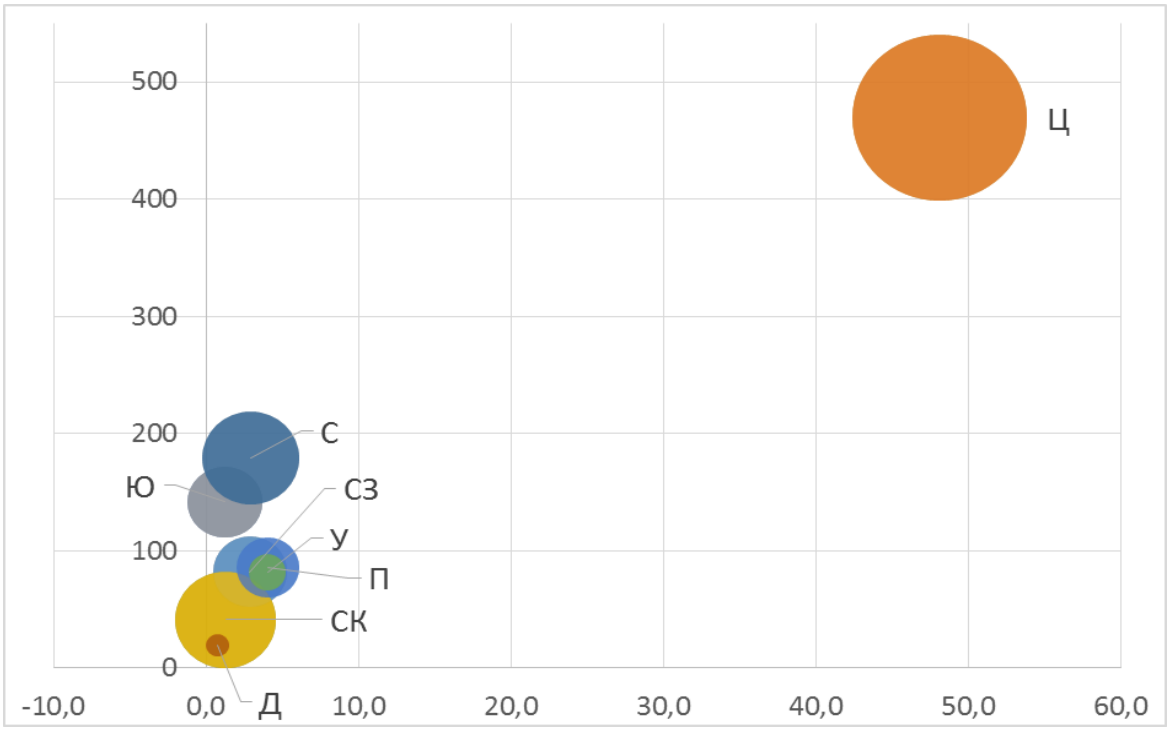


Рис. 4. Средние показатели деятельности НТП по федеральным округам

Но даже если убрать из рассмотрения этот регион, мы увидим существенные различия в регионах (рис. 5). Указанные отличия позволяют предположить, что, во-первых, условия инновационной деятельности существенно отличаются по округам, во-вторых, налицо отсутствие распространения лучших практик организации инновационного климата вокруг университетов.

Проведенный анализ продемонстрировал неравномерность развития участников инновационной деятельности в России. При этом университеты начинают занимать все более существенное место в этой схеме. Решением многих проблем, связанных с неравномерностью развития инновационной структуры и несоответствия темпов развития науки и промышленности могут стать кластеры. При этом кластеры должны создаваться вокруг университетов.

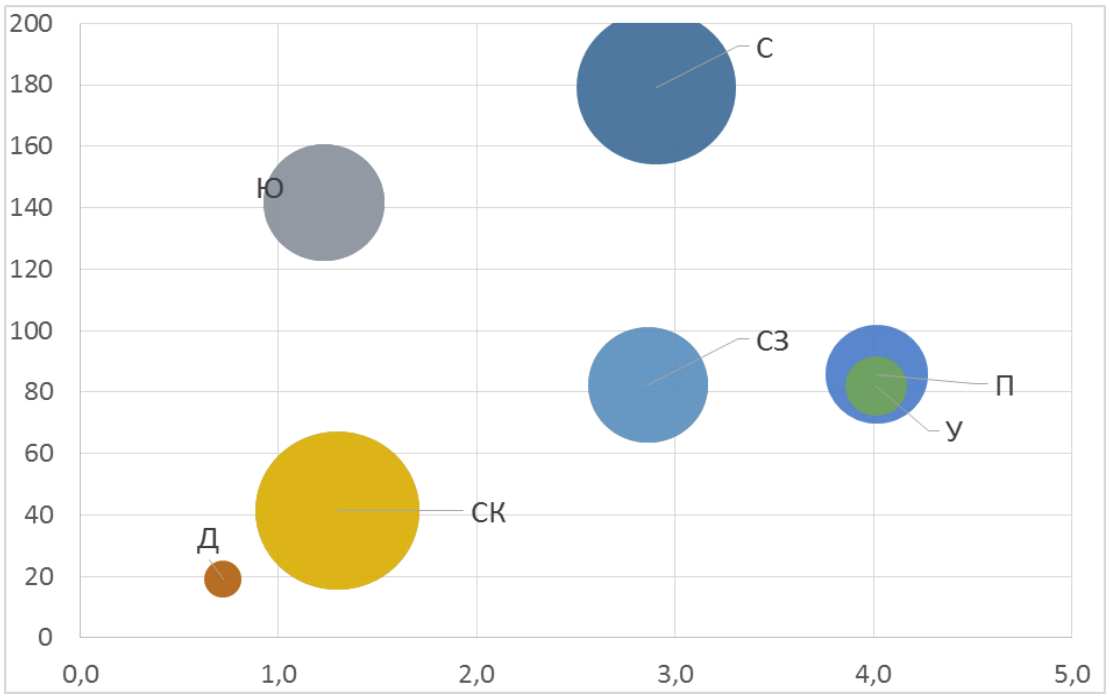


Рис. 5. Средние показатели деятельности НТП по федеральным округам без Центрального федерального округа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.12.2012 года № 2539-р «Об утверждении Государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» на период до 2020 года».
2. Борисов В. Н., Жигин А. Б., Абрамов М. Г. Машиностроение: инновации и конкурентоспособность //Экономист. – 2000. – № 8. – С. 40-41.
3. Государственная поддержка отечественного машиностроения [Электронный ресурс] // ЕвразияВести VIII 2013 URL: http://www.eav.ru/publ1p.php?publid=2013-08a03 (дата обращения: 10.04.2014).
4. Каталог университетских научно-технологических парков России: Выпуск 2 / Под ред. А.В. Белоцерковского. – Тверь: Тверской Инно-Центр, 2013. – 460 с.
5. Концепция формирования Государственной комплексной программы развития машиностроения России [Электронный ресурс] // Концепция формирования Государственной комплексной программы развития машиностроения России URL: http://www.soyuzmash.ru/informcenter/concept/concept.htm (дата обращения: 10.04.2014).

6. Молодоженова В. Н., Остапенко Т. П. Инновационное развитие машиностроительной отрасли // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2003. – № 9. – С. 49-52.
7. Наука и инновации [Электронный ресурс] // Официальная статистика Федеральной службы государственной статистики URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ ru/statistics/science_and_innovations/science/# (дата обращения: 12.04.2014).
8. Общие показатели по целям работы Минпромторга России, характеризующие достижение поставленных целей [Электронный ресурс] // Официальный сайт Минпромторга России URL: http://www.minpromtorg.gov.ru/open_ministry/ plan/indicators/ (дата обращения: 10.04.2014).
9. Опережающие индикаторы по видам экономической деятельности [Электронный ресурс] // Официальная статистика Федеральной службы государственной статистики URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/leading_indicators/ (дата обращения: 12.04.2014).
10. Перспективы развития российского машиностроения [Электронный ресурс] // Федеральный портал ProTown.ru URL: http://protown.ru/information/hide/4486.html (дата обращения: 12.04.2014).
11. Сайфиева С.Н., Ермилина Д.А. Российское машиностроение: состояние и тенденции // Институт проблем рынка РАН Журнал «Экономист». – 2012. - № 2. - С. 32-43.
12. Салкуцан С.В. Проведение аудита маркетинга с применением чек-листов // 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. 524-529.

A.M.Efimov, S.V.Salkutsan

INNOVATIVE SMALL BUSINESS SUPPORT IN THE ENGINEERING INDUSTRY

[2]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article discusses the issues of changes in the macroeconomic situation in Russia, defining the need and ways to support small innovative business in

the engineering industry, showing ways and differences in federal districts support. Scientific and technological parks and incubators parameters, as objects forming potential of innovative business development are shown and analyzed. The results revealed differences in innovative business support by federal districts and scientific and technological parks.

Key words: support, innovation, machine building, engineering, scientific technical park

REFERENCES

[1] Resolution of the Russian Federation Government (27.12.2012 № 2539-r) «On approval of the State program of the Russian Federation « Industry development and enhancing its competitiveness» until 2020». (rus.)

[2] Borisov V. N., Ghigin A. B., Abramov M. G. Engineering: innovation and competitiveness // The economist. – 2000. – № 8. – p. 40-41. (rus.)

[3] Government support of national engineering [Electronic resource] // EvraziyaVesti VIII 2013 URL: http://www.eav.ru/publ1p.php?publid= 2013-08a03 (date of access: 10.04.2014). (rus.)

[4] Catalog of university scientific technological parks of Russia: 2nd Edition / Ed. AV Bilotserkivskyi. – Tver: Tver Inno-Center, 2013. – 460 p. (rus.)

[5] The concept of forming the State complex program of the engineering development in Russia [Electronic resource] // The concept of forming the State complex program of the engineering development in Russia URL: http://www.soyuzmash.ru/informcenter/concept/concept.htm (date of access: 10.04.2014). (rus.)

[6] Molodozhenova c. N., T. Ostapenko. P. Innovative development of engineering industry // News of Higher educational institutions. Engineering. – 2003. – № 9. – p. 49-52. (rus.)

[7] Science and Innovation [Electronic resource] // Official statistics of the Federal State Statistics Service URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ ru/statistics/science_and_innovations/science/# (date of access: 12.04.2014). (rus.)

[8] General indicators of objectives of Russian Industry and Trade Ministry, indicating achievement of objectives [Electronic resource] // Official website of Russian Industry and Trade Ministry URL: http://www.minpromtorg.gov.ru/open_ministry/ plan/indicators/ (date of access: 10.04.2014). (rus.)

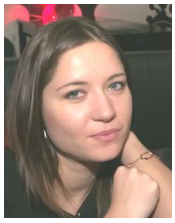
[9] Leading indicators of economic activity [Electronic resource] // Official statistics of the Federal State Statistics Service URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/leading_indicators/ (date of access: 12.04.2014). (rus.)
[10] Prospects for the Russian Engineering [Electronic resource] // Federal portal ProTown.ru URL: http://protown.ru/information/hide/4486.html (date of access: 12.04.2014). (rus.)
[11] S.N. Sayfieva, D.A. Ermilina Russian Engineering: Status and Trends / / Institute of Market Problems, Russian Academy of Sciences Magazine "The Economist". – 2012. - № 2. - p. 32-43. (rus.)

УДК 2964

Ю.Ю. Кочинев[1], О.И. Виноградова[2]

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННОСТИ ИСКАЖЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ В БУХГАЛТЕРСКОЙ ОТЧЕТНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

[1]Юрий Юрьевич Кочинев, д.э.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)905-1416, E-mail: aspekt-audit78@mail.ru.



[2]Виноградова Ольга Игоревна, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (961)802-6603, E-mail: vinogradova.o.i@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается разработка системы идентификации выявленных в бухгалтерской информации искажений как непреднамеренных или преднамеренных в условиях активного инновационного развития машиностроительных организаций. А также демонстрируется практическая применимость данной методики.

Ключевые слова: недобросовестные действия, мошенничество, аудит, выявление, идентификация, анализ

На сегодняшний день одной из актуальных проблем в экономической сфере, в частности, в аудиторской деятельности является выявление и идентификация недобросовестных действий, выявленных в ходе аудиторской проверки [9]. В части проведения аудиторских проверок машиностроительных организаций данная проблема усугубляется активным внедрением инноваций, что обусловлено высоким уровнем конкурентной борьбы в данном сегменте рынка.

Аудиторские стандарты указывают на особую значимость анализа специфических, нехарактерных операций при проведении аудита в части рассмотрения недобросовестных действий. Это обусловлено сложностью оценки реальной стоимости активов, отсутствием достаточной информационной базы для анализа экономической целесообразности операций. Схемы маскировки мошеннических действий под видом

инноваций известны с 18 века, к примеру, одним из наиболее ранних мошеннических проектов был "проект" вечного двигателя профессора Орфиреуса, который в 1715-1725 годах даже вел переговоры с Петром I о продаже своего "изобретения" за миллион иохимсталеров. В данный момент подобные схемы также активно используются. Крупные машиностроительные синдикаты после распада СССР долгое время находились в состоянии стагнации, что привело к значимому снижению уровня их конкурентной способности. С учетом значимости данных синдикатов как градообразующих предприятий государство вынуждено субсидировать значительные суммы данным предприятиям для улучшения их экономических показателей, которое невозможно без внедрения инновационных технологий.

Значительность данных сумм провоцирует недобросовестных предпринимателей к попыткам вывода активов под видом активной инновационной деятельности.

На сегодняшний день Международным стандартом аудита МСА 200 «Цель и общие принципы, регулирующие аудит финансовой отчетности» (ISA 200 «Overall Objectives of the Independent Auditor and the Conduct of an Audit in Accordance with International Standards on Auditing») установлено, что целью аудитора при проведении аудита финансовой отчетности является получение разумной уверенности в том, содержит ли финансовая отчетность в целом существенные искажения, являющиеся результатом мошенничества или ошибок, что позволит аудитору выразить мнение о том, подготовлена ли финансовая отчетность, во всех существенных отношениях, в соответствии с принятой концепцией подготовки финансовой отчетности. А согласно МСА 240 «Ответственность аудитора по рассмотрению мошенничества и ошибок в ходе аудита финансовой отчетности» (ISA 240 «The Auditor's Responsibilities Relating to Fraud in an Audit of Financial Statements»), если аудитор обнаруживает искажение бухгалтерской отчетности, он должен установить, не является ли это искажение признаком недобросовестных действий, то есть, не является ли это искажение преднамеренным.

На сегодняшний день недостаточно разработана методология аудита в части выявления фактов недобросовестного составления финансовой отчетности, не разработаны способы идентификации недобросовестности при составлении финансовой отчетности.

Подобный способ может быть предложен исходя из анализа классификации искажений по распределению их в бухгалтерской информации.

Известно, что классификация искажений по распределению в бухгалтерской информации разделяет их на случайные и систематические. Случайными являются искажения, обусловленные множеством причин,

таких, как утомление, небрежность, невнимательность, рассеянность, забывчивость, некомпетентность, несовершенство организации бухгалтерского учета, несовершенство законодательных и нормативных актов, сбои в работе компьютерной техники и т.д. Таким образом, случайные искажения являются непреднамеренными.

Систематические искажения в первую очередь обусловлены такими причинами, как незнание или неправильное понимание законодательных и нормативных актов (непреднамеренные искажения) и наличие умысла (преднамеренные искажения).

Из математической статистики известно: если случайная величина порождается множеством причин, роль каждой из которых в образовании случайной величины не является превалирующей, то случайная величина распределена по нормальному закону. Таким образом, справедливо предположение о том, что случайные искажения в бухгалтерской информации распределены по нормальному закону.

В поддержку гипотезы о нормальном распределении случайных искажений в бухгалтерской информации высказывался ряд авторов классических трудов по аудиту [1, 2, 3].

Поскольку из определения случайных искажений следует непреднамеренность причин их возникновения, то может быть предложен следующий метод идентификации их непреднамеренности: **если выявленные в бухгалтерской информации искажения распределены по нормальному закону, то они случайны и, следовательно, не являются преднамеренными.**

И наоборот, если гипотеза о нормальном распределении выявленных в бухгалтерской информации искажений отклоняется, то в числе выявленных искажений возможны преднамеренные искажения.

Очевидно, что предложенный метод идентификации непреднамеренности искажений практически реализуем при использовании статистических выборочных процедур. Напомним, что в соответствии с МСА статистической выборочной процедурой является процедура, использующая:

- случайный (либо систематический со случайным выбором начальной точки) отбор тестируемой совокупности;
- применение теории вероятности (математической статистики) для оценки результатов выборки,

Статистические процедуры применимы только при достаточно больших объемах генеральных совокупностей (тысячи, десятки тысяч элементов).

Рассмотрим применение предложенного метода идентификации непреднамеренности искажений на практическом примере.

Пример 1.

Пусть при аудиторской проверке бухгалтерской отчетности организации в ходе обработки результатов статистических выборок в бухгалтерской информации выявлены искажения:

- 20 искажений в интервале от 0 до 10 тысяч рублей;
- 10 искажений в интервале от 10 до 20 тысяч рублей;
- 6 искажений в интервале от 20 до 30 тысяч рублей;
- 3 искажения в интервале от 30 до 40 тысяч рублей;
- 1 искажение в интервале от 40 до 50 тысяч рублей (всего 40 искажений).

Среднее значение выявленных искажений:

$$\chi = \frac{20 \times 5 + 10 \times 15 + 6 \times 25 + 3 \times 35 + 45}{40} = 13{,}75 \text{ т. руб.} \qquad (1)$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(5\text{-}13{,}75)^2 \times 20 + (15\text{-}13{,}75)^2 \times 10 + (25\text{-}13{,}75)^2 \times 6 + (35\text{-}13{,}75)^2 \times 3 + (45\text{-}13{,}75)^2}{40}} = 10{,}77 \text{ т. руб.}$$

(2)

Тогда наблюдаемые и определенные известным образом теоретические частоты, а также наблюдаемые значения критерия хи-квадрат составляют (табл.1):

Таблица 1

Наблюдаемые и теоретические частоты, наблюдаемое значение критерия хи-квадрат

№п/п	$\eta_{наб}$	$\eta_{теор}$	$\frac{(\eta_{наб} - \eta_{теор})^2}{\eta_{теор}}$
1	**20**	**15,5**	**2,1**
2	**10**	**14,2**	**1,2**
3	**6**	**8,6**	**0,8**
4	**3**	**2,4**	**0,2**
5	**1**	**0,3**	**1,6**
Итого	**40**	**40**	**5,9**

Тогда среднее значение выявленных искажений составит K = 13750 руб., среднеквадратичное отклонение выявленных искажений σ = 10770 руб. Известным образом вычислив теоретические частоты

полученного распределения, получаем наблюдаемое значение критерия согласия $X = 5{,}9$.

Сравнивая полученное значения критерия Пирсона с критическим (при числе степеней свободы k = 2 и уровне значимости 0,05 критическое значение равно 6,0), приходим к выводу о справедливости гипотезы о нормальном распределении размера выявленных искажений. На основании полученного результата делаем вывод о случайности и, следовательно, непреднамеренности выявленных искажений.

В другом случае выявлены искажения:

- 20 искажений в интервале от 0 до 10 тысяч рублей;
- 10 искажений в интервале от 10 до 20 тысяч рублей;
- 6 искажений в интервале от 20 до 30 тысяч рублей;
- 3 искажения в интервале от 30 до 40 тысяч рублей;
- 1 искажение в интервале от 70 до 80 тысяч рублей (всего 40 искажений).

Среднее значение выявленных искажений:

$$\chi = \frac{20 \times 5 + 10 \times 15 + 6 \times 25 + 3 \times 35 + 75}{40} = 14{,}5 \text{ т. руб.} \quad (3)$$

Среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(5-14{,}5)^2 \times 20 + (15-14{,}5)^2 \times 10 + (25-14{,}5)^2 \times 6 + (35-14{,}5)^2 \times 3 + (75-14{,}5)^2}{40}} = 9{,}75 \text{ т. руб.} \quad (4)$$

В этом случае наблюдаемые и определенные известным образом теоретические частоты, а также наблюдаемые значения критерия хи-квадрат составляет следующие значения (табл. 2).

Таблица 2

Наблюдаемые и теоретические частоты, наблюдаемое значение критерия хи-квадрат

№п/п	$\eta_{наб}$	$\eta_{теор}$	$\frac{(\eta_{наб} - \eta_{теор})^2}{\eta_{теор}}$
1	**20**	**13,1**	**3,6**
2	**10**	**15,4**	**1,9**
3	**6**	**9,2**	**1,1**
4	**3**	**2,0**	**0,4**
5	**0**	**0,2**	**0.2**
6	**0**	**0**	**0**
7	**0**	**0**	**0**
8	**1**	**0,1**	**8,1**
Итого	**40**	**40**	**15,3**

огда среднее значение выявленных искажений составит K = 14500 руб., среднеквадратичное отклонение выявленных искажений σ = 9 750 руб. Известным образом вычислив теоретические частоты полученного распределения, получаем наблюдаемое значение критерия согласия X = 15,3.

Сравнивая полученное значение критерия Пирсона с критическим (критическое значение равно 11,1), приходим к выводу, что гипотезу о нормальном распределении размера выявленных искажений следует отклонить.

Отбросив наибольшее искажение (искажение в интервале 70 – 80 тысяч рублей), повторяем проверку гипотезы о нормальном распределении оставшихся искажений. Если гипотеза о нормальном распределении подтверждается, то на основании этого делаем вывод, что выявленное искажение в интервале 70 – 80 тысяч рублей отлично от случайного, вследствие чего может быть преднамеренным.

Рассмотренный в примере метод идентификации непреднамеренности искажений, основанный на применении критерия согласия Пирсона, применим при достаточном количестве значений случайной величины (не менее 40 – 50) и достаточном количестве вариантов в интервалах.

В ином случае проверка гипотезы о нормальном распределении выявленных искажений может быть осуществлена с помощью правила трех сигм, которое формулируется следующим образом: если абсолютная величина отклонения случайной величины от ее математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратичного отклонения, то случайная величина распределена по нормальному закону.

Рассмотрим применение подобного метода идентификации непреднамеренности искажений на практическом примере.

Пример 2.

Пусть при аудиторской проверке бухгалтерской отчетности организации в ходе обработки результатов статистических выборок в бухгалтерской информации выявлены искажения:

- 5 тысяч рублей;
- 7 тысяч рублей;
- 10 тысяч рублей;
- 15 тысяч рублей;
- 20 тысяч рублей;
- 25 тысяч рублей;
- 50 тысяч рублей (всего 7 искажений).

Проверим, соответствует ли правилу трех сигм наибольшее искажение (50 тысяч рублей). Для этого отбросим его и вычислим

величины K и σ для оставшихся искажений. Они составят K = 13,7 тысяч рублей, σ = 7,1 тысяч рублей.

Отклонение наибольшего искажения от среднего значения составвссляет 36,3 тысяч рублей (50 – 13,7), и оно превосходит утроенное среднее квадратичное отклонение, которое составляет 3 * 7,1 = 21,3 тысячи рублей. Следовательно, искажение в сумме 50 тысяч рублей отлично от нормального и может быть преднамеренным.

Осуществив ту же операцию в отношении искажения в сумме 25 тысяч рублей, получаем: среднее значение оставшихся искажений K = 11,4 тысяч рублей, среднеквадратичное отклонение σ = 5,5 тысяч рублей.

Отклонение проверяемого искажения от среднего значения составляет 13,6 тысяч рублей (25 – 11,4), и оно не превосходит утроенное среднее квадратичное отклонение, которое составляет 3 * 5,5 = 16,5 тысяч рублей. Следовательно, искажение в сумме 25 тысяч рублей распределено по нормальному закону и является случайным.

Таким образом, предложенная методика идентификации выявленных искажений в бухгалтерской отчетности предоставляет аудитору определенные доказательства, которые он может использовать при вынесения суждения о том, является ли выявленное искажение результатом мошенничества или ошибки. Данное обстоятельство весьма важно при выявлении мошенничества, замаскированного под видом инновационной деятельности, при проведении аудиторских проверок машиностроительных организаций. Данная методика адаптирована как к применению при больших значениях совокупности выявленных искажений, так и к применению при небольших значениях выявленной совокупности, что расширяет сферу ее практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамс Р. Основы аудита.М.: Аудит-Юнити, 1995.-398с.
2. Аренс А., Лоббек Дж. Аудит.М.: Финансы и статистика, 1995.-560с.
3. Робертсон Д. Аудит.М.: Контакт, 1993.-496с.
4. Кочинев Ю.Ю. Аудит: теория и практика. 5 изд. СПб: Питер, 2010. – 448с.
5. Кочинев Ю.Ю. Моделирование и автоматизация аудита. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2006г. - 147с.
6. Вещунова Н.Л., Фомина Л.Ф. Бухгалтерский учет. СПб: Финансы и статистика, 2000. – 496 с.
7. Вещунова Н.Л. Бухгалтерский и налоговый учет: учебник. М: Проспект, 2008. – 843 с.

8. Бычкова С.М. Растамханова Л.Н. Риски в аудиторской деятельности. М: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
9. Бычкова С.М., Итыгилова Е.Ю. Недобросовестное составление финансовой отчетности: институциональный аспект. // Международный банковский учет, 2012. - №19.
10. Бычкова С.М., Филатова О.Н. Виды искажений в бухгалтерской отчетности //Аудиторские ведомости, 2001. - №4
11. Бычкова С.М., Итыгилова Е.Ю. Процедуры выявления искажений финансовой отчетности банков. // МСФО и МСА в кредитной организации, 2010. - №4.
12. Штарева К.А., Российское энергетическое машиностроение: состояние, проблемы, перспективы // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 846 с.

Y.Y.Kochinev, O.I.Vinogradova

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

This article discusses the development of the system of identification identified in accounting information distortion as accidental or intentional , and demonstrates the practical applicability of this methodology.

Key words: audit, identification, fraud, analysis.

REFERENCES

[1] Adams R. Fundamentals of auditing.M.: Audit Unity, 1995.-398 p.
[2] Ahrens A., Lobbek J., The audit.M.: Finance and statistics, 1995. - 560 p. (rus.)
[3] Robertson D. Audit.M.: Contact, 1993.-496 p. (rus.)
[4] Kochinev Y.Y. Audit: theory and practice. SPb.: Piter, 2010. – 448 p. (rus.)
[5] Kochinev Y.Y. Modeling and automation of audit. SPb.: SPbGPU, 2006. – 147p. (rus.)
[6] Veshchunova N.L., L. F. Fomina.. Accounting. SPb.: Finance and statistics, 2000. – 496 p. (rus.)

[7] Veshchunova N.L. Accounting and taxation: textbook. M.: Prospect, 2008. – 843 p. (rus.)
[8] Bychkova S.M., Rastamanov L.N. Risks in audit activities. M.: Finance and statistics, 2003. – 416 p. (rus.)
[9] Bychkova S.M., Itigilova E.Y. Unfair financial reporting: the institutional aspect.// International banking accounting, 2012. - №19 (rus.)
[10] Bychkova S.M., Filatova O.N. Types of distortions in the financial statements.//Audit Vedomosti, 2001. - №4 (rus.)
[11] Bychkova S.M., Itigilova E. Y. Trigger to detect misstatements of the financial statements of banks.// IFRS and ISA in the credit organization, 2010. - №4 (rus.)
[12] Shtareva K.A., Russian power engineering: the state, problems, prospects// Materials of the 2nd International scientific conference / edited M.M. Radkevich and A. N. Evgrafov. - SPb.: Publishing house Politechn. University, 2012. - 846. (rus.)

УДК 657.3

Н.В. Неелова

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ В БУХГАЛТЕРСКОЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОТЧЕТНОСТИ

Наталья Владимировна Неелова, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-7482, E-mail: neelova@kafedrapik.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы раскрытия информации об инновационной деятельности в бухгалтерской и статистической отчетности организаций. Результаты показали, что затраты на инновации в этих двух видах отчетности формируются по разным правилам. Автор предлагает использование в бухгалтерском учете счета-экрана, позволяющего получить необходимые данные для статистической отчетности.

Ключевые слова: инновации, инновационная деятельность, затраты на инновации.

В условиях обостряющейся международной конкуренции и исчерпания традиционных экстенсивных источников развития все большее внимание, в том числе со стороны государства, уделяется инновационной деятельности предприятий. Одним из примеров этого является требование более подробного раскрытия информации об инновационной деятельности в бухгалтерской и статистической отчетности организаций [2].

Согласно ст.2 федерального закона от 23.08.1996 N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» инновации - введенный в употребление новый или значительно улучшенный продукт (товар, услуга) или процесс, новый метод продаж или новый организационный метод в деловой практике, организации рабочих мест или во внешних связях.

В соответствии с документом Минфина России ПЗ-8/2011 «О формировании в бухгалтерском учете и раскрытии в бухгалтерской отчетности организации информации об инновациях и модернизации производства» [5] для формирования полного и достоверного представления о деятельности организации и повышения ее прозрачности в годовой бухгалтерской отчетности должна раскрываться следующая существенная информация об инновациях и модернизации производства: о затратах, связанных с выпол-

нением научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, с приобретением (созданием) нематериальных активов (новых технологий, прав на патенты, лицензий на использование изобретений, промышленных образцов, полезных моделей и др.); о затратах на модернизацию и реконструкцию объектов основных средств; о затратах, связанных с совершенствованием технологии и организации производства, с улучшением качества, изменением дизайна и других эксплуатационных свойств продукции, осуществляемых в ходе производственного (технологического) процесса; об источниках средств на инновации и модернизацию производства.

Данную информацию предлагается формировать на основе аналитического учета инновационных объектов на счетах вложений во внеоборотные активы (счет 08), нематериальных активов и результатов исследований и разработок (счет 04), основных средств (счет 01), денежных средств на инновации (счет 55), источников финансирования инноваций: целевого финансирования (счет 86), займов и кредитов (счета 66 и 67), нераспределенной прибыли (счет 84). В годовой бухгалтерской отчетности сформированная информация раскрывается в соответствующих разделах табличной и текстовой формы пояснений к бухгалтерскому балансу и отчету о финансовых результатах.

Более подробная и систематизированная информация в соответствии с международными рекомендациями в области статистического измерения инновационной деятельности [7] приводится в форме федерального статистического наблюдения N 4-инновация (годовая) "Сведения об инновационной деятельности организации".

Согласно п.1 «Указаний по заполнению формы федерального статистического наблюдения», приведенных в приказе Росстата от 29.08.2013 N 349 [6] (далее – Указания), форму федерального статистического наблюдения N 4-инновация (годовая) "Сведения об инновационной деятельности организации" предоставляют юридические лица, кроме субъектов малого предпринимательства, осуществляющие экономическую деятельность в сфере добычи полезных ископаемых; обрабатывающих производств; производства и распределения электроэнергии, газа и воды (за исключением торговли электроэнергией; торговли газообразным топливом, подаваемым по распределительным сетям, торговли паром и горячей водой (тепловой энергией)); связи; деятельности, связанной с использованием вычислительной техники и информационных технологий; научных исследований и разработок; предоставления прочих видов услуг.

Инновационная деятельность может быть связана с осуществлением технологических, организационных, маркетинговых и экологических инноваций (п.5 Указаний).

Технологические инновации представляют собой конечный результат

инновационной деятельности, получивший воплощение в виде нового либо усовершенствованного продукта или услуги, внедренных на рынке, нового либо усовершенствованного процесса или способа производства (передачи) услуг, используемых в практической деятельности (п.5 Указаний).

Различают два типа технологических инноваций (п.6 Указаний):

1) продуктовые инновации, включающие разработку и внедрение в производство технологически новых и значительно технологически усовершенствованных продуктов;

2) процессные инновации, включающие разработку и внедрение технологически новых или технологически значительно усовершенствованных производственных методов, включая методы передачи продуктов (производственные методы материально-технического снабжения, поставки товаров и услуг, а также во вспомогательных видах деятельности).

Маркетинговые инновации - реализация новых или значительно улучшенных маркетинговых методов, охватывающих существенные изменения в дизайне и упаковке продуктов, использование новых методов продаж и презентации продуктов (услуг), их представления и продвижения на рынки сбыта, формирование новых ценовых стратегий (п.11 Указаний).

Организационные инновации - реализация нового метода в ведении бизнеса, организации рабочих мест или организации внешних связей (п.12 Указаний).

Экологические инновации - новые или значительно усовершенствованные товары, работы, услуги, производственные процессы, организационные или маркетинговые методы, способствующие повышению экологической безопасности, улучшению или предотвращению негативного воздействия на окружающую среду (п.13 Указаний).

Форма N 4-инновация "Сведения об инновационной деятельности организации" содержит следующие разделы:

1. Общие организационно-экономические показатели организации.

2. Инновационная активность организации.

3. Объем инновационных товаров, работ, услуг за отчетный год (без НДС, акцизов и других аналогичных платежей).

4. Факторы, препятствующие инновациям.

5. Затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации по видам инновационной деятельности и источникам финансирования за отчетный год.

6. Результаты инновационной деятельности.

7. Число совместных проектов и типы партнеров по выполнению исследований и разработок в отчетном году.

8. Источники информации для формирования инновационной политики организации.

9. Патентование и другие методы защиты изобретений, научно-

технических разработок организаций.

10. Количество приобретенных и переданных организацией новых технологий (технических достижений), программных средств за отчетный год.

11. Организационные и маркетинговые инновации.

12. Экологические инновации.

Рассмотрим более подробно формирование информации для заполнения раздела 5, отражающего затраты на инновации.

В разделе 5 показываются общие (текущие и капитальные) затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации, произведенные собственными силами и сторонними организациями по заказу, на основании данных бухгалтерского учета затрат в соответствии с нормативно-правовыми актами по бухгалтерскому учету и типовыми отраслевыми методологическими рекомендациями по планированию, учету и калькулированию себестоимости товаров, работ, услуг соответствующих видов экономической деятельности (п.50 Указаний).

Наиболее подробно в отчете представлены затраты на технологические инновации. Они классифицируются:

1) по составу:

- исследование и разработка новых продуктов, услуг и методов их производства (передачи), новых производственных процессов (стр. 505) (включая зарплату, страховые взносы, материальные затраты с НДС, капитальные затраты на приобретение основных средств);

- производственное проектирование, дизайн и другие разработки (не связанные с научными исследованиями и разработками) новых товаров, работ, услуг и методов их производства (передачи), новых производственных процессов (506) (технологическое оснащение, организация производства и начальный этап выпуска новых товаров, работ, услуг);

- приобретение машин и оборудования, связанных с технологическими инновациями (путем покупки, аренды, лизинга) (507);

- приобретение новых технологий (508);

- приобретение программных средств (510);

- другие виды подготовки производства для выпуска новых товаров, внедрения новых услуг или методов их производства (передачи) (511);

- обучение и подготовка персонала, связанные с инновациями (512);

- маркетинговые исследования (513);

- прочие затраты на технологические инновации (514);

2) по типам:

- продуктовые инновации (527);

- процессные инновации (528);

3) по источникам финансирования:

- собственные средства (517) (за счет прибыли и себестоимости про-

дукции);

- средства федерального бюджета (518);
- средства бюджетов субъектов РФ и местных бюджетов (519);
- средства внебюджетных фондов (520);
- иностранные инвестиции (521);
- прочие средства (в т.ч. кредиты и средства венчурных фондов) (523).

Проанализируем, как отражаются перечисленные виды затраты в бухгалтерском учете.

Для первого вида работ (стр.505) в учете используется понятие «научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы» (НИОКТР). Как отмечено в [5], в настоящее время учет незавершенных НИОКТР не регламентируется положениями по бухгалтерскому учету (ПБУ). В этом случае согласно ПБУ 1/08 «Учетная политика организации» необходимо проанализировать ПБУ по аналогичным вопросам, а также МСФО. Минфин рекомендует для определения момента начала капитализации затрат по выполняемым НИОКТР использовать МСФО (IAS) 38 «Нематериальные активы», согласно которому все затраты на исследования признаются расходами в момент совершения, так как экономическая выгода от них неопределенна, а затраты на разработки капитализируются в стоимости актива только с даты выполнения определенных условий. Этими условиями являются: техническая осуществимость и намерение завершить создания актива; способность использовать или продать актив; оценка вероятных будущих экономических выгод; наличие достаточных ресурсов для завершения разработки и использования актива; надежная оценка затрат на разработку актива. Если на результаты завершенных разработок оформлена правовая охрана, они учитываются в дальнейшем как нематериальные активы (ПБУ 14/2007 «Учет нематериальных активов»), иначе – как результаты НИОКТР (ПБУ 17/02 «Учет расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы»).

Затраты на производственное проектирование (стр. 506) как расходы на подготовку и освоение производства новых видов продукции, не предназначенной для серийного и массового производства, списываются на издержки ее производства, в серийном и массовом производстве эти затраты могут создать результаты НИОКТР, нематериальные активы или расходов будущих периодов [10] с последующим списанием в издержки производства (например, согласно п.94 приказа Минфина РФ от 28.12.2001 N 119н «Об утверждении Методических указаний по бухгалтерскому учету материально-производственных запасов»).

Затраты на приобретение машин и оборудования (стр.507) отражаются в составе основных средств. Затраты на арендованные и взятые в лизинг с учетом на балансе лизингодателя объекты состоят из арендных платежей, включаемых в издержки производства.

Затраты на приобретение новых технологий (стр.508) и программных средств (стр.510) в зависимости от полученных на них прав будут либо нематериальными активами при получении исключительных прав, либо расходами будущих периодов при получении права пользования. Периодические платежи за пользование относятся на издержки производства.

Затраты на другие виды подготовки производства (стр.511), (например, изменение процедур контроля), на обучение и подготовку персонала (стр.512), прочие затраты на технологические инновации (стр.514) (например, консультации специалистов, услуги технологического содержания) включаются в издержки производства.

Затраты на маркетинговые исследования (стр.513) являются коммерческими расходами.

Проведенное нами исследование выявляет следующие проблемы при использовании данных бухгалтерского учета для формирования необходимой статистической информации о затратах на инновации:

1. Несмотря на ссылку на данные учета в форме N 4-инновация дается не совсем корректное с точки зрения бухгалтерского учета определение затрат: затраты на технологические инновации - выраженные в денежной форме фактические расходы, связанные с осуществлением различных видов инновационной деятельности (п.51 Указаний).

Согласно п.2 ПБУ 10/99 «Расходы организации», утвержденного приказом Минфина России от 06.05.1999 N 33н, расходами организации признается уменьшение экономических выгод в результате выбытия активов и (или) возникновения обязательств, приводящее к уменьшению капитала этой организации, за исключением уменьшения вкладов по решению участников. Таким образом, расходы учитываются только на счетах 90, 91 и 99, отражаются в отчете о финансовых результатах и не формируют стоимость никаких активов, в т.ч. капитальных. В отличии от расходов затраты представляют собой уменьшение активов или увеличение обязательств, которое в зависимости от вероятности притока будущих экономических выгод может признаваться либо как активы (оборотные или необоротные), либо как расходы [4].

2. В бухгалтерском учете используется метод начислений, т.е. затраты представляют собой либо уменьшение активов (например, использованные для разработок или строительства материалы), либо увеличение обязательств (например, начисление заработной платы или страховых взносов, признание задолженности перед сторонними организациями за полученные активы и услуги). В то же время в п.57 Указаний говорится, например, что при отражении затрат на приобретение лицензий учитывается только сумма, выплаченная за отчетный год, а не начисленная, т.е. используется кассовый метод. Остается неясным, что в форме N 4-инновация считается капитальными затратами на приобретение внеоборотных активов: затраты,

отраженные за период на счетах внеоборотных активов по методу начислений, или произведенные платежи по кассовому методу.

3. Согласно п.11 приказа Минфина РФ от 29.07.1998 N 34н «Об утверждении Положения по ведению бухгалтерского учета и бухгалтерской отчетности в Российской Федерации» в бухгалтерском учете текущие затраты и затраты, связанные с капитальными вложениями, учитываются раздельно. Затраты на исследования и разработки в бухгалтерском учете будут включать текущие затраты и амортизацию капитальных затрат на приобретение основных средств и нематериальных активов [1, 8]. В форме N 4-инновация затраты на исследования и разработки включают текущие затраты на оплату труда, страховые взносы, материалы и капитальные затраты на приобретение внеоборотных активов, связанных с исследованиями и разработками, т.е. затраты не совпадут с учетными данными.

4. В форме N 4-инновация материальные затраты показываются по стоимости их приобретения (с учетом НДС) (п.53 Указаний), а в бухгалтерском учете затраты формируются без НДС, предъявляемого к налоговому вычету [3].

5. Объектом учета затрат в бухгалтерском учете являются виды выпускаемой продукции, работ, услуг или создаваемые организацией внеоборотные активы, но не виды осуществляемой деятельности, например, инновации [9]. Поэтому затраты, связанные с инновациями, в бухгалтерском учете будут отражаться разрозненно на разных счетах (08, 01, 04, 91-2, 25, 26, 44 и др.).

Для использования данных бухгалтерского учета в форме N 4-инновация с учетом перечисленных проблем, по нашему мнению, мало простого выделения в аналитическом учете на бухгалтерских счетах инновационных затрат. Можно предложить использование отражающего счета-экрана для учета этих затрат, например, с номером 00 Инновации, по примеру счетов 30-39 из плана счетов для организации управленческого учета затрат на производство по элементам.

Большинство организаций ведут учет автоматизировано в системе «1С: Бухгалтерия», которая поддерживает подключение к отдельному счету до 3 разных видов субконто (разрезов аналитического учета). К счету 00 Инновации можно открыть следующие виды субконто в соответствии со строками 5-го раздела формы N 4-инновация:

1) вид инноваций (технологические (в т.ч. продуктовые и процессные), организационные, маркетинговые, экологические);

2) состав затрат (исследование и разработка, производственное проектирование, приобретение машин и оборудования, приобретение технологий, приобретение программных средств, другие виды подготовки производства, обучение персонала, маркетинговые исследования, другие затраты);

3) источник финансирования (собственные средства, средства федерального бюджета, средства бюджетов субъектов РФ и местных бюджетов, средства внебюджетных фондов, иностранные инвестиции, прочие средства (в т.ч. кредиты и средства венчурных фондов)).

Обычно счета-экраны разбивают бухгалтерскую запись на две. Например, начисление зарплаты за выполнение разработки нового продукта, финансируемой за счет средств федерального бюджета, отражается записью:

Д-т счета 08-8 Выполнение НИОКР

К-т счета 70 Расчеты с персоналом по оплате труда.

Использование счета-экрана превращает ее в две проводки:

1. Начисление зарплаты:

Д-т счета 00 субконто Технологические продуктовые инновации – Исследование и разработка – Средства федерального бюджета

К-т счета 70 Расчеты с персоналом по оплате труда.

2. Отражение затрат на разработку:

Д-т счета 08-8 Выполнение НИОКР

К-т счета 00 субконто Технологические продуктовые инновации – Исследование и разработка – Средства федерального бюджета.

Чтобы сохранить привычный вид проводок, можно просто дополнять стандартную проводку записью, в которой по дебету и кредиту используется один и тот же счет-экран, отражающий затраты на инновации:

1. Начисление зарплаты за выполнение разработок:

Д-т счета 08-8 Выполнение НИОКР

К-т счета 70 Расчеты с персоналом по оплате труда.

2. Отражение затрат на инновации:

Д-т счета 00 субконто Технологические продуктовые инновации – Исследование и разработка – Средства федерального бюджета

К-т счета 00 субконто Технологические продуктовые инновации – Исследование и разработка – Средства федерального бюджета.

Отдельная проводка со счетом-экраном позволяет более гибко формировать информацию о затратах на инновации: ее можно составить на другую сумму (например, включающую НДС по материальным затратам), в момент начисления или оплаты затрат, выбирать состав затрат, подлежащих отражению (например, не показывать на счете 00 начисление амортизации внеоборотных активов при проведении исследований и разработок, но отражать затраты на их приобретение), сразу классифицировать затраты во всех необходимых разрезах (вид инноваций, состав затрат, источник финансирования).

При предлагаемой нами организации учета стандартный отчет «1С: Бухгалтерии» «Анализ счета по субконто» по счету 00 Инновации позволит получить необходимые данные для отражения затрат на инновации в

форме федерального статистического наблюдения N 4-инновация "Сведения об инновационной деятельности организации".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонец В.А., Нечаева Н.В., Абубакирова К.Н. Анализ учета расходов на НИОКР при реализации инновационного проекта // Экономический анализ: теория и практика. - 2009. - N 30. - С. 20 - 29.
2. Бакаев А.С. О роли бухгалтерского учета в инновационной экономике // Международный бухгалтерский учет.- 2010. -N 5. - С. 8 - 12.
3. Вещунова Н. Л., Фомина Л. Ф. Самоучитель по бухгалтерскому и налоговому учету — М.: Проспект, 2013. – 560с.
4. Неелова Н.В. Бухгалтерская (финансовая) отчетность: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.- 62с.
5. О формировании в бухгалтерском учете и раскрытии в бухгалтерской отчетности организации информации об инновациях и модернизации производства. ПЗ-8/2011 [Электронный ресурс] // Обобщение практики применения законодательства. URL: http://minfin.ru/ru/accounting/accounting/legislation/generalization/index.php?id_4=15411 (дата обращения: 27.03.2014).
6. Об утверждении статистического инструментария для организации федерального статистического наблюдения за численностью, условиями и оплатой труда работников, деятельностью в сфере образования: приказ Росстата от 29.08.2013 N 349. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
7. Руководство Осло - Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. Совместная публикация ОЭСР и Евростата. / Пер. с англ. - 3-е изд. - М.: ЦИСН, 2010. - 107 с.
8. Саенко К.С. Организация и методика учета инновационных затрат: теоретико-методологические аспекты // Международный бухгалтерский учет.- 2008. - N 12. - С. 28-36.
9. Саранцева Е.Г., Давыдова В.В. Инновационная деятельность как объект управленческого учета // Международный бухгалтерский учет.- 2012. - N 24. - С. 23 - 29.
10. Шоломова Е.В. Подготовка и освоение производств, цехов и агрегатов // Пищевая промышленность: бухгалтерский учет и налогообложение. -2010. - N 8.- С. 38 - 55.

N.V.Neelova

DISCLOSURE OF INFORMATION ABOUT INNOVATIVE ACTIVITIES OF THE ORGANIZATION IN FINANCIAL AND STATISTICAL REPORTS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

The article is devoted to the issues of disclosure of information about innovative activities in financial and statistical reports. The results showed that the costs of innovations in these two kinds of reports are formed using various rules. The author proposes the use of the accounting registers to obtain the required data for the statistical report.

Key words: innovations, innovative activities, costs of innovation.

REFERENCES

[1] Antonec V.A., Nechaeva N.V., Abubakirova K.N. Analiz ucheta rashodov na NIOKR pri realizacii innovacionnogo proekta // Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. - 2009. - N 30. - P. 20 – 29 (rus.).

[2] Bakaev A.S. O roli buhgalterskogo ucheta v innovacionnoi ekonomike // Mezhdunarodnyi buhgalterskii uchet.- 2010. -N 5. - P. 8 – 12 (rus.).

[3] Veshunova N. L., Fomina L. F. Samouchitel' po buhgalterskomu i nalogovomu uchetu. - M.: Prospekt, 2013. – 560p (rus.).

[4] Neelova N.V. Buhgalterskaya (finansovaya) otchetnost': Ucheb. posobie. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012.- 62p (rus.).

[5] O formirovanii v buhgalterskom uchete i raskrytii v buhgalterskoi otchetnosti organizacii informacii ob innovaciyah i modernizacii proizvodstva. PZ-8/2011 [Elektronnyi resurs] // Obobshenie praktiki primeneniya zakonodatel'stva. URL: http://minfin.ru/ru/accounting/accounting/legislation/ generalization/index.php?id_4=15411 (data obrasheniya: 27.03.2014) (rus.).

[6] Ob utverzhdenii statisticheskogo instrumentariya dlya organizacii federal'nogo statisticheskogo nablyudeniya za chislennost'yu, usloviyami i oplatoi truda rabotnikov, deyatel'nost'yu v sfere obrazovaniya: prikaz Rosstata ot 29.08.2013 N 349. Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus» (rus.).

[7] Rukovodstvo Oslo - Rekomendacii po sboru i analizu dannyh po innovaciyam. Sovmestnaya publikaciya OESR i Evrostata. / Per. s angl. - 3-e izd. - M.: CISN, 2010. - 107p (rus.).

[8] Saenko K.S. Organizaciya i metodika ucheta innovacionnyh zatrat: teoretiko-metodologicheskie aspekty // Mezhdunarodnyi buhgalterskii uchet.- 2008. - N 12. - P. 28-36 (rus.).

[9] Saranceva E.G., Davydova V.V. Innovacionnaya deyatel'nost' kak ob'ekt upravlencheskogo ucheta // Mezhdunarodnyi buhgalterskii uchet.- 2012. - N 24. - P. 23 – 29 (rus.).

[10] Sholomova E.V. Podgotovka i osvoenie proizvodstv, cehov i agregatov // Pishevaya promyshlennost': buhgalterskii uchet i nalogooblozhenie. - 2010. - N 8.- P. 38 – 55 (rus.).

УДК 657.3

Н. А. Николаев

РОЛЬ ГОСУДАРСТВА В РАЗВИТИИ КОРПОРАТИВНОЙ СОЦИАЛЬНОЙ ОТЧЕТНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Николаев Николай Александрович, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)535-8108, E-mail: nikolaev@kafedrapik.ru.

Аннотация

В работе рассмотрена роль государства в развитии корпоративной социальной отчетности промышленных предприятий. По результатам исследования были обозначены основные направления деятельности российских государственных органов в развитии корпоративной социальной отчетности.

Ключевые слова: корпоративная социальная отчетность, роль государства, инновации, экологическая деятельность

Национальные правительства, определяя государственную политику, играют важную роль в развитии корпоративной социальной отчетности. Они определяют программы экономического развития и финансовую политику, что помогает продвижению инициатив в области корпоративной социальной отчетности. Правительства вправе устанавливать требования в отношении природоохранной и социальной деятельности, требования к раскрытию информации предприятиями. Считается, что бизнес будет в большей мере социально-ответственным, если существуют жесткие требования для обеспечения такого поведения компаний, особенно если такие требования были приняты путем общения и достижения компромисса с бизнесом и другими заинтересованными лицами (стэйкхолдерами - от англ. stakeholders). Несмотря на то, что большая часть инициатив в области корпоративной отчетности являются добровольными, правительства могут обеспечить их продвижение на глобальном рынке. Хотя рыночные силы заставляют бизнес осуществлять деятельность в социально-ответственной манере, рынок не сможет побудить все компании действовать правильно и ответственно все время и во всех аспектах. Поэтому правительства обязаны реагировать на это, особенно в государствах, где верховенство закона отсутствует или присутствует в недостаточной мере. Правительства контролируют деятельность компаний благодаря наличию правовой системы

и с помощью функций регулятора. Но во многих развивающихся странах отсутствует культура соблюдения требований закона и у правительств недостаточно ресурсов и заинтересованности в принятии социальных и природоохранительных правовых норм.

Всемирный банк выделил пять ключевых институциональных ролей правительств в области развития корпоративной социальной отчетности (КСО): принуждение, содействие, участие, одобрение и демонстрирование [10]. Рассмотрим их более подробно, а также обозначим, что может быть задействовано в Российской Федерации.

1. Принуждение. Правительства имеют возможность продвигать корпоративную социальную отчетность предприятий, принимая нормативно-правовые акты, принуждающие бизнес раскрывать соответствующую информацию в своих годовых отчетах. Это требования к листингу на фондовых биржах (в частности, обязательность КСО для компаний, ценные бумаги которых находятся в высших котировальных списках), требования к отчетности негосударственных пенсионных фондов (как правило, это раскрытие информации о социально-ориентированной и этичной инвестиционной политике), требования к раскрытию информации об охране окружающей среды (например, об энергоэффективности производства промышленных предприятий).

Такой политики придерживается ряд Европейских государств, среди которых выделяются скандинавские страны. Наиболее существенные обязательные требования к раскрытию соответствующей информации в странах Европейского Союза представлены ниже [7].

В Бельгии с 2003 г. согласно пенсионному законодательству управляющие пенсионными средствами компании обязаны раскрывать в публикуемых годовых отчетах информацию, в какой степени их инвестиционные политики принимают во внимание этические, социальные и экологические факторы.

В Дании в 1995 г. был принят закон о «Зеленой отчетности» (англ. Green Accounts), который требует обязательное составление и публикацию КСО. В частности, некоторые компании обязали проводить качественный анализ своей деятельности в области охраны окружающей среды. С тех пор закон неоднократно пересматривался. К настоящему времени более 1000 датских компаний обязаны ежегодно составлять и публиковать КСО.

В Финляндии в 2011 г. национальное правительство приняло резолюцию, обязующую государственные непубличные компании и компании, в уставном капитале которых доля государства превышает 50%, публиковать показатели, характеризующие их устойчивое развитие.

Во Франции в 2001 г. внесены изменения в пенсионное законодательство, согласно которому пенсионные фонды должны раскрывать информацию о том, как их инвестиционные политика принимает во внимание эти-

ческие, экологические и социальные критерии. В 2003 г. введено законодательное требование о публикации годовой КСО, включающей в себя девять различных разделов, для компаний, чьи акции обращаются на фондовой бирже. В 2010 г. введена обязательная КСО и раскрытие информации о социальных и экологических вопросах деятельности компаний, чьи ценные бумаги торгуются на бирже, а также компаний с численностью и валютой баланса, превышающих определенное значение, определяемое Государственным Советом. Такая информация должна быть заверена третьей стороной.

В Ирландии в 2008 г. вступил в силу Закон о кредитных институтах, обязавший банки, поддерживаемые государством, публиковать раз в два года отчет о корпоративной ответственности.

В Италии с 2002 г. пенсионные фонды обязаны раскрывать информацию о нефинансовых факторах, повлиявших на их инвестиционные решения. В 2007 г. законодательным постановлением введена в действие на территории страны Директива ЕС № 2003/51ЕС. Она устанавливает, что управленческие отчеты компаний должны включать как финансовые, так и нефинансовые ключевые показатели эффективности.

В Нидерландах в 1993 г. внесены изменения в Закон об охране окружающей среды (англ. The Environmental Protection Act), обязавшие компании, являвшиеся крупнейшими загрязнителями окружающей среды, предоставлять соответствующим органам информацию об экологических аспектах своей деятельности. В 1999 г. правительство Нидерландов обязало свои публичные компании раскрывать информацию о деятельности в области охраны окружающей среды в форме ежегодных экологических отчетов, содержащих количественные данные о выбросах в атмосферу по каждому из предлагаемых 170 вредных веществ.

В Норвегии в 1998 г. в Закон о бухгалтерском учете внесены изменения, согласно которым все норвежские компании обязаны раскрывать информацию об условиях труда, равенстве полов и экологических вопросах своей деятельности в ежегодном отчете менеджмента. В июне 2013 г. вступил в силу закон, обязующий крупные компании раскрывать информацию о том, каким образом они интегрируют социальную ответственность в свои бизнес стратегии.

В Испании в 2011 г. вступил в силу Закон об устойчивой экономике (англ. Sustainable Economy Law), требующий, чтобы коммерческие компании, финансируемые правительством, а также федеральные государственные компании разработали стратегические планы по формированию годовых отчетов о корпоративном управлении и устойчивом развитии с обязательным указанием на наличие или отсутствие проверки таких отчетов третьей стороной. Если численность работников в компании превышает

тысячу человек, то такой отчет должен быть подан в Совет по КСО Испании.

В Швеции в 1999 г. были внесены изменения в Закон о Финансовой отчетности (англ. Financial Accounts Law), обязывающие компании раскрывать в годовых отчетах информацию о влиянии своей деятельности на экологическую среду, а также какой прямой и косвенный эффект это оказывает на их будущие финансовые результаты. Предусмотрены штрафы в случае неисполнения требований. В 2000 г. Закон о государственных пенсионных фондах (англ. Public Pensiod Funds Act) требует, чтобы национальные пенсионные фонды составляли ежегодные бизнес планы, которые в том числе дают описание того, как экологические и этические вопросы рассматриваются в контексте инвестиционных решений фондов. Закон также устанавливает, что фонды не могут приобретать доли в компаниях, которые нарушают инвестиционную политику этих фондов в части экологических и этических вопросов.

В Великобритании в 2000 г. введены изменения в пенсионном законодательстве, согласно которым управляющие должны оформлять письменное заявление о принципах принятия инвестиционных решений, включающее в себя информацию о том, какие социальные, экологические или этические рассуждения были приняты во внимание при этом. В 2006 г. Закон о компаниях (англ. Company Act) обязал компании, чьи ценные бумаги торгуются на Лондонской фондовой бирже, раскрывать информацию в своих ежегодных отчетах об экологических, трудовых, социальных и общественных факторах в той степени, в которой они помогают понять бизнес компании. С 2010 г. компании, которые используют более чем 6000 МВт.ч энергии в год обязаны отчитываться перед Агентством по защите окружающей среды (англ. Environmental Agency) о всех вредных выбросах в атмосферу.

За пределами Европы некоторые страны также ввели законодательные требования в отношении КСО. Хотя это не всегда полноценные традиционные корпоративные социальные отчеты, а чаще отчетность по конкретным проблемам и вопросам. В частности, правительство ЮАР, справляясь с последствиями апартеида, с 2004 года ввела в действие нормативный правовой акт (The Broad-Based Black Empowerment Act), требующий местные компании раскрывать информацию о корпоративных инициативах, касающихся предоставления чернокожему населению экономических привилегий, ранее им недоступных. В Индонезии с 2007 года согласно статье 74 Закона о Компаниях с ограниченной ответственностью (Limited Liability Company Law) компании, которые осуществляют деятельность, оказывающую влияние на природные ресурсы, должны создать и внедрить у себя программы корпоративной социальной ответственности. Не выполнив

данного требования, компании могут подвергнуться определенным санкциям со стороны правительства.

Тем не менее, не все развитые страны следуют такой политике. Например, в США законодательные требования в отношении составления и публикации КСО отсутствуют, хотя крупнейшие по выбросу парниковых газов компании с 2010 года обязаны публиковать информацию об объемах таких выбросов. Также еще с 70-х годов крупный бизнес, осуществляющий деятельность, в том числе, с государственными структурами, в рамках борьбы с дискриминацией должен раскрывать информацию о найме и продвижении по службе женщин и представителей национальных меньшинств. Тем не менее, Комиссия по ценным бумагам и биржам (Securities and Exchange Commission, SEC) CILIA не планирует вводить обязательные требования для публикации КСО и продвигать соответствующие инициативы. Такова ее официальная позиция.

2. Содействие. Данная роль может приобретать различные формы. В частности, правительства могут способствовать продвижению КСО путем осуществления государственного заверения и верификации такой отчетности либо определять стандарты проведения ее внешнего аудита независимой аудиторской организацией. Так, например, введенный в действие в 2002 г. в США закон Сарбейнза — Оксли, помимо ужесточения требований к процессу подготовки финансовой отчетности публичными компаниями, также затрагивает вопросы в области корпоративной этики и ответственности. Государственные органы могут быть задействованы в разработке стандартов, сборе данных и содействии развитию отчетной среды. Например, компаниям, которые добровольно публикуют КСО, могут быть предоставлены налоговые льготы, субсидии, экспортные квоты и финансовая поддержка. Немаловажным является также информационная поддержка практики раскрытия информации о корпоративной социальной ответственности, в том числе публичное одобрение и осуждение практик конкретных компаний.

3. Участие. Правительства могут служить в качестве представителя стейкхолдеров в своей стране или они могут сотрудничать со всеми стейкхолдерами в совместных проектах в области КСО, быть инициатором и организатором совместных обсуждений по вопросам КСО. Государственные органы могут обеспечивать отчитывающиеся компании и стейкхолдеров информацией для целей анализа и оценки. Правительства развитых стран также могут предоставлять различную поддержку правительствам развивающихся стран для продвижения инициатив в области КСО, участвовать в совместных проектах, формировать рабочие группы в наднациональных некоммерческих организациях.

4. Одобрение. Мнение и действия официальных лиц национальных правительств могут оказывать существенное влияние в области КСО. Пра-

вительства могут обеспечить легитимность и внушить доверие к определенным стандартам отчетности. Они могут отметить заслуги и достижения отдельных компаний в области КСО.

5. Демонстрирование. Правительства могут являться в качестве образца для подражания, увеличив прозрачность своей деятельности и раскрывая информацию о своей активности в области корпоративной социальной ответственности. В частности, это включает в себя инициативы в области «зеленых» закупок, распространенные в США и Канаде: компании, участвующие в государственных тендерах на поставку товаров или оказание работ, должны соответствовать определенным требованиям в плане ведения социально-ответственного бизнеса. Это также включает в себя как публикацию отчетности в области социальной ответственности государственными органами, так и раскрытие общей информации о социальных и экологических аспектах своей деятельности.

Рассмотрев пять основных ролей национальных правительств в развитии КСО, можно обозначить особенности участия российского государства в данном вопросе.

1. Обязательные требования к публикации КСО в российской нормативно-правовой среде отсутствуют. Руководство страны давало определенные устные поручения по совершенствованию законодательства в части экологической ответственности бизнеса, но пока это остается на уровне сигналов. На данный момент существуют отдельные законодательные требования в отношении отдельных аспектов корпоративной социальной ответственности. Так п. 5 ст. 22 Федерального закона от 23.11.2009 N 261-ФЗ [6] содержит указание на публикацию данных о совокупных затратах на оплату использованных в течение календарного года энергетических ресурсов в пояснительную записку к годовой бухгалтерской отчетности организаций, а энергетические компании обязаны разрабатывать программы по энергосбережению. ПБУ 4/99 предусматривает возможность раскрытия дополнительной информации, например, о природоохранных мероприятиях (в том числе об осуществленных затратах и степени влияния этих мероприятий на финансовые результаты деятельности организации) [4]. В сфере инноваций, информация о которой тоже раскрывается промышленными предприятиями в КСО, приказ Росстата от 25.08.2011 N 373 утвердил ежегодную обязательную форму статистической отчетности N 4-инновация "Сведения об инновационной деятельности организации" [5].

Как видим, в России необходимо осуществить целенаправленную систематизацию отдельных нормативных требований различных государственных регуляторов. Для этого требуется четко выраженная позиция руководства страны, направленная на долгосрочное развитие КСО на федеральном уровне, вместе с комплексным и системным участием государственных регулирующих органов.

2. Систематизация нормативных требований может осуществляться самостоятельно в форме разработки стандартов раскрытия информации или базироваться на требованиях уже существующих международных стандартов (например, стандартов GRI – Global Reporting Initiative) [7]. При этом, как показал проведенный анализ, только Швеция признала официально существующие международные стандарты по КСО (GRI) в качестве стандартов для раскрытия информацией предприятиями, находящимися в государственной собственности [9]. В определенной степени раскрытие информации предприятиями Дании и ЮАР также требует соответствия стандартам GRI. Все остальные страны самостоятельно разрабатывают и вводят в действие законодательные требования о публикуемой в КСО информации.

Автор считает, что Россия должна пойти по пути собственной разработки, базирующейся на опыте других стран и требованиях международных стандартов. Именно такой подход поможет решению насущных вопросов для нашей страны в проблемных сферах корпоративной социальной ответственности. Кроме того, такой подход соответствует эволюционному развитию смежных стандартов по финансовой отчетности, когда изначально разрабатывались национальные требования к финансовой отчетности публичных компаний, а уже потом на их основе и с участием национальных регуляторов создавались международные стандарты финансовой отчетности (МСФО). Активная и целенаправленная деятельность в этом направлении позволит России получить ведущую роль в разработке и развитии международных стандартов КСО наравне с англосаксонскими странами.

3. Вопрос обязательности или добровольности КСО стоит уже давно [3]. Аргументы как сторонников, так противников обязательности КСО достаточно убедительны. В последнее время, вследствие мирового финансово-экономического кризиса, наблюдается тенденция к все большему ужесточению требований к обязательной публикации КСО на уровне национальных правительств. Законодательные требования к публикации КСО особенно выделяющихся в этой сфере стран представлены выше.

В России КСО публикуется в добровольном порядке предприятиями различных отраслей промышленности. Всего на 20.02.2014 в Национальном регистре нефинансовых отчетов, который ведет Российский союз предпринимателей и промышленников (РСПП), значится 469 отчетов (экологических, социальных, интегрированных, отраслевых и отчетов в области устойчивого развития), подготовленных и опубликованных отечественными предприятиями с 2000 г. [2]. В основном это делает крупный бизнес, что и будет в будущем при сохранении нынешнего положения дел. Интересно, что согласно исследованию Ассоциации менеджеров России главным стимулом социальной ответственности для бизнеса является именно

давление властей (так ответили 79% опрошенных представителей бизнеса) [1]. Специфика отечественной институциональной среды склоняет к мысли, что жесткие требования в отношении публикации КСО в России не помогут достигнуть намеченных целей. Программы корпоративной социальной ответственности в основном присутствуют на региональном и местном уровнях и вызваны скорей давлением властей в форме требований финансирования различных социальных проектов в обмен на неформальные договоренности. Раскрытие информации о социальных мероприятиях у большинства отечественных мероприятий включает, прежде всего, траты на благотворительность. Такая политика приводит к созданию формальному отношения к корпоративной социальной ответственности и, соответственно, к формальному раскрытию информации об этих фактах в отчетности предприятий. По результатам анализа ролей национальных правительств в развитии КСО наиболее подходящими вариантами для применения в России в настоящее время являются содействие, участие, поддержка и демонстрирование. Необходимо предусмотреть возможности:

- предоставления налоговых льгот для социально-ответственного бизнеса;
- предоставления полномочий Российскому союзу предпринимателей и промышленников заниматься вопросами корпоративной социальной ответственности и отчетности;
- пересмотра требования к организациям-участникам государственных тендеров на поставку товаров, осуществление работ и оказание услуг (по примеру западных стран);
- публикации ФГУП и МУП, а также акционерными обществами со 100% государственным участием, КСО; для этого – разработать систему важнейших показателей деятельности таких предприятий в социально-экологической, инновационной и иной сферах.

Роль российских властей в развитии КСО должна заключаться не столько в администрировании бизнеса в форме установления жестких требований и правил публикации КСО, сколько в запуске процесса, его стимулировании и регулировании направления развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бизнес и общественное развитие России: проблемы и перспективы. [Электронный ресурс] // Под общей ред. С.Е. Литовченко. — М: Ассоциация менеджеров, 2006. URL: http://www.undp.ru/download.phtml?$387 (дата обращения: 07.04.2014).
2. Национальный Регистр и Библиотека корпоративных нефинансовых отчетов [Электронный ресурс] // Российский союз предпринимателей и промышленников. URL: http://rspp.ru/simplepage/157 (дата обращения: 07.04.2014).

3. *Николаев Н.А.* Корпоративная социальная отчетность: проблемы повсеместного внедрения // 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. 501 – 506.
4. Приказ Минфина РФ от 06.07.1999 N 43н "Об утверждении Положения по бухгалтерскому учету "Бухгалтерская отчетность организации" (ПБУ 4/99)".
5. Приказ Росстата от 25.08.2011 N 373 "Об утверждении статистического инструментария для организации федерального статистического наблюдения за деятельностью, осуществляемой в сфере науки и инноваций".
6. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
7. Global CSR Disclosure Requirements [Электронный ресурс] // Hauser Institute for Civil Society. URL: http://hausercenter.org/iri/about/global-csr-disclosure-requirements (дата обращения: 07.04.2014).
8. Global Reporting Initiative [Электронный ресурс] // GRI Project. URL: https://www.globalreporting.org/Pages/default.aspx (дата обращения 07.04.2014).
9. Sweden Mandates Sustainability Reporting [Электронный ресурс] // Sustainable Business. URL: http://www.sustainablebusiness.com/index.cfm/go/news.display/id/14814 (дата обращения: 07.04.2014).
10. *Tom Fox, Halina Ward, Bruce Howard.* Public Sector Roles in Strengthening Corporate Social Responsibility: A Baseline Study [Электронный ресурс] // International Institute for Environment and Development. URL: http://pubs.iied.org/pdfs/16017IIED.pdf (дата обращения: 07.04.2014).

N.A. Nikolaev

ROLE OF THE GOVERNMENT IN THE DEVELOPMENT OF CORPORATE SOCIAL REPORTING IN INDUCTRIAL ENTERPRISES

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper discusses the role of government in the development of corporate social reporting in industrial enterprises. The study indicated fields of main activities of Russian government in the development of corporate social reporting.

Key words: corporate social reporting, the role of government, innovation, environmental activities

REFERENCES

[1] Biznes i obshhestvennoe razvitie Rossii: problemy i perspektivy [Electronic resource] // Pod obshhej red. S.E. Litovchenko. — M: Associacija menedzherov, 2006. URL: http://www.undp.ru/download.phtml?$387 (accessed: 07.04.2014). (rus.).

[2] Nacional'nyj Registr i Biblioteka korporativnyh nefinansovyh otchetov [Electronic resource] // Rossijskij sojuz predprinimatelej i promyshlennikov. URL: http://rspp.ru/simplepage/157 (accessed: 07.04.2014). (rus.).

[3] *Nikolaev N.A.* Korporativnaja social'naja otchetnost': problemy povsemestnogo vnedrenija // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 3-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii. / Pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – P. 501 – 506. (rus.).

[4] Decree of the Ministry of Finance dated 06.07.1999 N 43n "Ob utverzhdenii Polozhenija po buhgalterskomu uchetu "Buhgalterskaja otchetnost' organizacii" (PBU 4/99)". (rus.).

[5] Decree of Rosstat dated 25.08.2011 N 373 "Ob utverzhdenii statisticheskogo instrumentarija dlja organizacii federal'nogo statisticheskogo nabljudenija za dejatel'nost'ju, osushhestvljaemoj v sfere nauki i innovacij". (rus.).

[6] Federal Law dated 23.11.2009 N 261-FZ "Ob jenergosberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii". (rus.).

[7] Global CSR Disclosure Requirements [Electronic resource] // Hauser Institute for Civil Society. URL: http://hausercenter.org/iri/about/global-csr-disclosure-requirements (accessed: 07.04.2014).

[8] Global Reporting Initiative [Electronic resource] // GRI Project. URL: https://www.globalreporting.org/Pages/default.aspx (accessed 07.04.2014).

[9] Sweden Mandates Sustainability Reporting [Electronic resource] // Sustainable Business. URL: http://www.sustainablebusiness.com/index.cfm/go/news.display/id/14814 (accessed: 07.04.2014).

[10] *Tom Fox, Halina Ward, Bruce Howard.* Public Sector Roles in Strengthening Corporate Social Responsibility: A Baseline Study [Electronic resource] // International Institute for Environment and Development. URL: http://pubs.iied.org/pdfs/16017IIED.pdf (accessed: 07.04.2014).

УДК 332.1(311.2)

О.А. Пономарева[1], О.В. Попова [2]

СТАТИСТИКА МАЛОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

[1]Ольга Алексеевна Пономарева, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-74-82, E-mail:ponomareva@kafedrapik.ru

[2]Ольга Васильевна Попова, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-74-82, E-mail:popova@kafedrapik.ru

Аннотация

В статье рассмотрены основные наблюдения, проводимые Федеральной службой государственной статистики в целях формирования баз данных о развитии малого предпринимательства и инновационной деятельности. Отмечены проблемные вопросы организации, программ наблюдений и представления информации. Исследованы тенденции развития малого бизнеса Санкт-Петербурга. Проведен сравнительный анализ показателей малого предпринимательства по Санкт-Петербургу и России в целом. Результаты исследования могут быть полезны при корректировке методики и программы статистических наблюдений, а также при разработке региональных программ развития малого предпринимательства.

Ключевые слова: статистика малых предприятий, смещенная выборка, информативность показателей, тенденции развития, структура малого бизнеса

В Программе развития малого и среднего бизнеса в Санкт-Петербурге на 2012-2015 годы отмечено, что "...сфера малого и среднего предпринимательства в Санкт-Петербурге рассматривается как неотъемлемая часть социально-экономического развития Санкт-Петербурга, способствующая обеспечению ускоренного роста человеческого капитала, являющегося основным ресурсом для экономики Санкт-Петербурга" [1].

Обоснованность, а следовательно, и эффективность разрабатываемых программ и конкретных мер по развитию малого бизнеса, в значительной степени определяется качеством информации о текущем состоянии и развитии объекта.

Основным источником данных о деятельности малого бизнеса являются выборочные статистические наблюдения за деятельностью отдельных субъектов малого предпринимательства, проводимые органами статистики ежеквартально. Основа выборки, т.е. границы генеральной совокупности малых предприятий, определяются по данным Статрегистра Федеральной службы государственной статистики, актуализация которого осуществляется в тесном сотрудничестве с налоговой и другими федеральными службами России. Для формирования выборочной совокупности организаций, подлежащих наблюдению, используется метод стратифицированной (расслоенной) выборки. Расслоение осуществляется по трем признакам: по видам экономической деятельности, по формам собственности и по объему выручки. Обязательно включаются в выборку организации, которые являются единственными представителями малого бизнеса по тому или иному виду деятельности или уровень показателей их деятельности значительно отличается от общей массы. Выборочная совокупность формируется на региональном уровне один раз в год и используется в течение всего года. По основным экономическим показателям деятельности обследование проводится по унифицированным формам, а отраслевые особенности находят отражение в специализированных формах. Из - за сложного характера объекта исследования нельзя сказать, что на сегодняшний день нет дискуссионных вопросов по методике формирования выборки и содержанию форм статистической отчетности. Необходимо отметить смещение выборки по структуре обследуемых видов экономической деятельности и по численности работников организаций.

Наряду с выборочными обследованиями, в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 24 июля 2007 г. N 209-ФЗ, раз в пять лет органы статистики должны проводить сплошные наблюдения за деятельностью субъектов малого и среднего предпринимательства. Так, в 2011 году было проведено сплошное наблюдение по итогам деятельности малых организаций за 2010 год. Серьезной проблемой обследования стала низкая собираемость отчетов. Особенно остро она ощущалась в крупных городах, в частности, в Санкт - Петербурге. Основной причиной такой ситуации является то, что реально организации работают не по месту регистрации, сведения о котором фиксируются в органах статистики. Данные, собираемые в ходе наблюдений, форма их представления в открытых публикациях органов статистически, на наш взгляд, не достаточны для детального и глубокого анализа процессов, происходящих в сфере малого предпринимательства.

Меняющиеся условия и факторы развития малого бизнеса требуют корректировки, обновления программ наблюдения.

В Программе развития малого и среднего бизнеса в Санкт-Петербурге на 2012-2015 годы [1] особый акцент сделан на развитие инновационной деятельности. Статистическое изучение инноваций в настоящее время проводится с использованием множества форм отчетности, среди которых основными являются форма №4-инновации (для крупных и средних организаций) и форма №2-инновации (для малых организаций). К сожалению, в официальных статистических публикациях не достаточно подробно разрабатываются данные, получаемые на основе формы №2-инновации.

Методологической базой для изучения инноваций служит руководство Осло (усовершенствованная версия руководства Фраскати) [9], одобренное Комитетом ОЭСР по научной и технологической политике, Комитетом ОЭСР по статистике и Рабочей группой Евростата по статистике науки, технологий и инноваций.

Под инновацией понимается «инвестиция в новацию» как результат практического освоения нового процесса, продукта или услуги. Таким образом, любая инновационная деятельность предполагает определенные затраты. Однако при заполнении статистических форм отчетности именно вопрос о размере затрат на те или иные виды инноваций вызывает самые большие затруднения. Это обусловлено тем, что в нормативных документах, регламентирующих ведение бухгалтерского учета в России, отсутствует категоризация инноваций, более или менее адекватно могут быть оценены только затраты на НИОКР. Применяемая в настоящее время методология статистического учета и анализа инноваций умело обходит вопрос адекватной оценки затрат, используя при расчете интегральных характеристик, в основном, качественные показатели. Показатели затрат на инновации используются в практике расчета ряда индикаторов инновационного развития и уровня инновационной активности, которые являются основой ранжирования организаций, регионов и учитываются при разработке программ разного уровня, при этом, мягко говоря, игнорируется отсутствие достоверной оценки затрат на инновации. Это серьезный методологический вопрос. Вопросы получения полной и достоверной информации о затратах на конкретные виды инноваций не могут быть решены без введения в практику бухгалтерского учета категории инновации.

Одной из причин, сдерживающей инновационное развитие малого бизнеса, является проблема инвестиций. На сегодняшний день законодательно оказание поддержки субъектам малого предпринимательства возложено только на региональные и местные органы власти. Государство не гарантирует банкам компенсацию рисков при предоставлении кредитов малому бизнесу на особых условиях. Банки

зачастую сталкиваются с затруднениями в оценке кредитоспособности субъектов малого предпринимательства по применяемым ими методикам, что обусловлено упрощенной системой ведения бухгалтерского учета и формирования финансовой отчетности малыми организациями. Сказанное свидетельствует о необходимости решения противоречий между заинтересованностью малых предприятий в упрощенном ведении бухгалтерского учета и потребностью кредитных организаций и органов управления в более полной и достоверной информации о деятельности субъектов малого бизнеса.

Однако несмотря на наличие определенных претензий к официальной статистической информации, на сегодняшний день она сохраняет статус наиболее полной и достоверной.

Анализ тенденций развития малого предпринимательства в Санкт - Петербурге за последние годы, результаты которого представлены в данной статье, основан на данных Росстата и Петростата [2,3,4,6,7,8,10].

Тенденции развития малого предпринимательства находят отражение в динамике основных показателей данного сегмента экономики, которые отражены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Основные показатели развития малого предпринимательства в Санкт - Петербурге за 2005 - 2012 годы

Показатели	Годы							
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Число предприятий, тыс.	114,5	110,3	125,7	126,8	168,2	168,4	163,3	211,3
Среднесписочная численность работников, тыс. чел.	632,8	624,8	628,3	628,7	630,7	623,5	622,4	623,4
Оборот малых предприятий, млрд. руб.	415,6	608,6	927,8	1265,6	1216,7	1287,9	1365	1431

За рассматриваемый период в Санкт – Петербурге наблюдалась весьма неустойчивая тенденция изменения основных показателей, характеризующих развитие малого предпринимательства. В частности, сокращение числа малых предприятий в 2006 году более чем на 4,2 тыс. организаций сменяется их ростом в 2007 году на 14 процентов (3,5 тыс.). На волне экономического кризиса в 2009 году наблюдался рост числа малых организаций на 33 процента, или на 41,4 тысячи. Такой скачек был обусловлен сокращением в этот период рабочих мест на крупных и

средних предприятиях, что побуждало высвобождаемых работников создавать собственный бизнес, чему способствовали меры, предпринятые правительством города в рамках реализации первой программы по поддержке малого предпринимательства.

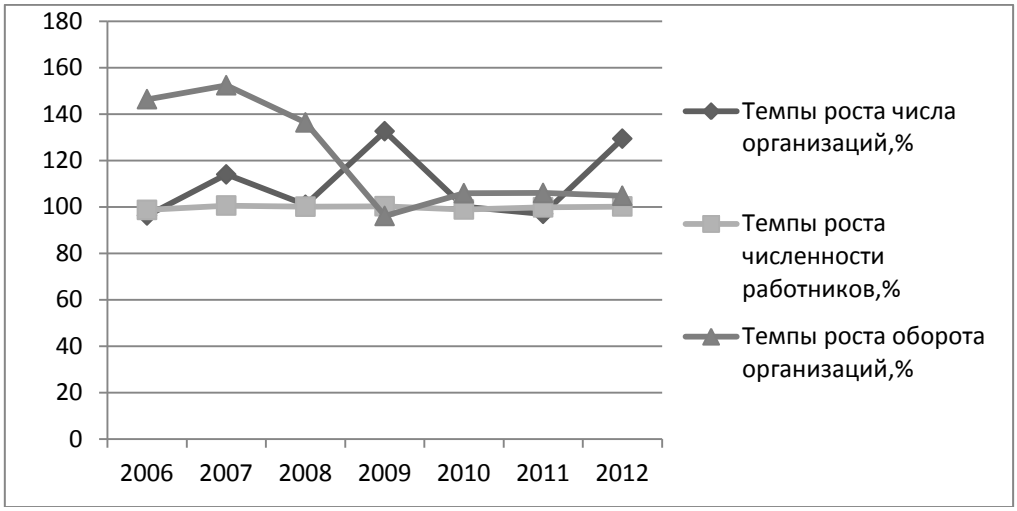


Рис. 1. Темпы роста основных показателей малого предпринимательства в Санкт - Петербурге за 2005 - 2012 годы, %

Однако этот процесс затормозился уже в следующем году, а в 2011 году вновь наблюдается сокращение числа организаций более чем на пять тысяч (3%). Учитывая значительные колебания числа организаций за рассматриваемый период, сложно комментировать наблюдаемый рост показателя в 2012 году. Нельзя сказать, насколько стабильными будут количество и темп роста числа организаций в ближайшее время. Эта неопределенность усугубляется тем, что по данным Петростата за первое полугодие 2013 года число малых предприятий сократилось по сравнению с аналогичным показателем 2012 года (информации за 2013 год в целом в официальных публикациях пока нет).

Увеличение числа малых организаций в 2007, 2008 и 2009 годах сопровождалось незначительным ростом числа занятых в малом бизнесе. Заметное снижение как числа организаций, так и численности занятых в 2006 году не позволило показателю численности работников малых предприятий вернуться к уровню 2005 года. Даже при увеличении числа организаций в 2012 году на 29 процентов, численность занятых выросла лишь на 0,2 процента. Численность занятых в малом бизнесе на протяжение рассматриваемых восьми лет практически не менялась, среднегодовой темп роста близок к 100%. Таким образом, в настоящее время малый бизнес не обеспечивает ожидаемое и необходимое увеличение числа рабочих мест (максимальное число занятых наблюдалось в 2005 году).

На фоне динамики числа организаций и занятости показатели общего оборота малых предприятий выглядят более оптимистично. Однако, следует помнить, что тенденция изменения показателя оборота в стоимостном выражении в известной мере обусловлена ростом цен, причем как потребительских, так и цен производителей. За рассматриваемый период, с 2005 по 2012 годы, снижение общего оборота малого бизнеса наблюдалось только в 2009 году - почти на четыре процента (49 млрд. руб.). В 2010 году показатель оборота вырос на 5,9%, что можно считать откликом на значительный рост числа организаций в предыдущем году. В абсолютном выражении величина оборота превысила уровень 2008 года. Сокращение оборота в 2009 году объясняется снижением спроса, обусловленного финансовым кризисом. Обращает на себя внимание сокращение темпов роста оборота малых предприятий, начиная с 2010 года (см. рис.1). Среднегодовой темп роста в период с 2010 по 2012 годы составил 105,4%, в то время как за 2006 -2008 годы - 145%. Безусловно, есть объективные причины такой ситуации (меняются факторы развития малого предпринимательства), однако отмеченный факт снижения темпов роста показателей заслуживает особого внимания и указывает на необходимость поиска новых методов анализа процессов развития малого бизнеса и управления ими.

Графическое отображение тенденций демонстрирует значительную колеблемость темпов роста числа организаций и отсутствие адекватного изменения как численности занятых, так и оборота малых организаций. Так, значительное увеличение числа предприятий в 2009 и 2012 годах (на 32,6 и 29,4 процента соответственно) не привело к сколь - либо заметному росту ни численности работников, ни оборота в данном секторе экономики города. При статистической оценке зависимости между анализируемыми показателями коэффициент корреляции между числом занятых и числом организаций оказался статистически незначимым. Наличие корреляционной зависимости между оборотом и числом малых организаций было статистически подтверждено, коэффициент корреляции составил 0,80, однако параметры уравнения связи оказались так же статистически не значимы.

Такое несоответствие между анализируемыми характеристиками частично может быть объяснено тем, что не все зарегистрированные малые предприятия ведут экономическую деятельность. К сожалению, в публикациях органов статистики эта категория организаций выделяется крайне редко. Для ее идентификации необходимо постоянное тесное сотрудничество органов статистики и налоговой службы, регулярное проведение актуализации статистического регистра предприятий и организаций.

На слабую информативность на сегодняшний день показателя числа организаций указывает и динамика показателей оборота малых

предприятий, рассчитанных на одну организацию и на одного работающего (см. рис. 2.)

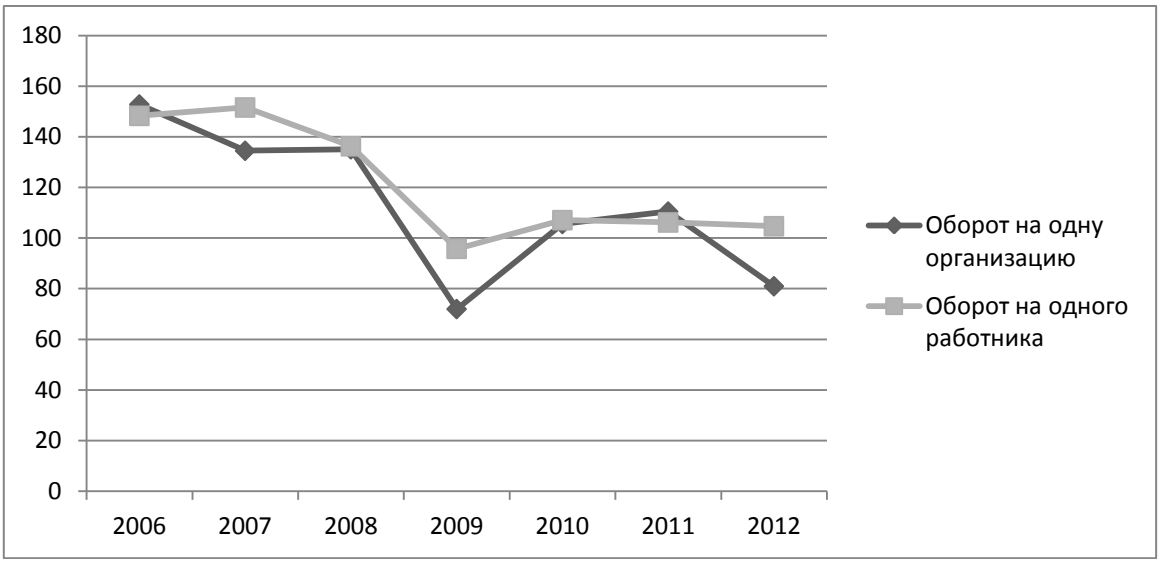


Рис. 2. Темпы роста оборота малых предприятий в расчете на одну организацию и одного работника малого бизнеса, %

Оборот малых предприятий на одного работника можно рассматривать как обобщающую характеристику производительности труда в данном сегменте. В последние три года темпы роста показателя значительно ниже, чем в до кризисный период. Если среднегодовой темп роста до 2009 года составлял 145%, то в последний трехлетний период - около 106%.

При построении трендовой модели по показателю оборота на одного работника ($y = 669{,}32 + 229{,}18 \times t$) коэффициент детерминации составил 0,84. Уравнение в целом и параметры статистически значимы, автокорреляция в остатках отсутствует, формально модель может быть использована для прогнозирования дальнейшего изменения показателя. Однако, учитывая меняющиеся факторы развития малого предпринимательства, для получения более адекватных прогнозов, очевидно, следует использовать метод сценариев.

Тенденции изменения показателей малого бизнеса в Санкт - Петербурге отличаются от поведения аналогичных характеристик по России в целом. Проводя сравнительный анализ, мы не затрагиваем показатель числа организаций. Эта характеристика в пересчете на 1000 человек населения (в статистических публикациях на 10000 человек) используется аналитиками при расчете интегрального индикатора для оценки вклада малых предприятий в экономическое развитие регионов [11]. Именно показатель числа малых организаций на 10000 человек населения выводил Санкт - Петербург в лидеры по вкладу малого бизнеса

в региональное развитие в до кризисный период. Но, как показал анализ, информативность показателя числа организаций очень низкая. При оценке уровня и тенденций развития малого предпринимательства основными характеристиками должны стать численность занятых, оборот организаций (как характеризующий результат деятельности), общий показатель производительности труда и, со временем, показатели инновационной деятельности.

Показатели динамики численности занятых и оборота малых предприятий по России и Санкт - Петербургу отражены на рис. 3, 4.

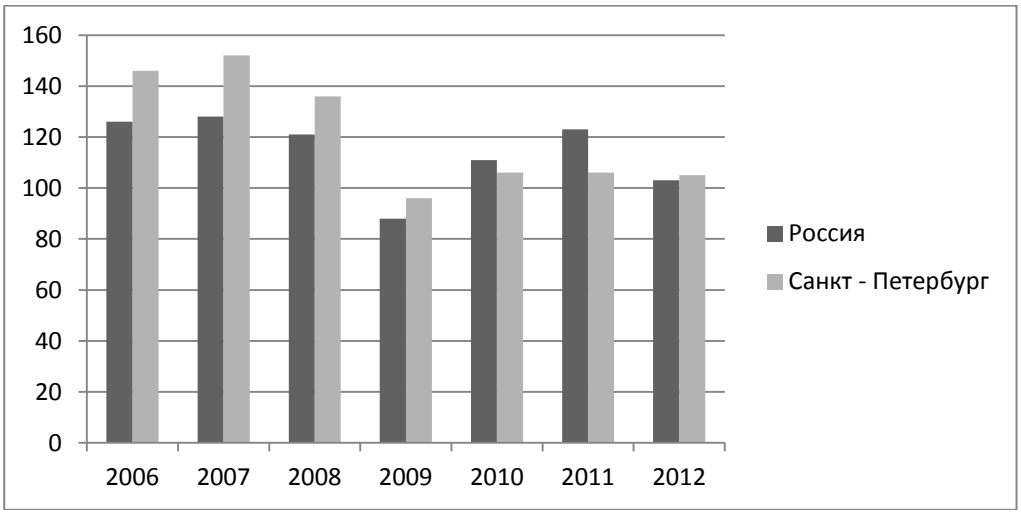


Рис. 3. Темпы роста оборота малого бизнеса в России
и в Санкт - Петербурге за 2006 - 2012 годы, %

Оборот малых организаций в докризисный период в Санкт - Петербурге возрастал более интенсивно, чем в целом по России. Среднегодовые темпы прироста составляли 44 и 25 процентов соответственно. В последние три года темпы роста значительно снизились и по России, и по Санкт - Петербургу, но при этом измелилось и соотношение среднегодовых темпов прироста: Санкт - Петербург - 5%, Россия - 13%.

Темпы роста численности работающих на малых предприятиях по России в целом значительно выше, чем по Санкт - Петербургу. Однако на этом фоне выделяются 2009 и 2010 годы, когда по России число занятых сократилось на 3-4%, в Санкт - Петербурге в 2009 году численность не значительно, но выросла (на 0,3%), а в 2010 уменьшилась всего на 1%. Здесь, как уже говорилось, проявился краткосрочный эффект реализации Плана мероприятий по развитию и поддержке малого и среднего предпринимательства в Санкт-Петербурге на 2008-2011 годы.

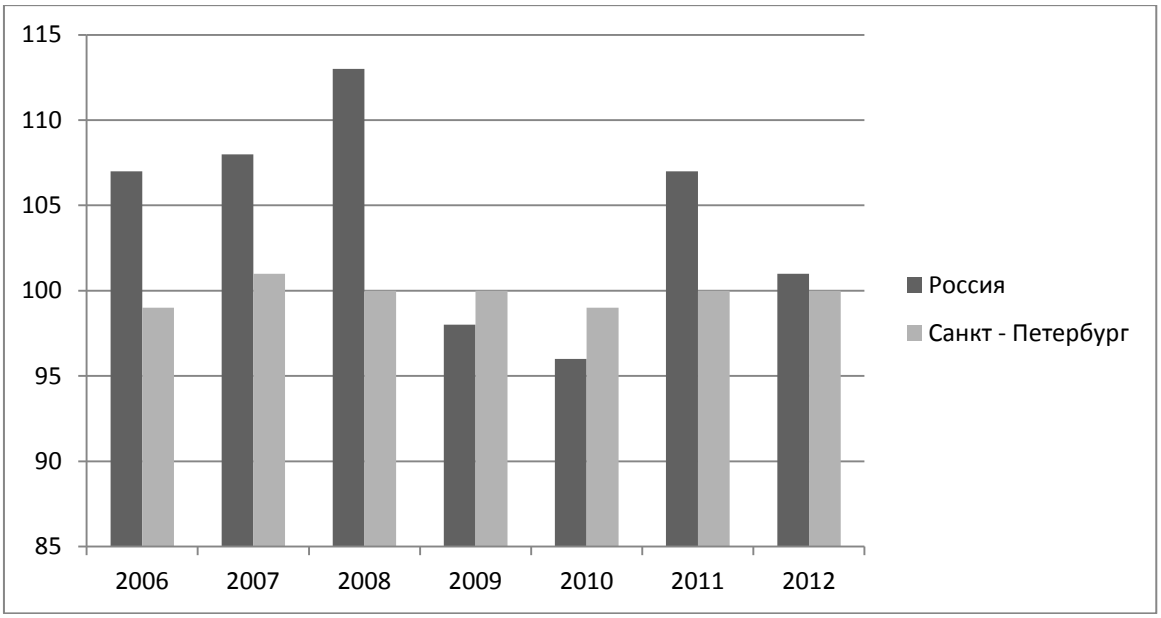


Рис. 4. Темпы роста численности занятых в малом бизнесе в России и в Санкт - Петербурге за 2006 - 2012 годы, %

Факторов, влияющих на уровень и динамику занятости в малом бизнесе, много и они чрезвычайно разнообразны - это и экономические, и социальные, и демографические, и инфраструктурные, и информационные. Оценка их влияния требует глубокого специального исследования. Попытка статистической оценки влияния изменения численности экономически активного населения региона, предпринятая в данном исследовании, не увенчалась успехом, что связано с отсутствием сколь - либо заметной тенденции в изменении этих характеристик. Как отрицательный факт можно рассматривать практически не меняющуюся долю занятых в малых организациях в общей численности экономически активного населения. За рассматриваемый временной интервал она составляла от 22,9 до 21,5 процента. Наметившееся в последние годы снижение доли занятых в малом бизнесе противоречит ожидаемому ее росту.

Помимо оценки интенсивности изменения основных показателей, отражающих процессы развития малого бизнеса, важное значение имеет анализ его структуры по видам экономической деятельности и оценка структурных сдвигов. В табл. 2 приведены данные о распределении числа организаций, численности занятых и оборота малых организаций Санкт-Петербурга по видам экономической деятельности, суммарная доля которых составляет более 90 процентов.

Безусловным лидером по всем показателям является вид деятельности "Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств...". Привлекательность данного вида деятельности обусловлена сравнительно небольшими затратами и быстрой оборачиваемостью

капитала. Следует отметить, что при снижении в 2012 году доли отрасли по показателям числа организаций и численности занятых, возрастает ее удельный вес в обороте малых предприятий до 63,1% (по России - 59%). Недостатком представляемых официальной статистикой данных является объединение в одну группу таких видов деятельности как торговля и ремонт автотранспортных средств. В последние годы интенсивно растет число автотранспортных средств в регионе, что сопровождается развитием соответствующего сегмента сферы услуг. На наш взгляд, назрела необходимость в статистических публикациях выделять в составе данного вида деятельности организации, занимающиеся ремонтом автотранспортных средств и мотоциклов. В пользу указанной необходимости говорит и тот факт, что Санкт-Петербург стал лидером среди регионов России по доле сетей в розничных продажах, в 2010 году этот показатель составил 46,7 процента. Такая ситуация может привести к снижению доли малого бизнеса в торговле. Следовательно, в одной группе могут оказаться виды деятельности с разнонаправленными тенденциями развития, что, безусловно, будет искажать результаты анализа и приводить к ложным выводам.

Таблица 2

Распределение числа малых организаций, численности занятых и оборота организаций по видам деятельности, %

Вид деятельности	Число организаций		Среднесписочная численность занятых		Оборот предприятий	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Обрабатывающие производства	8,3	8,7	12,9	14,9	8,9	8,6
Строительство	9,9	10,5	13,4	14,6	10,6	11,0
Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования	44,0	42,3	37,6	35,0	62,5	63,1
Транспорт и связь	7,7	7,8	6,0	5,1	2,7	3,5
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	21,3	21,8	21,5	21,9	12,6	10,9
Прочие	8,8	8,9	8,6	8,5	2,7	2,9
Итого	100	100	100	100	100	100

Второе место в структуре малого предпринимательства занимает вид деятельности "Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг". Его доля в 2012 году в общем числе организаций составляла 21,8%, а в среднесписочной численности занятых - 21,9%. По сравнению с 2011 годом показатель вырос, однако при этом сократилась доля данного вида деятельности в общем обороте малых организаций - с 12,6 в 2011 году до 10,9% в 2012 году. В абсолютном выражении сокращение оборота составило 15071 млн. руб. (с 171425 млн. руб. до 156354 млн. руб.). Эта отрицательная тенденция проявилась несмотря на то, что в предыдущем, 2011 году, из всего объема инвестиций малых предприятий в основной капитал 69,7% приходилось на вид деятельности "Операции с недвижимым имуществом". Возможно эффект от произведенных вложений проявится в последующие годы, за этим следует понаблюдать.

Третья позиция в структуре малого бизнеса принадлежит строительству. В 2012 году доля данного вида деятельности незначительно выросла и составила: по числу организаций - 10,5%, по численности занятых - 14,6% и по величине оборота - 11%. Как положительный момент можно отметить то, что рост числа предприятий и занятости сопровождался ростом оборота организаций. К сожалению, этого нельзя сказать об обрабатывающих производствах, а именно на этот вид деятельности делается основная ставка в Программе правительства Санкт - Петербурга по развитию малого и среднего предпринимательства на 2012 - 2015 годы [1]. Отдельным пунктом в перечне ожидаемых итогов реализации программы выделено, что прирост количества субъектов малого и среднего предпринимательства, осуществляющих деятельность в сфере обрабатывающих производств и инноваций, составит 10 процентов. Но, как показал анализ, показатель числа организаций не является информативным при оценке деятельности малого бизнеса. В последние годы число организаций в сфере обрабатывающих производств и их доля в общем числе малых предприятий растет, однако это слабо отражается на объеме оборота. В настоящее время отрасль идет по экстенсивному пути развития. Доля оборота данного вида деятельности в общем обороте малых организаций в Санкт - Петербурге в 2012 году составляла 8,6% (по России в целом - 9,4%). Основной путь развития данного вида деятельности - инновационный, однако доля организаций обрабатывающих производств, осуществляющих технологические инновации в настоящее время составляет около пяти процентов, а удельный вес инновационных товаров, работ и услуг чуть более полутора процентов.

Важную роль в развитии малого предпринимательства играют инвестиции. Коротко остановимся на анализе динамики и структуры инвестиций в малый бизнес Санкт - Петербурга за последние годы (см. табл. 3).

Таблица 3

Инвестиции малых предприятий в основной капитал

Вид деятельности	2011 год		2012 год		
	Млн. руб.	Доля, %	Млн. руб.	Доля, %	Темп роста инвестиций, %
Обрабатывающие производства	502	8,3	810	24,6	161,4
Строительство	327	5,4	277	8,4	84,7
Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования	636	10,5	764	23,2	120,1
Транспорт и связь	154	2,5	351	10,7	227,9
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	4223	69,7	752	22,8	17,8
Прочие	219	3,6	341	10,3	155,7
Итого	6061	100	3295	100	54,4

Прежде всего обращает на себя внимание высокий объем инвестиций в 2011 году, который в 2012 году сократился на 46% (по России в целом в 2012 году наблюдался рост инвестиций малых предприятий в основной капитал на 20,8%). Уровень и динамика показателей - это опять же отклик на политику правительства города. 2011 год - последний год реализации программы по поддержке малого бизнеса, разработанной на период с 2008 по 2011 годы, а 2012 год - год "запуска" новой программы. Поскольку 69% инвестиций в 2011 году приходилось на вид деятельности "Операции с недвижимым имуществом...", то сложно комментировать наблюдаемые структурные сдвиги. Более показательной, вероятно, можно считать структуру инвестиций 2012 года.

Максимальный рост инвестиций в 2012 году наблюдался по группе вида деятельности "Транспорт и связь", прирост составил 128 %. Положительным фактом является увеличение объема инвестиций в обрабатывающие производства - на 61,4% (по России в целом 35,5%), что в абсолютном выражении составило 308 млн. руб. Показатели, характеризующие инвестиционный процесс, позволяют надеяться на положительные изменения в отраслевой структуре малого бизнеса.

Федеральной службой государственной статистики ежеквартально

проводится также выборочное наблюдение за деловой активностью малых предприятий добывающих, обрабатывающих производств, производства и распределения электроэнергии, газа и воды и ежегодно обследование инвестиционной активности организаций этих же видов деятельности. Такие обследования позволяют получить характеристику общей экономической ситуации в малом бизнесе и оценку перспектив развития. Приведем динамику результатов опросов по обрабатывающим производствам (см. табл.4) [3].

Таблица 4

Оценка общей экономической ситуации на малых предприятиях обрабатывающих производств
(по данным опроса руководителей малых предприятий в процентах от числа обследованных организаций)

Обрабатывающие производства	2010		2011		2012	
	1-й кв.	4-й кв.	1-й кв.	4-й кв.	1-й кв.	4-й кв.
Благоприятная	4	8	6	9	8	11
Удовлетворительная	63	72	70	73	72	73
Неудовлетворительная	31	19	22	16	18	14

Большинство руководителей оценивают общую экономическую ситуацию как удовлетворительную. Положительной тенденцией можно считать сокращение доли оценок "неудовлетворительная" и рост доли категории "благоприятная", однако удельный вес такой оценки невысок. Обращает на себя внимание то, как меняются оценки в четвертом квартале по сравнению с первым. Более оптимистичные оценки четвертых кварталов обусловлены, вероятно, тем, что более активная деятельность и основные результаты в экономике по - прежнему проявляются к концу года.

Что касается основных факторов, ограничивающих рост производства, то по оценкам руководителей малых организаций, факторы ранжируются следующим образом (по результатам опроса 2012г.): высокий уровень налогообложения (55% опрошенных); недостаточный спрос на продукцию предприятия (45%); неопределенность экономической ситуации (41%); недостаток финансовых средств (36%); недостаток квалифицированных рабочих (29%) [3]. Особое беспокойство вызывает рост числа (доли) респондентов, отмечающих именно последний фактор. О разрушенной системе подготовки квалифицированных рабочих говорится много, но не предпринимается реальных шагов, которые могли бы привести к ощутимому изменению ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа развития малого и среднего предпринимательства в Санкт-Петербурге на 2012 - 2015 годы. URL: http://gov.spb.ru /gov/admin/terr/reg_kolpino/ekonom/programmarazvitiy/programma (дата обращения: 04.04.2014).
2. Малое и среднее предпринимательство в России. 2012: Стат.сб./Росстат. - М., 2012. – 185 с.
3. Малое и среднее предпринимательство в России. 2013: Стат.сб./Росстат. - М., 2013. – 124 с.
4. О деятельности малых предприятий Санкт - Петербурга и Ленинградской области в 2012 году: Стат. сб./ Петростат. - СПб., 2013. - 82 с.
5. Пономарева О.А. Информационное обеспечение оценки инновационной деятельности малого предпринимательства // Экономика и предпринимательство. - 2013. - №6. - С. 540-544.
6. Попова О.В., Пономарева О.А. Роль анализа ресурсного потенциала в формировании стратегии промышленного предприятия // 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. 517-523
7. Регионы России. Социально - экономические показатели. 2010: Стат. сб./ Росстат. - М., 2010. - 996 с.
8. Регионы России. Социально - экономические показатели. 2013: Стат. сб./ Росстат. - М., 2013. - 990 с.
9. Российский статистический ежегодник. 2013: Стат. сб./ Росстат. - М., 2013. - 786 с.
10. Руководство Осло. Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. - 3-е изд., совместная публикация ОЭСР и Евростата / Пер. на рус. яз. — М.: ГУ «Центр исследований и статистики науки», 2006. — 192 с.
11. Санкт - Петербург в 2012 году: Стат. ежегодник./ Петростат. - СПб., 2013. - 226 с.
12. Токаре В.Б. Влияние малого бизнеса на развитие регионов России // Вопросы статистики. - 2014. - №3. - С. 30-34.

O.A. Ponomareva, O.V. Popova

STATISTICS OF SMALL BUSINESS AND INNOVATIVE ACTIVITY

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;

Abstract

In this article the main observations, carried out by The Federal service of

state statistics are considered. They are used for developing a database with information about small business and innovation activities. The problematic issues of data systematization, observation programs and information presentation are stated. The tendencies of small business development in St. Petersburg are studied. Comparative analysis of small business indices of SPb and Russia as a whole is carried out. The obtained results may be useful for improvement of technique and programs of statistical observations and in developing regional programs of small business development.

Key words: small enterprise statistics, biased sample, comprehension of statistical indicators development tendencies, the structure of small business

REFERENCES

[1] The program of development of small and medium business in St. Petersburg in 2012 - 2015. URL: http://gov.spb.ru /gov/admin/terr/reg_kolpino/ekonom/programmarazvitiy/programma (date of access:04.04.2014). (rus.)
[2] Small and medium entrepreneurship in Russia. 2012: Stats/ Rosstat.-M.,2012.-185 p.(rus.)
[3] Small and medium entrepreneurship in Russia. 2013: Stats/ Rosstat. - M., 2013. - 124 p. (rus.)
[4] On the activity of small enterprises of St. Petersburg and Leningrad region in 2010, Stat. Proc./ Petrostat. - SPb., 2013. - 82 p. (rus.)
[5] Ponomareva O.A. Information support for the evaluation of innovative activity of small entrepreneurship // Economics and entrepreneurship. - 2013. - №6.-pp.540-544. (rus.)
[6] The Regions Of Russia. Socio - economic indicators. 2010: Stat. collection/Rosstat.-M, 2010.-996 p.(rus.)
[7] The Regions Of Russia. Socio - economic indicators. 2013: Stat. collection/Rosstat.-M,2013.-990 p.(rus.)
[8] Russian statistical Yearbook. 2013: Stat. collection/ Rosstat. - M, 2013. – 786 p.(rus.)
[9] The Oslo Manual. Recommendations on the collection and analysis of data on innovation. - 3-e Izd., a joint publication of OECD and Eurostat / TRANS. Rus. lang. - M: state institution "Centre for science research and statistics", 2006. 192 p. (rus.)
[10] St. Petersburg in 2012: Stat. Yearbook./ Petrostat. - SPb., 2013. – 226 p. (rus.)
[11] The Turner V.B. have been the Influence of small business on development of regions of Russia // Questions of statistics. The 2014. - №3. - pp. 30-34.

УДК 339.9

Е.А.Светлова[1], В. Д. Хижняк[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПОРТНО-ИМПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

[1]Евгения Александровна Светлова, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)952-5822, E-mail: eugenia.svetlova@gmail.com

[2]Владимир Дмитриевич Хижняк, к.э.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-1002, E-mail: hizhnyak@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассматривается возможность создания B2B портала для обеспечения экспортно-импортных операций промышленных предприятий. Приводятся результаты исследования существующих в настоящее время систем, анализируются их особенности. Показано отличие предлагаемой структуры от существующих, обосновывается инновационность предлагаемой модели.

Ключевые слова: экспортно-импортные операции, B2B портал, интернет-торговля, бизнес-ассоциации.

В условиях стремительно изменяющейся внешней среды, растущей конкуренции и всемерного развития технологий необходимо постоянно искать новые решения для поддержания успешности бизнеса. Особую роль в современном обществе играют IT технологии, предлагающие широчайший спектр возможностей и механизмов, которые в значительной степени могут повышать эффективность и конкурентоспособность бизнеса. Один из наиболее перспективных и активно развивающихся инструментов – B2B площадки, представляющие собой виртуальные торговые платформы.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы исследовать возможность создания на базе интернет-платформы структуры, которая будет обеспечивать безопасные экспортно-импортные операции между российскими и американскими промышленными предприятиями, быстрый

поиск клиентов, партнеров, товаров, оценку репутации компании и другие дополнительные сервисы. Инновационность разрабатываемого проекта обусловливается не только активным использованием современных информационно-коммуникационных технологий, но и внедрением передовых платежных сервисов, возможностью сопряжения с транзакционными системами компаний, использованием различных способов обеспечения безопасности сделок (активное взаимодействие с профессиональными ассоциациями, использование escrow-сервиса), а также предоставление дополнительных услуг (в частности страхование бизнес рисков, переводы, консалтинг и др.). Именно многоступенчатое обеспечение безопасности прежде всего определяет инновационность предлагаемой модели обеспечения экспортно-импортных операций. Как известно, концепция инновационной бизнес-модели может быть достаточно простой и вместе с тем чрезвычайно успешной и даже вести к созданию новых отраслей, как, например, в случае с бизнес-моделями FedEx или Dell.

Для оценки перспективности разработки подобного проекта и степени его востребованности необходимо провести комплексное исследование, позволяющее оценить уникальность предлагаемой структуры, различные аспекты основных международных коммерческих интернет-платформ, их участников и предлагаемых операций, выявить основные проблемы и направления необходимой работы. В настоящее время проводится международное анкетирование целевой аудитории, устанавливаются активные контакты с различными промышленными ассоциациями и союзами. Необходимо отметить, что уже на начальной стадии исследования получены первые положительные результаты. Так, американские эксперты из ассоциации SCORE на основе анализа американского рынка считают, что есть хороший потенциал для такого сотрудничества между российскими и американскими промышленными предприятиями, в частности, по их мнению, в США будут востребованы многие российские товары, включая, например, такие, как:

- продукция станкостроения и запчасти для станков;
- гидравлическое оборудование;
- сантехническое оборудование и материалы;
- пневмооборудование и запчасти;
- коммерческое оборудование для гальванообработки и анодирования;
- литьевое оборудование и прессы;
- кожевенные изделия и дубильные вещества;
- тканевые и полимерные пленки;
- многие виды промышленной продукции;

Кроме этого, в настоящее время в ходе выполнения данного проекта ведётся исследование порталов, осуществляющих предлагаемые операции. Рынок электронной коммерции сейчас активно развивается и B2B платформы очень разнообразны, поэтому для удобства восприятия их можно условно классифицировать на создаваемые:

- покупателями (buyer-driven): закупочные площадки (в основном организуются предприятиями для минимизации издержек поставок);
- продавцами (seller-driven): с целью расширения клиентской базы и увеличения продаж;
- третьей стороной (third party driven). Это площадки, создаваемые для развития контактов между компаниями внутри отрасли (моноотраслевые), вне зависимости от отрасли (многоотраслевые). Большинство платформ относится к данной категории [1].

Весь объем B2B платформ по географии охватываемых рынков и представленных участников можно также разделить на международные и национальные, т.е. оперирующие в рамках одного государства (дальнейшая детализация представляется излишней).

Исходя из целей настоящего исследования и особенностей разрабатываемого портала, основной интерес представляют международные площадки, создаваемые третьей стороной (именно так, согласно представленной классификации, определяется предполагаемая платформа). Самым большим и возможно популярным является сайт Alibaba.com, насчитывающий около 7 млн. участников со всего мира. Это классическая B2B площадка, обеспечивающая поиск необходимых товаров, а также компаний и возможность связи с ними. Возможность онлайн оплаты на этой платформе не предусмотрена (однако разработчики обещают в будущем предоставить такой сервис). Интересной особенностью платформы является встроенный в чат онлайн переводчик (то есть, можно отправлять сообщения зарубежному партнеру на своем языке, который автоматически переведется на английский [2]). Безопасность и надежность компаний рекомендуют проверять по «золотому членству» (на сайте предусмотрены различные категории платного членства, золотая категория – самая дорогая, разработчики обещают тщательную проверку всех своих «золотых членов»), а также по косвенным признакам вроде наличия собственного домена электронной почты, информации в интернете, отзывов клиентов. Однако надежность «золотого» членства как гаранта безопасности была подвергнута сомнению после скандала, связанного с компаниями, входящими в эту привилегированную категорию и обманывавшими потребителей [3].

Очень похожа платформа ImportExport [4], также объединяющая участников со всего мира и не предоставляющая возможность заключения сделок онлайн и проведения транзакций. Из особенностей можно отметить

бегущие строки с последними запросами на покупку и продажу (очевидно, данный сервис предоставляется в качестве рекламы за деньги).

Нестандартное решение предлагает TradeHolding.com – холдинг с головным офисом в Румынии, предлагающий клиентам создавать совместные или собственные B2B сайты и площадки или регистрироваться на уже функционирующих площадках, например B2B.tradeholding.com и получать в качестве бонуса собственный стандартизированный вэб-сайт на их домене [5]. Портал объединяет около 600000 участников и предлагает ранжированные платные категории членства, предоставляющие различный объем услуг (разрешенное количество отправляемых писем-запросов и ответов на запросы в день, допустимый объем описания продукции и т.п.). Платежные системы также не используются (то есть сайт носит информационный характер). Из особенностей – работа с собственными «кредитами», которые можно потратить на сайте на дополнительные бонусы, вроде увеличения разрешенных запросов клиентам в день, а также активно предлагают рекламные услуги вроде прямой массовой рассылки. Поэтому интерфейс данного сайта перегружен лишней информацией.

Go4worldbusiness.com – еще один всемирный B2B портал, объединяющий 114 региональных сайтов с головным офисом в Индии. Площадка объединяет примерно 550000 участников (более половины из стран Азии) [6]. Из особенностей, отличающих данную площадку от аналогичных сайтов, стоит отметить способ проверки участников – значок «Verified», который появляется на странице запроса на покупку, который означает, что персонал сайта связался с владельцем компании и уточнил его намерения о приобретении. Однако организаторы сайта предупреждают, что это не является гарантией безопасности и пользователи должны самостоятельно удостовериться в добросовестности контрагента, прежде чем вступать с ним в деловые отношения. В целом, из-за обилия рекламы и предложения дополнительных услуг, интерфейс становится пестрым, очень сложно вычленить и воспринять необходимую информацию.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

Все площадки предусматривают бесплатную регистрацию с минимальным набором опций и многоуровневое платное членство, обеспечивающее диверсифицированный объем доступных услуг и дополнительные бонусы. Без регистрации практически все данные о компании скрыты, невозможно отправить сообщение или оставить заявку на покупку. Интерфейс площадок (пожалуй, за исключением Alibaba) перегружен рекламной информацией, пестрыми шрифтами различных кеглей, баннерами, что в значительной степени затрудняет восприятие информации.

Необходимо отметить также состав участников данных площадок. Как уже упоминалось ранее, с учетом направленности разрабатываемого

проекта, рассматриваются площадки с международным составом участников. На всех указанных выше площадках присутствуют российские компании, однако какой-либо серьезной промышленной ориентированности и четкого представления инновационной продукции, а также поддержки со стороны профессиональных ассоциаций и союзов не наблюдается. Что касается российских платформ для поддержки и развития экспортно-импортных отношений, самым популярным порталом является Rusbiz.com [7]. Сайт обладает приятным интерфейсом, объединяет компании со всего мира, включая примерно 20 из США. Портал гораздо более продвинут в сопровождении сделок, чем аналогичные площадки, предлагает возможность оформления инвойса [8], отслеживания заказа и оплаты через PayPal сервис. Кроме этого, доступны ссылки на другие популярные площадки. Еще одним серьезным порталом является Impex Russia [9], реализующий нестандартное решение: вместо платного членства различных уровней, предлагается приобретать платные пакеты подписок на списки контактов российских импортеров или экспортеров определенных категорий. При этом список составляют сами создатели сайта из официально зарегистрированных и функционирующих компаний. Таким образом, гарантируется добросовестность участников. Сайт, однако, содержит информацию только о российских компаниях.

Если говорить о географической направленности российских площадок, то большинство ориентированы на Китай и азиатский рынок в целом, включая Индию, Индонезию, Малайзию, Вьетнам и Таиланд. Так, чисто российско-американские порталы не удалось найти, кроме того, необходимо отметить, что российских компаний (особенно взаимодействующих с американскими компаниями) на международных порталах практически нет.

Ни на одной площадке не предусмотрена возможность заключения сделок онлайн и проведения оплаты по ним. Здесь необходимо подробнее остановиться на этом важном моменте. В исследованиях специалистов Trade B2B (глобальный портал, посвященный электронному B2B бизнесу [10]), маркетолога Я.Вахитова [11], Карминского А.М. [12] и других, в числе прочих проблем отмечается и отсутствие «адекватных расчетных сервисов» [13], препятствующих заключению сделки в онлайн режиме. Сразу стоит отметить отдельную категорию B2B площадок – системы электронных торгов, тендеров и закупок (включая государственную [14]), где компании платят за возможность участия в тех или иных процедурах [15], и сделка считается заключенной в результате выигранных торгов.

Часто системы основаны на бартерном принципе, т.е. используют свою валюту (например, торговая система B2B.ru использует «B2B Деньги» в качестве расчетного средства [16]) по аналогии с крупнейшими американскими площадками Itex [17] и Imsbarter. Таким образом, компании в любом случае вынуждены уходить с площадок для заключения

сделок, либо тратить средства в той же системе, по сути, становясь ее заложниками.

В рамках данного исследования разрабатывается B2B портал, призванный преодолеть указанные ограничения. Предполагается внедрить платежную систему escrow, которая позволит участникам не только заключать сделки и оплачивать контракты на сайте, но и обеспечит безопасность и гарантию исполнения платежей (по сути это аналог аккредитивной системы расчетов (letter of credit) – наиболее распространенной формы в современной международной торговле). Интегрированная система escrow будет депонировать необходимые денежные средства в качестве незаинтересованной стороны и осуществлять перевод только при выполнении заранее установленных условий.

К общим проблемам существующих площадок можно также отнести отсутствие адекватного механизма обеспечения безопасности на существующих порталах. Добросовестность участников почти никак не подтверждается, вся ответственность по какой-либо проверке лежит на самих пользователях. Приведенные примеры рекомендаций порталов по проверке надежности и случаи мошенничества это подтверждают. Привлечение к работе бизнес-ассоциаций и активное взаимодействие с ними позволит не только устанавливать реальность существования и добросовестность компаний-участников, а также качество их продукции, но и привлекать к участию новые предприятия, заинтересованные в развитии экспортно-импортных отношений и продвижении своей продукции. На настоящем этапе исследования уже установлены контакты с некоторыми российскими и американскими ассоциациями. Идея была с большим энтузиазмом поддержана руководителями Российской ассоциации микроэлектромеханических систем, Ассоциации производителей электронной аппаратуры и приборов, Российской ассоциации литейщиков. Некоторые ассоциации сразу предложили анонсы своей продукции, готовой на экспорт, которые были переправлены американским экспертам. В настоящее время ведётся обсуждение проекта с другими российскими ассоциациями.

Руководители американских ассоциаций довольно сдержаны в своих оценках проекта. Например, руководители Американской ассоциации импортёров и экспортёров, Американской промышленной ассоциации считают, что надо посмотреть, как это будет реализовано на практике, насколько будет обеспечена безопасность. По мнению американских экспертов, которые участвуют в этом проекте (представители ассоциации SCORE), это нормальная реакция американцев на первое предложение, поскольку еще не вполне ясна концепция, нет доверия к российской стороне. Американские ассоциации традиционно очень осторожны, поскольку опасаются навредить своим клиентам. Всё это необходимо

преодолевать, разъясняя с участием американских экспертов, задействованных в проекте, сущность идеи, безопасность проекта, выгоды ассоциаций и компаний. Опыт показывает, что без работы американских экспертов, убеждающих руководителей американских ассоциаций в безопасности и выгодности проекта, привлечь их в проект практически не представляется возможным. Данная работа ведется американскими экспертами в настоящее время с использованием информации о российских ассоциациях и их анонсов конкретной продукции.

Кроме этого, идёт работа по созданию портала. Проанализированы существующие площадки на предмет технического решения, разработано техническое задание. Объем работы весьма существенен, в веб-программировании задействована группа специалистов, необходима обработка значительных массивов информации, создание баз данных, внедрение инновационных технологий и т.д.

Таким образом, в настоящее время ведется комплексное исследование по нескольким направлениям: анализируется международный рынок современных B2B площадок, их сильные и слабые стороны, направления необходимых улучшений, устанавливаются контакты с российскими и американскими ассоциациями, ведется анкетирование и опрос целевой аудитории, исследуются группы востребованной продукции, наконец, разрабатывается сам портал и прорабатываются возможности внедрения необходимых инновационных решений (организация escrow сервиса, обеспечение необходимого документооборота и внедрение цифровых подписей, привлечение сторонних организаций, оказывающих дополнительные услуги и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные технологии и связь [Электронный ресурс] URL: http://www.itcsme.ru/content/section_r_18E821AE-A2E4-46E8-B052-4F174E8DDEDB.html (Дата обращения 05.04.14)
2. Гид покупателя [Электронный ресурс] URL: http://russian.alibaba.com/help/new_user.html#a1-1 (Дата обращения 02.04.2014)
3. Стоит ли доверять Alibaba.com? [Электронный ресурс] URL: http://scsgroup-consult.com/ru/articles/stoit_li_doveryat_alibaba_com (Дата обращения 05.04.14)
4. Import Export – free b2b website [Электронный ресурс] URL: http://www.importexportplatform.com/ (Дата обращения 05.04.14)
5. B2B Marketplace [Электронный ресурс] URL: http://b2b.tradeholding.com/ (Дата обращения 05.04.14)

6. Business Directory And Trade Leads of Manufacturers, Importers, Buyers [Электронный ресурс] URL: Go4worldbusiness.com (Дата обращения 05.04.14)
7. Top Russian B2B Marketplaces [Электронный ресурс] URL: http://www.slideshare.net/tradegalleries/top-russian-b2b-marketplaces (Дата обращения 24.02.14)
8. Rusbiz. Global E-commerce Network. Web Store & Buy/Sell Solutions [Электронный ресурс] URL: http://Rusbiz.com (Дата обращения 06.04.14)
9. Importers and Exporters Russia [Электронный ресурс] URL: http://www.import-export-russia.com/aboutus.asp (Дата обращения 06.04.14)
10. An American's friend view on B2B [Электронный ресурс] URL: http://www.tradeb2b.net/marketing/An-American-friend-views-on-B2B/ (Дата обращения 04.04.2014)
11. B2B площадки / Я.Вахитов [Электронный ресурс] URL: http://www.directorinfo.ru/Article.aspx?id=13130&iid=521 (Дата обращения 09.04.2014)
12. Информатизация бизнеса: концепции, технологии, системы / А. М. Карминский, и др. . – 2-е изд., перераб. и доп . – М. : Финансы и статистика, 2004 . – 624 с. – ISBN 5-279-02764-2 .
13. Интернет-издание о высоких технологиях C-News аналитика [Электронный ресурс] URL: http://www.cnews.ru/reviews/free/online/ (Дата обращения 04.02.2014)
14. Официальный сайт Российской Федерации в сети Интернет для размещения информации о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг [Электронный ресурс] URL: http://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html (Дата обращения 09.04.2014)
15. B2B-center [Elektronnii resurs] URL: http://B2Bcenter.ru /about/tariffs.html (Data obrashenia 04.04.2014)
16. Торговая система B2B.RU [Электронный ресурс] URL: http://B2B.ru (Дата обращения 04.04.2014)
17. ITEX - a small business community and barter network [Электронный ресурс] URL: http:// itex.com (Дата обращения 04.04.2014)

E.A.Svetlova ,V.D.Khizhniak

RESEARCH INTO DEVELOPMENT OPPORTUNITY OF INNOVATIVE STRUCTURE TO SECURE EXPORT AND IMPORT OPERATIONS BETWEEN INDUSTRIAL ENTERPRISES

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The article considers the opportunity to develop a B2B portal to secure export and import operations between industrial enterprises. Existing systems and there characteristics are analyzed. The difference between the suggested structure and existing models is shown, and innovativeness of the suggested structure is demonstrated.

Key words: export-import operations, B2B portal, internet trading, business associations.

REFERENCES

[1] Iformacionnie technologii i sviaz [Elektronnii resurs] URL: http://www.itcsme.ru/content/section_r_18E821AE-A2E4-46E8-B052-4F174E8DDEDB.html (Data obrashenia 05.04.14)
[2] Gid pokupatelia [Elektronnii resurs] URL: http://russian.alibaba.com/help/new_user.html#a1-1 (Data obrashenia 02.04.2014)
[3] Stoit li doveriat Alibaba.com? [Elektronnii resurs] URL: http://scsgroup-consult.com/ru/articles/stoit_li_doveryat_alibaba_com (Data obrashenia 05.04.14)
[4] Import Export – free b2b website [Elektronnii resurs] URL: http://www.importexportplatform.com/ (Data obrashenia 05.04.14)
[5] B2b Marketplace [Elektronnii resurs] URL: http://b2b.tradeholding.com/ (Data obrashenia 05.04.14)
[6] Business Directory And Trade Leads of Manufacturers, Importers, Buyers [Elektronnii resurs] URL: Go4worldbusiness.com (Data obrashenia 05.04.14)
[7] Top Russian B2B Marketplaces [Elektronnii resurs] URL: http://www.slideshare.net/tradegalleries/top-russian-b2b-marketplaces (Data obrashenia 24.02.14)
[8] Rusbiz. Global E-commerce Network. Web Store & Buy/Sell Solutions [Elektronnii resurs] URL: http://Rusbiz.com (Data obrashenia 06.04.14)
[9] Importers and Exporters Russia [Elektronnii resurs] URL: http://www.import-export-russia.com/aboutus.asp (Data obrashenia 06.04.14)
[10] An American's friend view on B2B [Elektronnii resurs] URL: http://www.tradeb2b.net/marketing/An-American-friend-views-on-B2B/ (Data obrashenia 04.04.2014)
[11] B2B ploshadki / Y.Vahitov [Elektronnii resurs] URL: http://www.directorinfo.ru/Article.aspx?id=13130&iid=521 (Data obrashenia 09.04.2014)

[12] Informatizacia biznesa: koncepcii, tehnologii, sistemi / A.M.Karminskiy i dr. – 2-e izd., pererab. i dop . – M. : Finansi i statistika, 2004 . – 624 p. – ISBN 5-279-02764-2 .
[13] Internet-izdani o visokih tehnologiah C-News analitika [Elektronnii resurs] URL: http://www.cnews.ru/reviews/free/online/ (Data obrashenia 04.02.2014)
[14] Oficialnii sait RF v seti Internet dlia razmeshenia informacii o razmeshenii zakazov na postavki tovarov, vipolnenie rabot, okazanie uslug [Elektronnii resurs] URL: http://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html (Data obrashenia 09.04.2014)
[15] B2B-center – edinaia sistema elektronnoi torgovli [Elektronnii resurs] URL: http://B2Bcenter.ru (Data obrashenia 04.04.2014)
[16] Torgovaia sistema B2B.RU [Elektronnii resurs] URL: http://B2B.ru (Data obrashenia 04.04.2014)
[17] ITEX - a small business community and barter network [Elektronnii resurs] URL: http:// itex.com (Data obrashenia 04.04.2014)

УДК 62-115

М.Х. Седлер[1], Е.А. Карабасов[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КОНТРОЛЯ ТРУБ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ УСТАНОВКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

[1]Михаил Хаимович Седлер, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: robototech@mail.ru

[2] Евгений Андреевич Карабасов, студент магистр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: starmanssystems@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы повышения качества контроля труб нефтяного назначения. Для этого проведен анализ существующих методов неразрушающего контроля. Разработана методика проведения ультразвукового контроля эхо-импульсным методом путем ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля водо-иммерсионным способом. Разработана конструкция акустического блока и механизма позиционирования, обеспечивающего стабильный акустический контакт с трубой. Разработана установка, обеспечивающая проведение автоматизированного сплошного контроля труб с требуемой производительностью.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвук, автоматизация контроля, трубы, производительность.

Введение

Российская Федерация - страна с сетью трубопроводов различного назначения огромной протяженности. Важность трубопроводов для экономики государства нельзя недооценивать. Этим и обусловлено огромное внимание, уделяемое разработкам технологий по диагностике и поддержанию трубопроводов в работоспособном состоянии.

Для повышения качества контроля труб нефтяного назначения разработана установка автоматизированного ультразвукового контроля, осуществляемого на трубных базах до ввода труб в эксплуатацию. Выбор данного направления обусловлен тем, что нефтяная промышленность России яв-

ляется базисом для развития современной экономики, а трубопроводы, состоящие из труб нефтяного назначения, – неотъемлемой частью отрасли.

В настоящее время в цехах по подготовке к ремонту и эксплуатации труб различного назначения осуществляются визуальный контроль трубы и гидравлические испытания. Однако, как показывает практика, данные методы контроля не позволяют выявлять все виды дефектов, возникающих в теле трубы. В связи с этим принято решение о необходимости разработки и внедрения установки для проведения неразрушающего контроля труб методом, обеспечивающим выявление наиболее опасных видов дефектов труб в автоматическом режиме.

Разработка установки автоматизированного ультразвукового контроля труб

Неразрушающий контроль (поиск дефектов в материале изделия) труб будет производиться ультразвуковым методом, то есть путем излучения и принятия отраженных ультразвуковых колебаний и последующего анализа их амплитуды, времени прихода, формы и пр. с помощью специального оборудования — ультразвукового дефектоскопа [2].

Выбор данного метода обусловлен наличием ряда преимуществ:

1 Ультразвуковые волны реагируют непосредственно на причину нарушения прочности. Другие методы неразрушающего контроля реагируют на дефекты косвенно. Сам факт распространения ультразвуковой волны основан на упругих связях в контролируемом объекте. Дефекты нарушают эти связи, понижая прочность изделия, и вызывают отражение УЗ волны, что и регистрируется специальными приборами. Таким образом, ультразвуковым методом можно выявить мельчайшие дефекты (трещины раскрытием $10^{-5}..10^{-4}$м) [6].

2 Возможность автоматизации.

3 Возможность контроля изделий из различных материалов.

4 Возможность выявления как внутренних, так и поверхностных дефектов.

5 Безопасность для дефектоскописта.

6 Сравнительно небольшие затраты на проведения контроля.

Ультразвуковые волны отражаются от мельчайших воздушных зазоров. Поэтому чтобы ввести их в объект контроля, необходимо принимать меры для обеспечения стабильного акустического контакта в процессе контроля.

В разработанной установке ультразвуковые колебания вводятся в объект контроля иммерсионным способом. Данный способ подразумевает наличие между преобразователем и объектом контроля толстого слоя жидкости, толщина которого превышает длину волны во много раз. В данном случае используется одна из разновидностей иммерсионного способа – ввод ультразвуковых колебаний через струю воды – струйный контакт.

Иммерсионный способ ввода ультразвука обеспечивает меньшую чувствительность акустической системы. Однако при таком методе обеспечения акустического контакта отсутствует износ датчиков от трения о поверхность трубы, что немаловажнов условиях потокового высокопроизводительного контроля [6].

Из существующих методов ультразвукового контроля наибольшее применение при контроле труб нашел эхо-импульсный метод. Данный метод позволяет установить наличие несплошностей, дефектов на наружной и внутренней поверхностях и проводить измерение остаточной толщины стенок с целью оценки совокупного износа. Аппаратным обеспечением методики проведения контроля занимаются специализированные фирмы. В ходе анализа рынка ультразвуковых дефектоскопических систем промышленного назначения принято решение использовать сертифицированный многоканальный дефектоскоп«Фазус-2008». Данный дефектоскоп позволит осуществлять контроль одновременно по нескольким каналам. По добный подход необходим для сокращения общего времени проведения контроля и, как следствие, повышение производительности установки.

Для обеспечения всех необходимых условий проведения ультразвукового контроля труб эхо-импульсным методом разработана установка, включающая в себя ультразвуковые блоки или сборки датчиков, механизмы позиционирования ультразвуковых блоков на поверхности трубы, транспортная система, обеспечивающая необходимые перемещения ультразвуковых блоков и система водообеспечения.

Общий вид разработанной установки представлен на рис. 1.

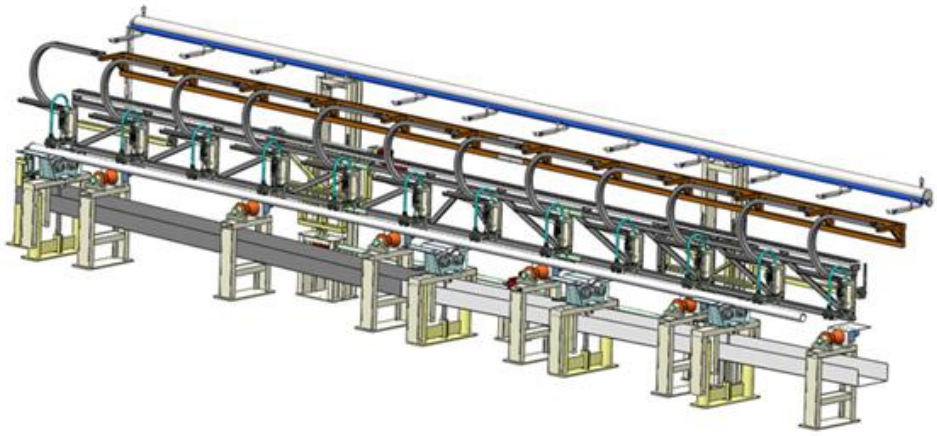


Рис. 1. Установка автоматизированного ультразвукового контроля

Проведение контроля трубы будет осуществляться несколькими сборками датчиков (пьезоэлектрических преобразователей), перемещаемых вдоль оси вращающейся трубы.Для обеспечения заданной производительности контроля принято решение разделить зону контроля на 12 участков протяженностью 1100 мм (длина новой обсадной трубы составляет от 11 до 13 м) и контролировать каждый участок своим ультразвуковым блоком. Таким образом, каждую сборку датчиков необходимо перемещать на рас-

стояние от ее исходной позиции до исходной позиции соседней сборки. Затем полученные показания по участкам «сшиваются» в общую дефектограмму.

Ультразвуковой блок является центральной частью системы контроля и предназначен для установки в него пьезоэлектрических преобразователей (датчиков). В блок входят центральный прямой толщинометрический датчик для измерения остаточной толщины стенки трубы и наклонные датчики для поиска дефектов в теле трубы.

Ультразвуковой блок представлен на рис. 2.

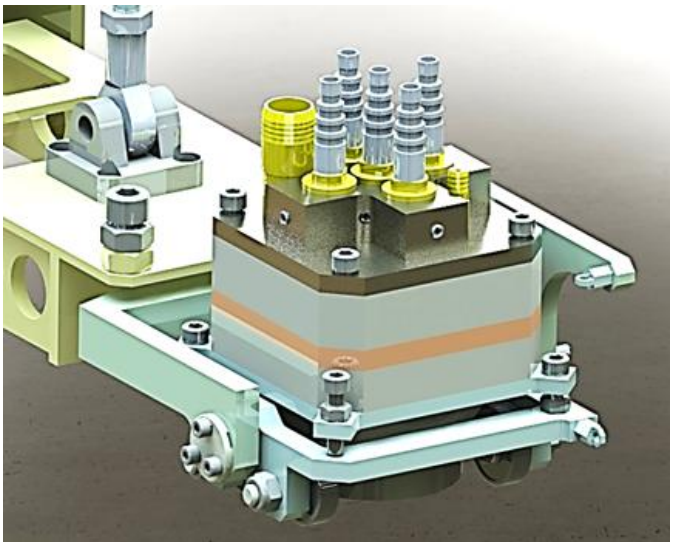


Рис. 2. Ультразвуковой блок

Для позиционирования ультразвукового блока на поверхности объекта контроля используется специально разработанный механизм [9]. Для получения четкого акустического сигнала максимальной амплитуды необходимо выставить ультразвуковой блок по нормали к сканируемой поверхности. Для этого механизм позиционирования должен отслеживать возможные неровности поверхности трубы. Происходит это за счет вращения его составных частей относительно осей АА, ББ, ВВ.

Подъем ультразвукового блока над поверхностью трубы (перевод в положение ожидания), а также опускание на трубу, т.е. перевод в положение для контроля, осуществляется за счет пневмоцилиндра, системы рычагов и шарниров [4].

В ультразвуковой блок через установленный на нем штуцер в процессе контроля непрерывно подается вода. Струя воды, проходя ультразвуковой блок, формирует стабильный ламинарный поток, из которого с помощью специальных средств удаляются пузыри воздуха. Механизм позиционирования ультразвукового блока представлен на рис. 3.

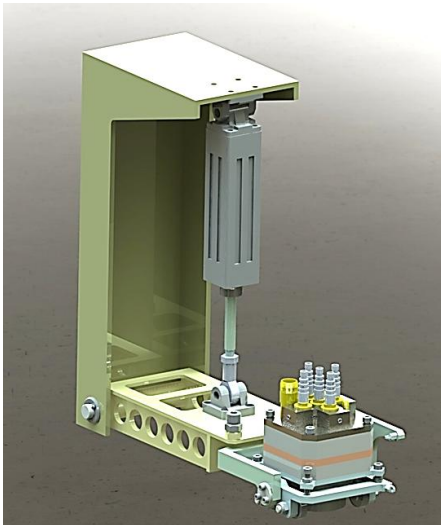


Рис. 3. Механизм позиционирования ультразвукового блок

Заключение

Разработанная автоматизированная установка обеспечивает сплошной контроль труб со скоростью, позволяющей встраивать установку в существующие транспортные линии без снижения общей производительности цеха.

Применяемый метод контроля позволит выявлять наиболее опасные типы дефектов, возникающие в теле трубы.

Предъявление претензий поставщику на основании дефектограмм, полученных с помощью установки, не прошедшей обязательную сертификацию не представляется возможным. Поэтому данная установка является автоматизированным высокопроизводительным сигнализатором дефектов.

По результатам полученной дефектограммы принимается решение об отбраковке трубы. Труба отправляется на браковочный стеллаж, после чего специалист, обладающий соответствующей квалификацией, при помощи ручного сертифицированного прибора, проводит повторное сканирование участков трубы, на которых предполагается наличие дефекта. В случае подтверждения, оформляется соответствующий акт, и труба отправляется на рекламацию.

Общецеховая система неразрушающего контроля труб в составе участка визуального контроля, участка проведения гидравлических испытаний и участка УЗК позволит осуществлять высокопроизводительный сплошной контроль труб и выявлять все свойственные данному типу труб дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 632-820. Трубы обсадные и муфты к ним.
2. ГОСТ 17410-78. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические.

3. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.
4. В.И. Анурьев. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1.-.5-е изд., перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1978 – 728с.: ил.
5. В.И. Анухин. Допуски и посадки. Выбор и расчет, указание на чертежах: Учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 219 с.
7 Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. Ультразвуковой контроль материалов. / пер. с немецкого Е.К. Бухмана и Л.С. Зенковой под ред. проф., докт. техн. наук В.Н. Волченко – Москва: «Металлургия», 1991.
8 М.Х. Седлер, М.И. Седлер Разработка робота для проведения диагностических работ внутри трубопроводов сложных конфигураций// Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й международной научно-практической конференции. – Спб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. С. 238-247.
9 П.И. Орлов. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах. Кн.1. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977.623 стр. с ил.
10 П.И. Орлов. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах. Кн.3. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977.360 стр. с ил.
11 С.Н. Кожевников, Я.И. Ясипенко, Я.М. Раскин. Механизмы. Справочник. Изд. 4-е, перераб. и доп. Под ред. С.Н. Кожевникова М., «Машиностроение», 1976. 784 с. с илл.
12 Ю.В. Ланге, В.А. Воронков. «Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник». Издание второе, исправленное – М.: Авторское издание, 2003.-120с.: ил.16.

M.Kh. Sedler, E.A. Karabasov

IMPROVING OF THE TUBE CONTROL QUALITY ON THE BASIS OF DESIGNING OF THE AUTOMATED ULTRASONIC CONTROL MODULE

St.Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

Within the scope of this publication, questions of improving the tube control quality with respect to the oil specific are considered. For this reason analysis of existing non-destructive testing methods was carried out. Methodology of the carrying out of the ultrasonic control on the basis of pulse-echo technique is developed, owing to entering ultrasonic vibrations into the control object due to

the hydro-immersion method. The construction of the acoustic module and positioning mechanism, which are providing the stable acoustic contact with the tube, are developed. The module, providing carrying out of the automated one-hundred-percent screening tube with necessary productivity is developed.

Keywords: non-destructive examination, ultrasonic, control automation, grief pipes, productivity.

REFERENCES

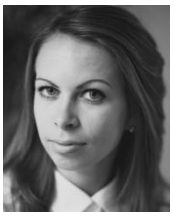
[1] GOST 632-820. Truby obsadnye i mufty k nim (rus).
[2] GOST 17410-78. Kontrol nerazrushajushchy. Truby metallicheskie besshovnye tsilindricheskie (rus).
[3] GOST 23829-85. Kontrol nerazrushajushchy akusticheskiy. Terminy i opredeleniya (rus).
[4] V.I. Anurev. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: V 3-h t. T.1.-.5-e izd., pererab. i dop.-M.: Mashinostroenie, 1978 – 728p.: il (rus).
[5] V.I. Anuhin. Dopuski i posadki. Vybor i raschet, ukazanie na chertezhah: Ucheb. posob. 2-e izd., pererab. i dop. SPb.: Izd-vo SPbGTU, 2001. 219 p (rus).
[6] Y. Krautkremer, G. Krautkremer. Ultrazvukovoy kontrol materialov. / per. s nemetskogo E.K. Buhmana i L.S. Zenkovoy pod red. prof., dokt. tehn. nauk V.N. Volchenko – Moscow: «Metallurgiya», 1991 (rus).
[7] M.Kh. Sedler, M.I. Sedler Razrabotka robota dlya provedeniya diagnosticheskikh rabot vnutri truboprovodov slozhnykh konfiguraciy// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3-y mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Spb.: Izd-vo Politehn.un-ta, 2013. p. 238-247 (rus).
[8] P.I. Orlov. Osnovy konstruirovaniya. Spravochno-metodicheskoe posobie v 3-h knigakh. Kn.1. Izd. 2-e, pererab. i dop. M., «Mashinostroenie», 1977.623 p. s il (rus).
[9] P.I. Orlov. Osnovy konstruirovaniya. Spravochno-metodicheskoe posobie v 3-h knigah. Kn.3. Izd. 2-e, pererab. i dop. M., «Mashinostroenie», 1977.360 p. s il (rus).
[10] S.N. Kozhevnikov, Ya.I. Yasipenko, Ya.M. Raskin. Mekhanizmy. Spravochnik. Izd. 4-e, pererab. i dop. Pod red. S.N. Kozhevnikova M., «Mashinostroenie», 1976. 784 p. s ill (rus).
[11] Yu.V. Lange, V.A. Voronkov. «Kontrol nerazrushayushchiy akusticheskiy. Terminy i opredeleniya. Spravochnik». Izdanie vtoroe, ispravlennoe – M.: Avtorskoe izdanie, 2003.-120 p.: il.16 (rus).

УДК 378.046.4

М.Х. Седлер[1], А.В. Мосалова[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО НА ПРЕДПРИЯТИЯХ, ЗАНИМАЮЩИХСЯ СОЗДАНИЕМ НЕСТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]Михаил Хаимович Седлер, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: robototech@mail.ru



[2]Анна Владимировна Мосалова, ассистент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: mosalova_anna@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы оценки квалификации инженеров-конструкторов. Описан способ оценки – проведение тестирования. Рассматривается процедура подготовки к тестированию, методы оценки результатов. Особое внимание уделено специфике разработки тестов для различных групп конструкторов.

Ключевые слова: аттестация, тест, квалификация, оценка, технические науки, творческие способности, навыки конструирования, мотивация.

Любое предприятие, занимающееся производством нестандартного и уникального оборудования, обязательно должно иметь в своей структуре конструкторское бюро, которое занимается разработкой этого оборудования. Поскольку каждый заказ на оборудование уникален, разработка включает все необходимые этапы: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочую документацию. Качество производимого на предприятии оборудования, а значит его конкурентоспособность на рынке, в большой степени определяется качеством конструкторской разработки. Качество же этой разработки зависит, в свою очередь, от квалификации конструкторов и от того, как организована работа конструкторского бюро.

Формирование штата конструкторского бюро зачастую происходит не по заранее составленному плану, а, в большой степени, случайным обра-

зом. Сотрудников набирают в разное время по мере надобности (в связи с получением предприятием заказов), недостаточно учитывается профиль их образования, квалификация, опыт работы. В результате штат конструкторского бюро не является оптимальным с точки зрения проведения высококачественных конструкторских разработок. Учитывая дефицитность профессии конструктора в настоящее время, отрицательное влияние текучести кадров на качество разработок и желание иметь стабильный сработавшийся коллектив, нецелесообразно постоянно менять работников в надежде найти более квалифицированных. Лучшим решением является повышение качества работы конструкторского бюро с работающими в нем инженерами. Разумеется, этот подход не исключает как прием на работу новых высококвалифицированных сотрудников, так и увольнение тех, кто систематически не справляется с работой. Но основное внимание уделяется постоянному улучшению работы существующего коллектива.

Каким же образом достигается это улучшение. Чтобы улучшить некий процесс, необходимо, прежде всего, оценить его состояние в настоящее время, а затем предпринять действия, направленные на его улучшение. Таким образом, задача повышения качества работы конструкторского бюро состоит из двух этапов: первый этап – аттестация сотрудников (оценка существующей ситуации), второй этап – повышение квалификации сотрудников и установление более рационального взаимодействия между ними (улучшение существующей ситуации).

Рассмотрим первый этап – аттестацию сотрудников. Необходимо разработать программу аттестации. Вначале надо разделить сотрудников конструкторского бюро на группы в соответствии с их квалификацией. Как правило, бюро состоит из двух групп конструкторов: ведущие конструкторы, занимающиеся разработкой оборудования в целом и принимающие основные технические решения, и исполнители, разрабатывающие отдельные узлы и детали оборудования. Эти две группы обычно не равны друг другу по численности. Соотношение их численностей зависит от типа разрабатываемого оборудования, количества направлений в бюро и колеблется в пределах от 1:2 до 1:4. Квалификация и выполняемые функции конструкторов этих групп существенно отличаются друг от друга. Поэтому и программы аттестации их различны. Для каждой группы разрабатывается своя программа аттестации, учитывающая как круг вопросов, так и уровень их сложности.

Далее, следует учесть специфику отрасли, в которой работает предприятие. Это необходимо, чтобы задаваемые при аттестации вопросы наилучшим образом соответствовали текущей работе конструкторов предприятия. Так, при аттестации конструкторского бюро, занимающегося разработкой подъемно-транспортного оборудования, следует уделить внимание вопросам, касающимся крановых металлоконструкций, тросовых передач,

расчетам грузоподъемности и т.п. При аттестации же бюро, разрабатывающего металлорежущие станки, проверяются знания в области технологии машиностроения, режущего инструмента, приводов, расчетов режимов и точности обработки.

Чтобы аттестационный тест наиболее полно отражал все стороны работы конструкторов, при его составлении целесообразно предусмотреть три раздела: вопросы на теоретические знания, задания на практические навыки, задачи на проявление творческих способностей. Следует учесть, что, если при аттестации конструкторов-исполнителей упор следует делать на первые два раздела, то при аттестации ведущих конструкторов большее внимания стоит уделить третьему разделу.

Важным вопросом при подготовке аттестации является также формирование экспертной группы, т.е. группы лиц, проводящих аттестацию и оценивающих ее результаты. Здесь нужно соблюдать три принципа: компетентность, объективность, различие опыта. Принцип компетентности означает, что эксперты должны быть, во-первых, специалистами в области конструирования, а во-вторых, они должны иметь опыт в сфере оценки знаний и навыков. Принцип объективности предполагает то, что эксперты не выбираются из числа сотрудников предприятия, где проводится аттестация. Это должны быть представители сторонней организации. Только в этом случае оценка будет объективной, так как эксперты не связаны производственными или иными отношениями ни с аттестуемыми, ни с их руководителями. Принцип различия опыта говорит о том, что в группе экспертов должны присутствовать как специалисты с большим опытом работы, так и начинающие работники, возможно, молодые специалисты. Такой подбор экспертной группы дает возможность взглянуть на результаты аттестации с двух сторон. Наилучшим образом трем вышеописанным принципам соответствует экспертная группа, составленная из сотрудников технических институтов университетов. У них имеются и знания в области техники, и опыт контроля и оценки знаний. Кроме того, на кафедрах работают как сотрудники с большим опытом, так и молодые специалисты, аспиранты, вчерашние студенты, у которых еще свежи воспоминания о зачетах и экзаменах, во многом похожих на аттестацию.

Таким образом, подготовка к аттестации состоит из следующих трех этапов: формирование экспертной группы, изучение структуры конструкторского бюро и разделение конструкторов на группы, изучение сферы деятельности предприятия и определение круга вопросов, задаваемых при аттестации. После проведения такой подготовки составляется программа аттестации. Целесообразно включить в программу два раздела: письменный тест и устную беседу.

Рассмотрим проведение аттестации сотрудников конструкторского бюро на примере предприятия, занимающегося разработкой и изготовле-

нием оборудования для пищевой промышленности. Аттестация проводилась преподавателями университета. Конструкторское бюро состоит из 24 человек: 8 ведущих конструкторов и 16 исполнителей. Эти конструктора разделаны на рабочие группы, каждая из которых занимается разработкой определенного типа оборудования. На предприятии имеется свое производство, где изготавливается спроектированное оборудование. Оборудование предназначено для выполнения таких операций, как розлив, дозирование, пакетирование. Руководство предприятия обратилось в университет с просьбой о проведении аттестации. Следует отметить, что такие запросы от предприятий стали все чаще появляться в настоящее время. Это и понятно. Возрастающая конкуренция на рынке оборудования требует постоянного повышения качества выпускаемых машин, что невозможно без высококвалифицированных разработчиков. Само же предприятие не может провести аттестацию: мешает загруженность текущей работой, отсутствие опыта в подобных мероприятиях, возможная необъективность.

Экспертная группа, состоящая из двух человек (преподавателя, имеющего большой опыт преподавательской и конструкторской работы, и молодого преподавателя), начала подготовку к аттестации. Прежде всего была изучена область деятельности предприятия, специфика выпускаемого оборудования, используемые материалы и комплектующие изделия. Затем конструкторов разделили на две группы: исполнители и ведущие конструктора. Здесь, разумеется, эксперты не смогли обойтись без помощи руководителей предприятия и начальника конструкторского бюро.

Так как аттестация проводилась для двух разных групп тестируемых, то следует более подробно рассмотреть структуру аттестационных тестов и их различия между собой.

Учитывая сферу деятельности предприятия, аттестационный тест для инженеров-исполнителей был составлен из трех частей. В первой части теста задавались вопросы, касающиеся базовых конструкторских знаний. Во второй части тестируемым предлагались задачи на владение практическими навыками конструирования и задачи, направленные на выявление творческих способностей. Все три части теста предполагали письменные ответы. При этом вторая часть теста, после написания, включала в себя устную беседу по содержанию написанного и, как следствие, дополнительные вопросы, если это было необходимо. В третьей части тестируемым предлагается дать себе оценку, как конструкторам. Далее рассмотрим тест более подробно.

- Первая часть теста включает в себя 60 вопросов. Вопросы могут быть 3-х типов. Вариантов ответов на вопросы 1-го типа (а, б, в и т.п.) может быть более одного. Вопросы второго типа требуют краткого ответа. Вопросы 3-го типа (задачи, схемы, рисунки и т.п.) требуют развернутого ответа. Тест состоит из нескольких разделов: базовые знания в таких областях как материаловедение [1], основы технологии машиностроения [2],

конструирование деталей машин [3], электротехника [4] и автоматизация производства [5], а также навыки основных расчетов в машиностроении и способность ориентироваться в комплектующих изделиях и в смежных областях, таких как пневматика [6] и гидравлика [6]. Время для ответов на все вопросы – 2 часа. Пользование информационными источниками и переговоры на тесте не допускаются.

- Вторая часть теста состоит из двух частей: конструкторской (2 задачи) и творческой (2 задачи). Конструкторская часть состоит из двух заданий. Первое: дается чертеж, на котором необходимо проставить допуски и посадки [2]. Второе: чертеж, по которому нужно ответь на 10 вопросов по конструкции [3]. Творческая часть состоит из двух задач, которые рассчитаны на проявление творческих способностей тестируемых. Время для ответов на все вопросы – 1 час. Пользование информационными источниками и переговоры на тесте не допускаются.
- Третья часть заключается в самооценке. Тестируемому предлагается ответить на 5 вопросов, касающихся оценки человеком своих профессиональных качеств, имеющихся знаний, возможного недостатка знаний в некоторых областях, а также объяснить свою мотивацию к работе конструктора. Время для ответа на вопросы 15 минут.

Теперь рассмотрим тест для ведущих конструкторов. Он состоит из двух частей. Первая часть посвящена проверке имеющихся знаний в письменном виде. При этом, в отличии от теста для исполнителей, здесь контролируются не базовые конструкторские знания, а более глубокие и специальные знания, касающиеся разрабатываемого на предприятии оборудования.

Вторая часть теста проходит в форме беседы, в ходе которой выявляется способность тестируемого выполнять работу ведущего конструктора. Следует отметить, что в тесте для ведущих инженеров большее внимание уделяется второй части. Рассмотрим более подробно тест.

- Первая часть теста включает в себя 10 вопросов, ответы на которые должны включать описания, и, если необходимо, поясняющие схемы и рисунки. Также тест содержит 2 задачи, которые направлены на проявление творческих способностей тестируемых. Вопросы теста ориентированы на знаниях в конкретной области инженерии, а именно пищевой промышленности: используемые материалы, знания в области транспортирования и дозирования [6]. Кроме того в тест включены вопросы на знания о современных комплектующих изделиях [6], о возможных видах брака и способах его устранения, знания конкурентной среды, включая понимание достоинств и недостатков своего оборудования по сравнению с оборудованием конкурентов. В заключении предлагается описать свою работу, как ведущего конструктора, с организационной точки зрения. Время для ответов на все вопросы – 1 час. Пользование информационными источниками

и переговоры на тесте не допускаются.

- Вторая часть теста происходит в виде устной беседы и состоит из трех разделов. В первом разделе тестируемому выдается 3D-модель комплектующего изделия из области пневматики [6] или гидравлики [6]. Требуется максимально полно описать это изделие: определить, что изображено на рисунке, назвать основные части конструкции, описать принцип действия и сказать, где применяется изделие. Во втором разделе тестируемому предлагается ответить на вопросы конструкторского характера по предлагаемому чертежу, включающие вопросы на знания приводов [4], [6] основных деталей машин [3], а также технологии изготовления деталей [2]. Третий раздел посвящен устной беседе по ранее написанной первой части. На проведение беседы по второй части тестирование отводится 15-20 минут.

Проведенная аттестация показала уровень квалификации инженеров конструкторского бюро, выявила пробелы в некоторых областях профессиональных знаний, недостаточную техническую эрудицию, слабую мотивацию у некоторых сотрудников к получению новых знаний и решению творческих задач. В то же время, у некоторых инженеров-исполнителей была отмечена высокая квалификация и способность в ближайшее время выполнять функции ведущего конструктора.

После проведения аттестации и подведения ее итогов на предприятии было проведено совещание с участием экспертов и руководителей компании, на котором были обсуждены результаты аттестации и намечены пути повышения квалификации инженеров конструкторского бюро. Здесь также необходим дифференцированный подход и применение различных форм повышения квалификации: от занятий по основам конструирования для молодых специалистов до проведения мозговых штурмов по сложным нерешенным задачам конструкторского бюро для ведущих инженеров. В дальнейшем авторы предполагают заняться разработкой таких методик и программ повышения квалификации инженеров-конструкторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Машиностроение, 1986, 384 с.

2 Анухин, В. И. Допуски и посадки: [учебное пособие для студентов высш. учеб. заведений] / В. И. Анухин .— 4-е изд. — Санкт-Петербург [и др.]: Питер, 2008 .— 207 с.

3 Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. — 12-е изд. — М.: Издательский центр «Академия», 2009. — 496 с.

4 Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники: учеб. пособие для вузов / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов .— Изд. 7-е, перераб. и доп. — Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2012 .— 735 с.
5 Клюкин, В. Ю. Оборудование автоматизированных производств: Лаб. практикум.— СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997 .— 69 с.
6 Клюкин В. Ю. Пневмогидропривод и автоматика: учеб. пособие для вузов / В. Ю.Клюкин, В. С. Харитонов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.
7 Синеокова И.А. Системы дозирования сыпучих продуктов массой до двух грамм / И.А. Синеокова, О.В. Зорина, В.Л. Жавнер // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции, 5-10 декабря 2011 года / СПб., 2011.- С.7
8 Букреев, В. В. Об организации обучения студентов и переподготовки специалистов для Санкт-Петербургского автомобильного кластера / В. В. Букреев, В. Ю. Клюкин, М. М. Радкевич // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции, 20 - 21 июня 2013 года / [под ред.: М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова].— Санкт-Петербург, 2013.— С. 65-68.
9 Чепарухин, В.В. (1938-2012) . Историко-научная составляющая профессиональной культуры специалистов / В.В. Чепарухин // Формирование профессиональной культуры специалистов XXI века в техническом университете: Труды междунар. науч.-практ.конф. 27-29 марта 2001 г. / Санкт-Петербург, 2001.— С. 100-103.
10 Паршин, Л.К.. О двухуровневом образовании / Л. К. Паршин // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции, 20 - 21 июня 2013 года / [под ред.: М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова].— Санкт-Петербург, 2013 .— С. 153-156.

M.Kh. Sedler, A.V. Mosalova

IMPROVEMENT OF QUALITY OF WORK OF DESIGN OFFICE AT THE ENTERPRISES WHICH ARE ENGAGED IN CREATION OF THE NON-STANDARD EQUIPMENT

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

Within this article an assessment of design engineers qualifications are discussed. The method of an assessment, which is a carrying out of testing, is described. Procedure of a preparation for testing and methods of an assessment of results are considered. The special attention is paid to the specific of tests development for various groups of design engineers.

Keywords: certification, test, qualification, assessment, technical sciences, creative abilities, designing skills, motivation.

REFERENCES

[1] Materialovedenie: Uchebnik dlia vysshih tehnicheskich uchebnyh zavedenii. B.N. Arzamasov, I.I. Sidorin, G.F. Kosolapov i dr.; pod obsch. red. B.N. Arzomasova. – 2nd izd., ispr. i dop. - M.:Mashinostroenie, 1986, 384 p. (rus.)

[2] Anuhin, V. I. Dopuski i posadki: [uchebnoe posobie dlya studentov vyissh. ucheb. zavedeniy] / V. I. Anuhin .— 4-e izd. — Sankt-Peterburg [i dr.]: Piter, 2008 .— 207 p. (rus.)

[3] Dunaev, P. F. Konstruirovanie uzlov i detaley mashin: ucheb. posobie dlya stud. vyissh. ucheb. zavedeniy / P. F. Dunaev, O. P. Lelikov. — 12-e izd., ster. — M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2009. — 496 p. (rus.)

[4] Ivanov, I. I. Elektrotehnika i osnovyi elektroniki: ucheb. posobie dlya vuzov / I. I. Ivanov, G. I. Solovev, V. Ya. Frolov .— Izd. 7-e, pererab. i dop. — Sankt-Peterburg [i dr.]: Lan, 2012 .— 735 . (rus.)

[5] Klyukin, V. Yu. Oborudovanie avtomatizirovannyih proizvodstv: Lab. praktikum .— SPb.: Izd-vo SPbGTU, 1997 .— 69 p. (rus.)

[6] Klyukin, V. Yu. Pnevmogidroprivod i avtomatika: ucheb. posobie dlya vuzov / V. Yu., V. S. Haritonov. — SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2007.

[7] Sineokova, I. A. Sistemyi dozirovaniya syipuchih produktov massoy do dvuh gramm / I.A. Sineokova, O.V. Zorina, V.L. Zhavner // XL Nedelya nauki SPbGPU: materialyi mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 5-10 dekabrya 2011 goda / SPb., 2011.— Ch.4: Mehaniko-mashinostroitelnyiy fakultet/ [pod red. M. M. Radkevicha, M. S. Kokorina].— P.7. (rus.)

[8] Bukreev, V. V. Ob organizatsii obucheniya studentov i perepodgotovki spetsialistov dlya Sankt-Peterburgskogo avtomobilnogo klastera / V. V. Bukreev, V. Yu. Klyukin, M. M. Radkevich // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 20 - 21 iyunya 2013 goda / [pod red.: M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova].— Sankt-Peterburg, 2013 .— pp. 65-68. (rus.)

[9] Cheparuhin, V.V. (1938-2012) . Istoriko-nauchnaya sostavlyayuschaya professionalnoy kulturyi spetsialistov / V.V. Cheparuhin // Formirovanie professionalnoy kulturyi spetsialistov HHI veka v tehnicheskom universitete: Trudyi mezhdunar. nauch.-prakt.konf. 27-29 marta 2001 g. / Sankt-Peterburg, 2001.— pp. 100-103. (rus.)

[10] Parshin, L.K.. O dvuhurovnevom obrazovanii / L. K. Parshin // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 20 - 21 iyunya 2013 goda / [pod red.: M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova].— Sankt-Peterburg, 2013 .— pp. 153-156. (rus.)

УДК 651.572, 651.578, 651.58

М.И. Седлер[1], Е.И. Поплевина[2]

УЛУЧШЕНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ КОРПОРАЦИИ «ТИРА»

[1]Мария Ильинична Седлер, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru

[2]Евгения Игоревна Поплевина, инженер по стандартизации
ОАО «Российский институт мощного радиостроения»,
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (911) 276-7195, E-mail: evg-poplevina@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы улучшения процесса управления нормативной документацией корпорации «Телевизионная и радиоаппаратура» путем автоматизации процесса. Результаты показали, что вследствие автоматизации значительно сокращены временные затраты на поиск необходимой информации и ошибки, связанные с человеческим фактором.

Ключевые слова: база данных, автоматизированное приложение, нормативный документ, инвентаризация, журнал выдачи, стандарт, акт, распоряжение, карточка внедрения, учет.

Введение

Работа посвящена проблеме повышения качества процесса управления нормативной документацией (НД) в корпорации «Телевизионная и радиоаппаратура» («ТИРА»), в состав которой входят ОАО «Российский институт мощного радиостроения» («РИМР»), ОАО «Прибой» и ОАО «Мощная аппаратура радиовещания и телевидения» («МАРТ») [4]. Деятельность корпорации «ТИРА» заключается в разработке, производстве, установке и сопровождении аппаратуры и комплексов для радиосвязи, телевещания и радиовещания военного и гражданского назначения [10].

Управление нормативной документацией (НД) в корпорации «ТИРА» осуществляет отдел нормоконтроля и стандартизации (ОНС) ОАО «РИМР».

Процесс управления НД состоит из 5 этапов: планирования внедрения, заказа, принятия, внедрения и выдачи в обращение нормативных документов и инвентаризации [2], [6], [11].

На этапе планирования внедрения НД составляется план. Основанием для включения в план внедрения нормативных документов являются:

– размещение на предприятии новых работ, требующих внедрения стандартов ранее не применявшихся на предприятии;

– принятие новых (пересмотренных) стандартов, относящихся к сфере деятельности предприятия.

Форма плана внедрения НД приведена на рис. 1.

Обозначение НД	Наименование НД	Срок введения НД в действие	Директивный документ по внедрению НД	Ответственное лицо (подразделение) за внедрение НД	Примеча-ние

Рис. 1. Форма плана внедрения НД

Внедрение предусматривает выпуск распоряжения Техническим директором, рассылку по отделам, составление плана организационно - технических мероприятий (ОТМ), проведение ОТМ, заполнение карточки учета или акта внедрения нормативного документа. Распоряжения, карточки учета и акты внедрения хранятся на бумажных носителях в архиве ОНС. НД, поступившая на предприятие, регистрируется в «Журнале регистрации НД». Форма журнала приведена на рис. 2 [3].

Инв. №	Обозначение документа	Наименование документа	Дата введения в действие НД	Взамен или впервые издан	Дата внедрения	Примечание

Рис. 2. Форма журнала регистрации НД

Подтверждением внедрения нормативного документа является заполненная карточка учета или акт внедрения.

После внедрения нормативного документа, его добавляют в перечень, который ведется по форме, представленной на рис. 3.

Обозначение стандарта	Наименование стандарта	Дата		Подразделение, отвечающее за внедрение	Дата		Документ, подтверждающий внедрение
		введения	поступления		издания приказа (распоряжения)	утверждения ОТМ	
1	2	3	4	5	6	1	2

Рис. 3. Форма электронного перечня НД

Процесс инвентаризации предусматривает аннулирование утратившей силу на территории РФ НД, внедрение новых нормативных документов и внесение изменений в НД. В рамках договора на обслуживание ОНС «ВНИИМАШ» информирует ОНС об отмене, принятии или изменении НД [1].

После получения извещения об отмене нормативных документов ОНС должен определить, в каких отделах находятся их учтенные копии. Для этого сотрудники ОНС осуществляют мониторинг журналов выдачи НД, после чего рассылают извещения об отмене нормативных документов в те отделы, где обнаружены их учтенные копии.

При принятии и/или изменения НД ОНС закупает новые нормативные документы и/или изменения к ним и рассылает информационные листы о новых поступлениях в отделы. Отделы, которым требуются учтенные копии поступивших нормативных документов, подают заявки в ОНС.

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.

Создание модулей автоматизированного приложения

Приложение представляет собой два независимых модуля, работающих с базой данных Microsoft Office Access 2007. Приложение создано в среде программирования Microsoft Visual C# 2010 [5], [8]. Формы документов формируются в Microsoft Office Word 2007.

При запуске первого модуля приложения после введения пароля открывается главная форма, представленная на рис. 4 [7].

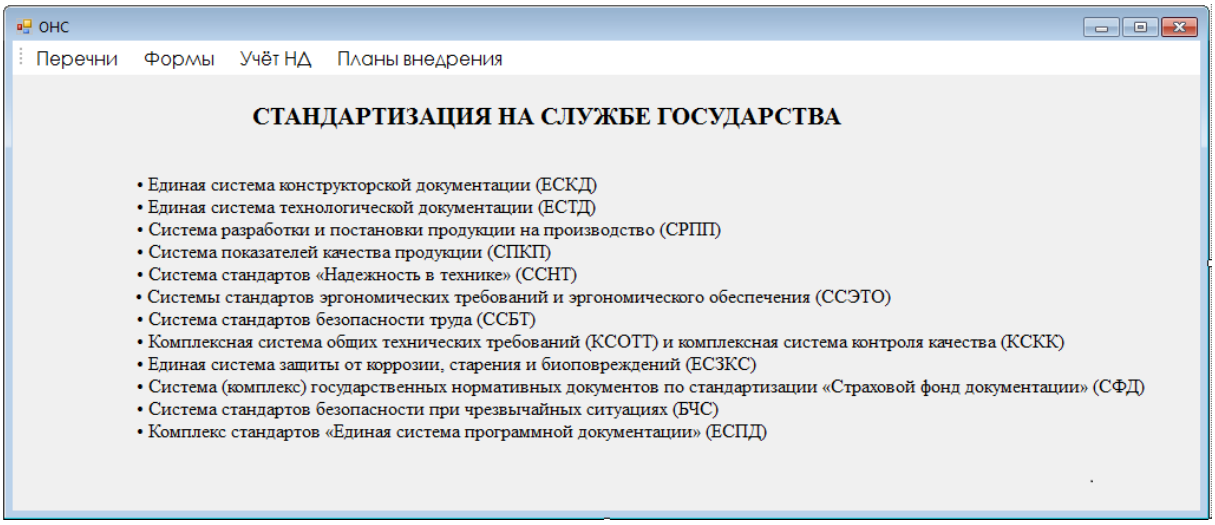


Рис. 4. Главная форма приложения

При выборе вкладки «Перечни» осуществляется переход на форму перечня НД (рис. 5). С помощью данной формы можно осуществлять поиск и открытие необходимого нормативного документа, распоряжения, акта или карточки учета его внедрения.

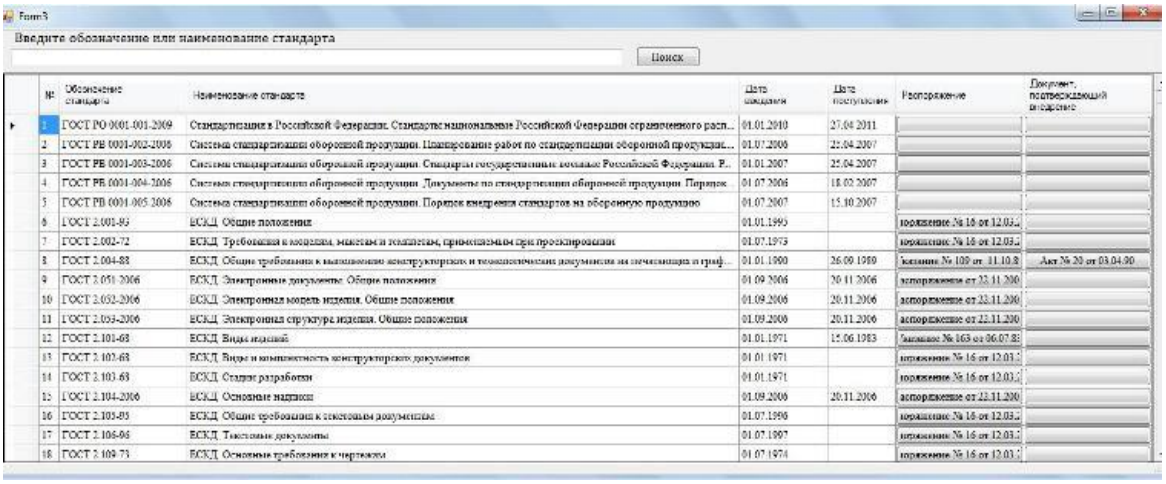


Рис. 5. Форма перечня НД

При выборе вкладки «Формы» можно сформировать новый акт, или новое распоряжение (рис. 6).

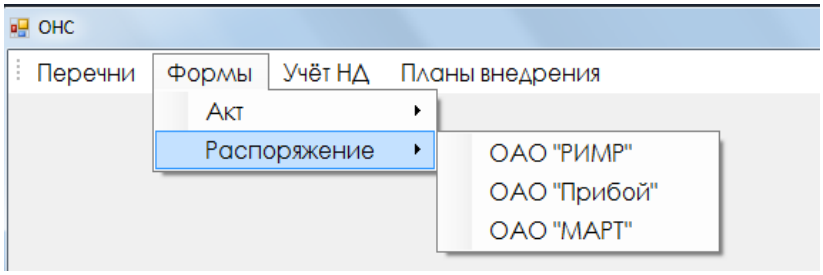


Рис. 6. Вкладка «Формы»

При выборе документа осуществляется переход на новую форму, после заполнения полей и нажатия на кнопку «Печать» формируется акт, документ Word, который сохраняется в определенной директории и выводится на печать. Форма распоряжения о введении в действие нормативного документа содержит стандартные фразы для включения в документ.

При выборе вкладки «Учет НД» осуществляется переход на форму карточки учета внедрения нормативного документа (рис. 7).

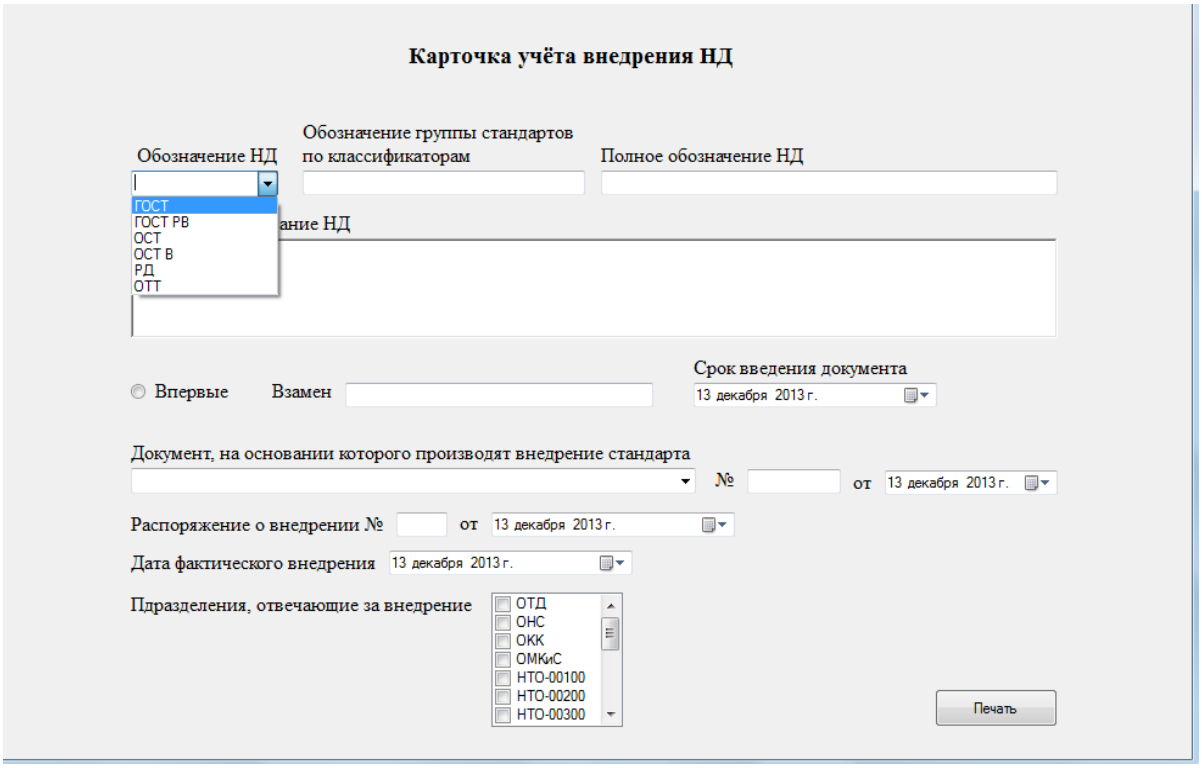


Рис. 7. Форма карточки внедрения НД

При выборе вкладки «Планы внедрения» открывается перечень планов внедрения предыдущих лет (рис. 8). На вкладке «Планы внедрения» предусмотрена кнопка «Создать план на текущий квартал», при выборе которой открывается форма плана внедрения (рис. 9).

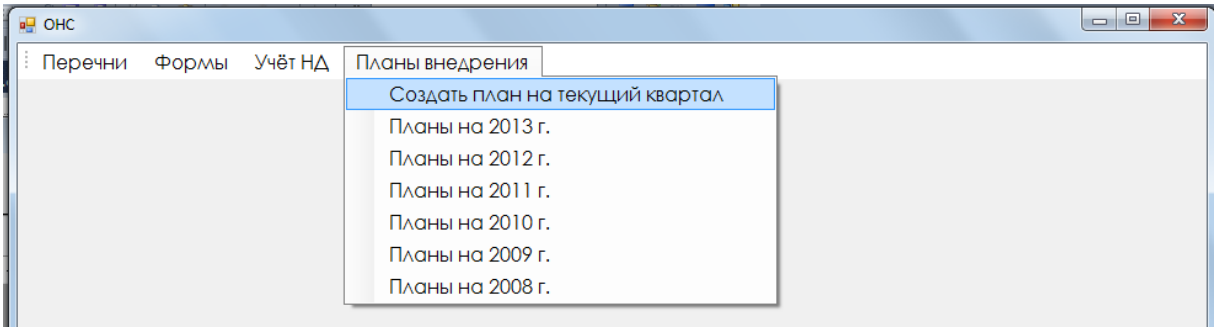


Рис. 8. Раскрывающийся список вкладки «Планы внедрения»

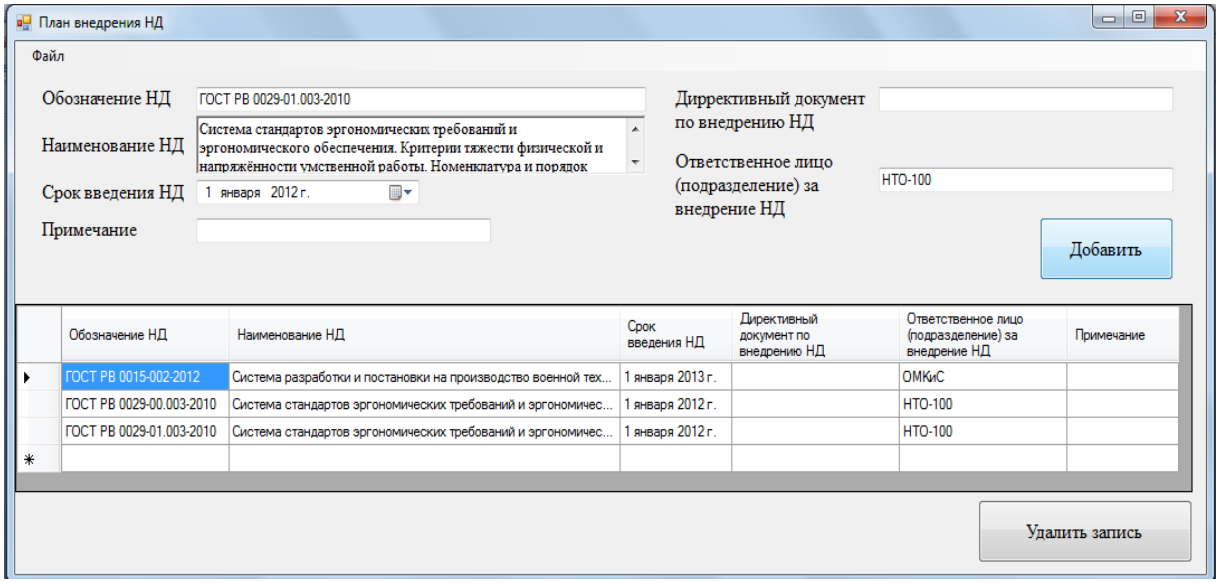


Рис. 9. Форма плана внедрения

Для поиска отделов, в которых имеются учтенные копии внедренных НД, создано приложение «Журнал выдачи НД», главная форма которого изображена на рис. 10.

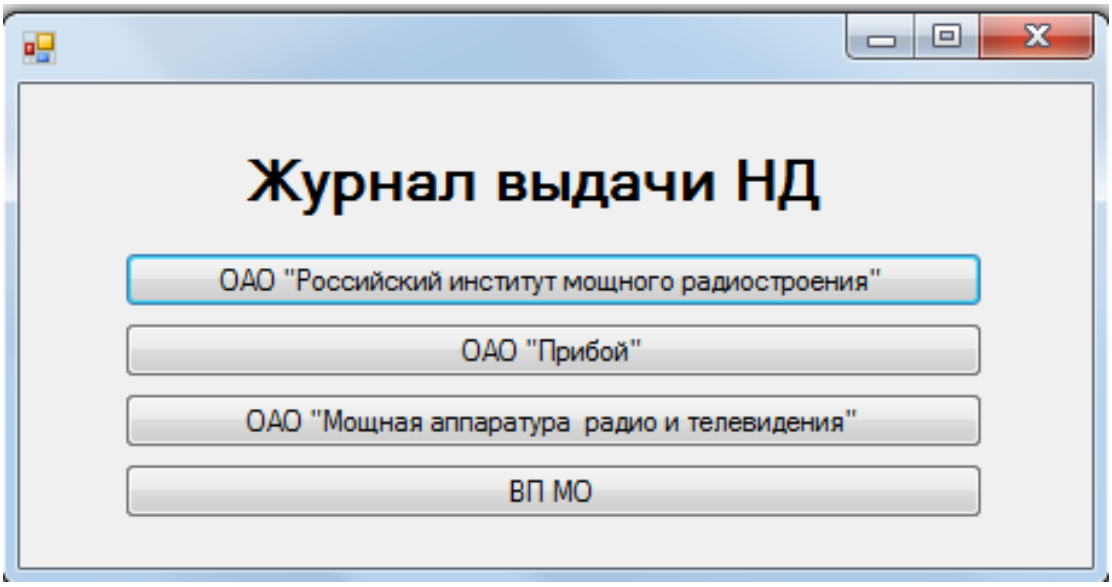


Рис. 10. Главная форма приложения

Пользователь приложения выбирает предприятие или военное представительство министерства обороны (ВП МО) и после нажатия на соответствующую кнопку переходит на форму журнала выдачи НД (рис. 11).

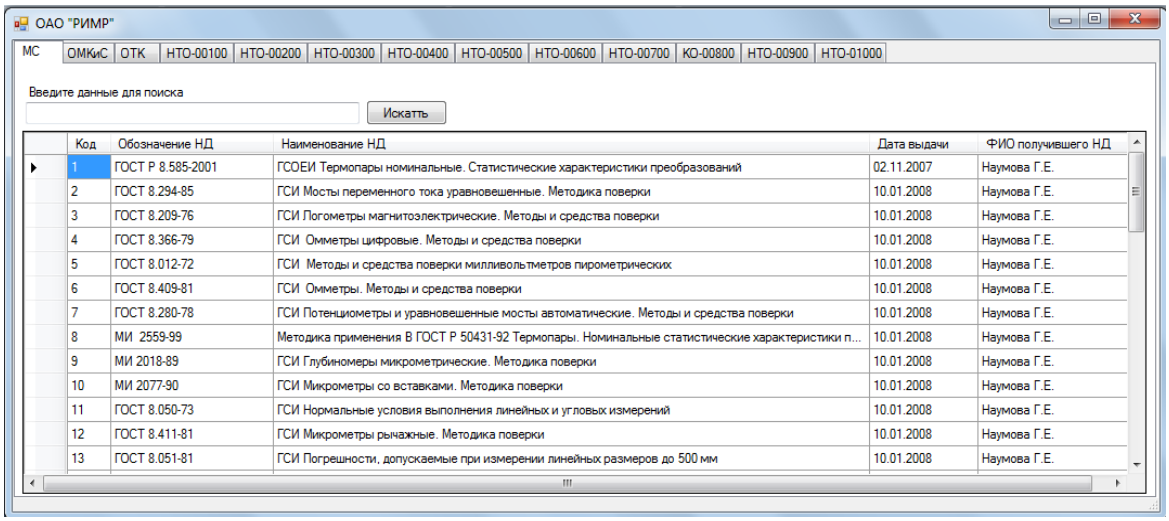


Рис. 11. Форма журнала выдачи НД ОАО «РИМР»

Каждая вкладка формы предназначена для определенного отдела предприятия. На вкладке с помощью элемента DataGridView отображается информация соответствующей таблицы базы данных MS Access о выданных учтенных копиях стандартов. Для того чтобы определить, в каких отделах находятся учтенные копии выбранного стандарта, необходимо ввести название или наименование стандарта в поисковую строку и нажать кнопку «Искать». Список найденных отделов отображается в новой форме и выводится на печать (рис. 12).

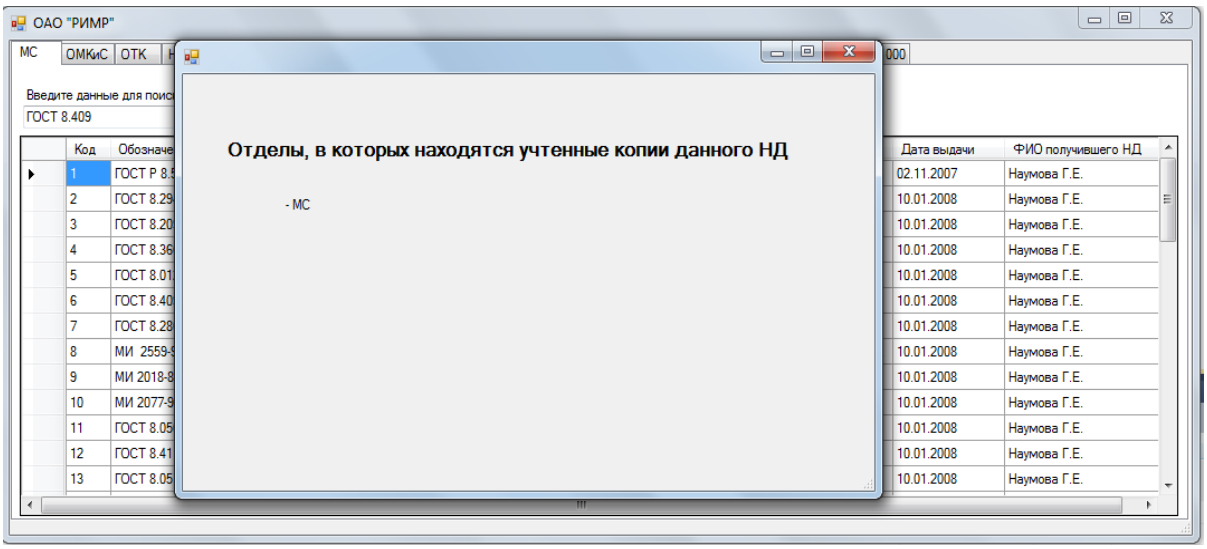


Рис. 12. Выведенный список отделов

Заключение

В результате внедрения приложения исключен человеческий фактор, снижена трудоемкость поиска и обработки информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ РВ 0001-004-2006 «Система стандартизации оборонной продукции. Документы по стандартизации оборонной продукции. Порядок информационного обеспечения и распространения».
2. ГОСТ РВ 0001-005-2006 «Система стандартизации оборонной продукции. Порядок внедрения стандартов на оборонную продукцию».
3. РД РИМР 4.02.12-2011 «Руководящий документ. Управление внешней нормативной документацией».
4. Ребрин Ю.И., «Управление качеством - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2009. - 174 с.
5. Эндрю Троелсен, «C# 4 и платформа .NET 4 для профессионалов» - 2010. – 346 с.
6. Майкл Дж. Д. Саттон. «Корпоративный документооборот. Принципы, технологии, методология внедрения». – С-Пб.: Азбука, 2002. – 246 с.
7. Куняев Н.Н., Демушкин А.С., Фабричнов А.Г. Конфиденциальное делопроизводство и защищенный электронный документооборот. – М: Логос, 2011. -452 с.
8. Кузнецова, Т.В. Делопроизводство (документационное обеспечение управления) - М.: Интел-Синтез, 2002. – 156 с.
9. М.И. Седлер, Н.П. Егорова Разработка автоматизированного клиент-серверного приложения управления заказами для фабрик ортопедической обуви// Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й международной научно-практической конференции. – Спб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. С. 530-538.
10. Информационный портал – «VisualStudio 2010: примеры для C#» - http://www.Visual-Studio-2010-Samples.by.
11. http://www.rimr.ru/.

M.I. Sedler[1], E.I. Poplevina[2]

IMPROVING THE QUALITY OF THE MANAGEMENT PROCESS OF NORMATIVE DOCUMENTS OF THE CORPORATION "TV AND RADIO"

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Joint-Stock Company «Russian institute for power radiobuilding», Russia.

Abstract

Within this publication questions of improving the quality of the

management process of normative documents of the corporation "TV and radio" on the basis of automation are considered. Results show that, automation of the management process reduces the time for searching the information; the human factor is excluded.

Keywords: database, automated application, normative document, inventory, journal issue, standard, act, order, introduction card, accounting.

REFERENCES

[1] GOST RV 0001-004-2006 «Sistema standartizacii oboronnoj produkcii. Dokumenty po standartizacii oboronnoj produkcii. Poryadok informacionnogo obespecheniya i rasprostraneniya».(rus.)
[2] GOST RV 0001-005-2006 «Sistema standartizacii oboronnoj produkcii. Poryadok vnedreniya standartov na oboronnuyu produkciyu».(rus.)
[3] RD RIMR 4.02.12-2011 «Rukovodjashhij dokument. Upravlenie vneshnej normativnoj dokumentaciej».(rus.)
[4] Rebrin Yu.I., «Upravlenie kachestvom - Taganrog: Izd-vo TRTU, 2009. - 174 p. (rus.)
[5] Jendryu Troelsen, «C# 4 i platforma .NET 4 dlya professionalov» - 2010. – 346 p. (rus.)
[6] Majkl Dzh. D. Satton. «Korporativnyj dokumentooborot. Principy, tehnologii, metodologiya vnedreniya». – S-Pb.: Azbuka, 2002. – 246 p. (rus.)
[7] Kunyaev N.N., Demushkin A.S., Fabrichnov A.G. Konfidencialnoe deloproizvodstvo i zashhishhennyj elektronnyj dokumentooborot. – M: Logos, 2011. -452 p. (rus.)
[8] Kuznecova, T.V. Deloproizvodstvo (dokumentacionnoe obespechenie upravleniya) - M.: Intel-Sintez, 2002. – 156 p. (rus.)
[9] M.I. Sedler, N.P. Egorova Razrabotka avtomatizirovannogo klient-srvernogo prilozheniya ypravleniya zakazami dlya fabric ortopedicheskoy obyvi// Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy 3-y mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Spb.: Izd-vo Politehn.un-ta, 2013. p. 530-538 (rus).
[10] Informacionnyj portal – «VisualStudio 2010: primery dlya C#» - http://www.Visual-Studio-2010-Samples.by. (rus.)
[11] http://www.rimr.ru/.

УДК 658.562.012.7

М.И. Седлер[1], В.А. Степанова[2]

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

[1]Мария Ильинична Седлер, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: ukti@spbstu.ru

[2]Валентина Андреевна Степанова, студент магистр
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Т.: (812) 534-0764, E-mail: stepanova.spbspu@yandex.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы повышения качества механической обработки деталей. Для этого разработан процесс статистического контроля их изготовления в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91) Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. Для внедрения на предприятии создано приложение обработки введенных данных результатов проверки размеров деталей, при которой обеспечивается автоматический расчет параметров и построение карт средних размеров и размахов, анализ результатов контроля, позволяющий своевременно реагировать на изменение параметров технологического процесса механической обработки и предупреждать появление брака.

Ключевые слова: статистический учет, карты Шухарта, стабильность процесса, автоматизированное приложение.

Введение

Качество машиностроительной продукции обеспечивается стабильным процессом производства. Контроль стабильности технологического процесса реализуется на основе стандарта ГОСТ Р 50779.42-99 Контрольные карты Шухарта. Контрольные карты являются графическим способом представления информации, основанной на последовательности выборок, и отражают текущее состояние процесса [1].

Данная разработка осуществлена для машиностроительного

предприятия, получившего постоянный заказ на серийное производство литых деталей автомобильных компонентов из алюминиевого сплава. На предприятии разработана технология с учетом существующего оборудования и выпущены первые партии деталей. Для получения отливок использовался автоматизированный литейный комплекс IDRA-560, обеспечивающий получение нескольких деталей за один впрыск алюминиевого сплава. Для финишной обработки деталей использовался виброгалтовочный станок ROSLER R420.

После изготовления первых партий ежемесячный размер заказа был увеличен более чем в три раза и составил 135000 деталей в месяц. В процессе контроля было выявлено неудовлетворительное качество поверхности деталей после финишной обработки. В связи с увеличением размера ежемесячного заказа производительность оборудования финишной обработки оказалась недостаточной. Поэтому для выполнения этой технологической операции была приобретена дробеметная установка GOSTOL GG-40.

Для повышения качества изготовления деталей на предприятии была создана процедура выборочного контроля размеров, в соответствии с которой периодически осуществляется отбор восьми образцов отливок, полученных в каждом из гнезд литейной пресс-формы. Данные замеров заносились в контрольные листки – файлы формата MS Word. Процесс дальнейшей обработки полученных данных на предприятии не был автоматизирован. В связи с этим сотрудникам отдела технического контроля нужно было искать размеры, выходящие за границы поля допуска.

Для решения этой проблемы создано приложение, обеспечивающее автоматический поиск размеров деталей, не соответствующих полю допуска, автоматическое построение контрольных карт средних значений и размахов, а также расчет индексов воспроизводимости процессов C_p и C_{pk}. [8]. Результаты произведенных расчетов и построенные контрольные карты можно использовать для интерпретации хода процесса литья.

Разработка приложения для построения контрольных карт

Приложение для построения контрольных карт представляет собой файл MS Excel. Первый лист «Лист1» файла - таблицы с результатами замеров контролируемых деталей, полученных в каждом гнезде литейной пресс-формы (контрольные листки), заполняется вручную оператором. На рис. 1 представлен вид контрольного листка для гнезда 1.

Процесс выявления брака после ввода результатов измерений и построения контрольных карт автоматизирован. Для этого на языке программирования VBA написаны программные модули. При вводе значений размеров в контрольный листок это значение сравнивается с контролируемым размером, записанным в три ячейки. В ячейке столбца

«Главная проекция» указано номинальное значение размера, в ячейке столбца «НГД» - нижнее поле допуска, в ячейке столбца «ВГД» - верхнее поле допуска. Если значение контролируемого параметра выходит за границы поля допуска, соответствующая ему ячейка таблицы MS Excel выделяется красным цветом.

ПОЗ	РАЗМЕР / СПЕЦИФИКАЦИЯ			РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАМЕРОВ Выполнено поставщиком								ОК	НЕОК
				Номер гнезда пресс-формы и образца									
				1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8		
	Главная проекция	НГД	ВГД										
1	Ø11,8		0,3	11,933	11,945	11,904	11,912	11,933	11,921	11,912	11,93	+	
2	Ø11,8		0,3	11,895	11,942	11,947	11,884	11,921	11,825	11,892	11,883	+	
3	R34.5			34,064	34,832	34,268	34,691	34,499	34,724	34,322	34,254		-
4	50.0	-0,2	0,2	50,179	50,283	50,149	50,189	50,305	50,152	50,161	50,18		-
5	53.6	-0,2	0,2	53,71	53,763	53,718	53,765	53,797	53,629	53,754	53,735	+	
6	30,50	-0,2	0,2	30,472	30,502	30,492	30,484	30,491	30,478	30,482	30,481	+	
7	13,10	-0,2	0,2	13,24	13,335	13,274	13,492	13,367	13,155	13,234	13,336		-
8	7,50			7,874	6,918	7,695	7,12	7,368	7,125	7,365	7,556		-
9	M10x1,25			ок	ок	ок	ок	ок	ок	ок	ок	+	
10	M10x1,25			ок	ок	ок	ок	ок	ок	ок	ок	+	
11	(∟90°)	⊥ -0,3	⊥0,3	90,069	90,115	90,106	90,128	90,183	90,228	90,123	90,109	+	
12	(∟90°)	⊥ -0,3	⊥0,3	90,16	90,16	90,256	90,194	90,142	90,192	90,154	90,15	+	
13	▱0,2			0,006	0,006	0,004	0,008	0,002	0,009	0,005	0,01		-
14	⌖0,4			0,372	0,125	0,285	0,301	0,142	0,327	0,268	0,159		-
15	$Rz\ 30_{min}$												
16	37		0,3										

Лист1 Лист2

Рис. 1. Вид контрольного листка

Определения значений параметров контрольных карт осуществляется следующим образом. Контрольные карты строятся для каждого контролируемого размера. Значения средних размеров и размахов для построения карт рассчитываются по данным замеров контролируемых размеров. Так, например, среднее значение контролируемого размера диаметр11,8 для первого гнезда литейной пресс-формы равно

$$\frac{11{,}933+11{,}945+11{,}904+11{,}912+11{,}933+11{,}921+11{,}912+11{,}930}{8}=11{,}924$$

Размах равен

$$11{,}945-11{,}904=0{,}041$$

На рис. 2 представлен алгоритм построения карт средних значений и размахов [2].

Программа построения контрольных карт работает следующим образом. При нажатии на кнопку «Построить графики» автоматически по данным контрольных листков определяется количество контролируемых размеров. Далее для каждого размера формируется массив вида array (1 To pos, 1 To all), где pos – количество позиций и all – количество полученных в ходе контроля размеров. [6,7] Первые три числа каждой строчки массива соответствуют номинальному размеру, верхнему и нижнему полям

допуска соответственно.

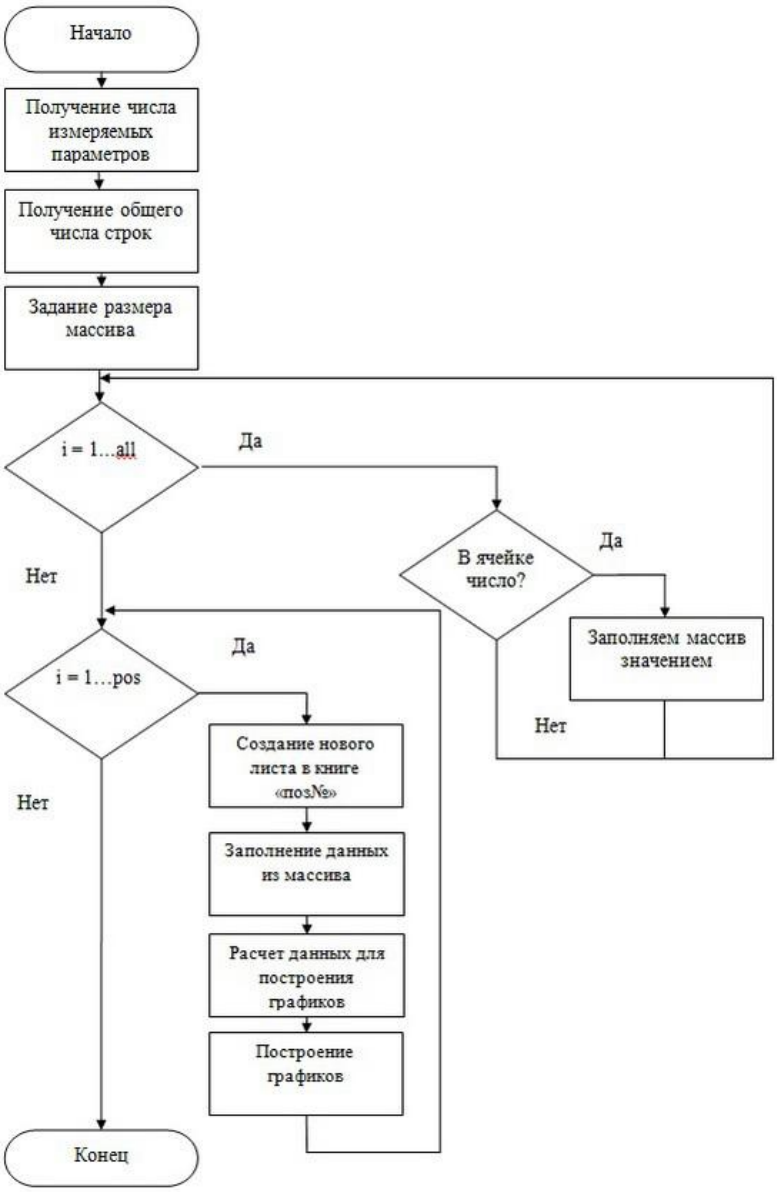


Рис. 2. Алгоритм построения контрольных карт

Для построения контрольных карт для каждого контролируемого размера в книге MS Excel автоматически создается новый лист с названием, совпадающим с номером позиции, указанной в перечне контролируемых размеров детали. После формирования массива автоматически создаются листы с названием «поз№», в которые копируется пустая таблица-шаблон для внесения результатов контроля. Данные для расчета средних значений и размахов по группам, соответствующим гнездам литейной пресс-формы, заносятся в столбцы шаблонов по 8 значений. Для этого программно осуществляется транспонирование массива данных первого листа «Лист1». Значения

номинальных размеров, верхние и нижние границы поля допуска также автоматически заносятся в соответствующие ячейки. Полученная таблица исходных данных для расчета средних значений и размахов по группам представлена на рис. 3.

6	Date										13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09	13.09		
7	Controller										AG	AG	AG	AG	AG	AG	AG	AG	AG	AG		
8	DIMENSION									1	11,933	11,902	11,938	11,914	11,904							
9										2	11,945	11,867	11,893	11,914	11,897							
10					UCL	0,30				3	11,904	11,910	11,929	11,923	11,902							
11		11,8			LCL	0,00				4	11,912	11,934	11,922	11,918	11,896							
12										5	11,933	11,910	11,938	11,924	11,917							
13										6	11,921	11,904	11,916	11,925	11,914							
14										7	11,912	11,922	11,917	11,917	11,912							
15										8	11,930	11,919	11,966	11,903	11,894							
16										X	11,924	11,909	11,927	11,917	11,905	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
17										R	0,041	0,067	0,073	0,022	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		

Рис. 3. Исходные данные для расчета средних значений и размахов

Программа осуществляет заполнение шаблонов листов «поз№» и построение контрольных карт последовательно. После заполнения шаблона автоматически рассчитывается количество групп и для каждой группы рассчитывается среднее значение, размах и стандартное отклонение для всей выборки данных. Эти значения автоматически записываются в ячейки таблицы. На основе полученных данных рассчитываются значения C_p и C_{pk}.

Результаты работы программы представлены на рис. 4.

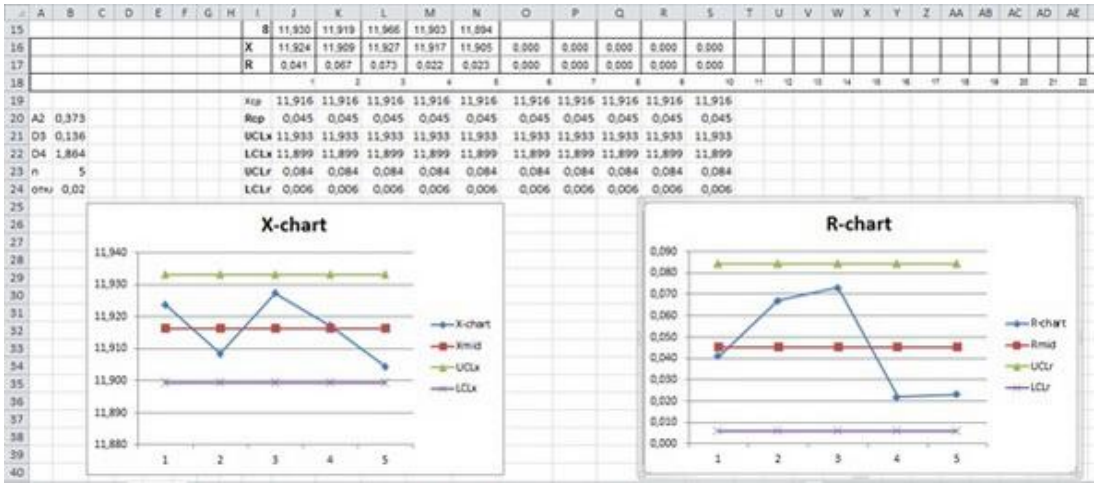


Рис. 4. Результаты работы программы

Заключение

В результате проделанной работы в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91) на машиностроительном предприятии организован автоматизированный статистический контроль производства деталей автомобильных компонентов. Для этого была

изучена существующая технология производства деталей, разработан процесс и алгоритм работы автоматизированного приложения, обеспечивающего построение контрольных карт средних значений и размахов, расчета индексов воспроизводимости процессов C_p и C_{pk} после регистрации результатов контроля в шаблонах контрольных листков файла MS Excel. Внедрение автоматизированного приложения обеспечило повышение качества изготовления деталей автомобильных компонентов путем предупреждения брака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91) Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
2 ГОСТ 19.003-80. Схемы алгоритмов и программ. Обозначения условные графические.
3 ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования.
4 И.П. Гайдышев. Решение научных и инженерных задач средствами Excel,VBA, C++. – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2004. – 512 с.
5 К.А. Игнатьев, М.И. Седлер. Создание методики статистического управления и автоматизированного приложения «Контроль качества на участке ошиповки» предприятия ООО «НОКИАН ТАЙЕРС»// XLI неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч.IV. – СПб. : Изд-во Потитех.ун-та, 2012. С.266-267.
6 Л.А. Демидова, А. Н. Пылькин. Программирование в среде Visual Basic for Applications: Практикум.-М.: Горячая Линия – Телеком, 2004, 175 с.
7 Л.Д. Слепцова Программирование на VBA в Microsoft Office 2010. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2010. – 432 с.
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 С. М. Кашаев. Программирование в Microsoft Excel – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2007. – 320 с.
10 John Walkenbach Excel® 2010 Power Programming with VBA Wiley Publishing, Inc., 2010, 1052 p

M.I. Sedler, V.A. Stepanova

IMPROVEMENT OF QUALITY OF PRODUCIBLE COMPONENTS DUE TO ORGANIZING OF THE STATISTICAL CONTROL OF THEIR PRODUCTION

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia.

Abstract

Within the scope of this publication, questions of improvement of quality of mechanical tooling components are considered. For the reason of quality improvement, a process of statistic control of components production according to *GOST R 50779.42-99 (ISO 8258-91) Statistical Methods, Shewhart Control Charts* is developed. Special automated application is developed for the purpose of implementation it in a company. This application uses for input data of the results, gained after checking component measurements. This application provides automatic parameters calculation, building average size and range charts, analysis of results control, allows to well-timed react to changes of parameters and to prevents the appearance of rejected items.

Keywords: statistical check, Shewhart charts, process stability, automated application.

REFERENCES

[1] GOST R 50779.42-99 (ISO 8258-91) Statisticheskie metody. Kontrolnye karty Shukharta (rus.)

[2] GOST 19.003-80. Skhemy algoritmov i programm. Oboznacheniya uslovnye graficheskie (rus).

[3] GOST ISO 9001-2011. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya (rus).

[4] I.P. Gaydyshev. Reshenie nauchnykh i inzhenernykh zadach sredstvami Excel,VBA, C++. – SPb.: BKHV-Saint-Petersburg, 2004. – 512 p (rus).

[5] K.A. Ignatev, M.I. Sedler. Sozdanie metodiki statisticheskogo upravleniya i avtomatizirovannogo prilozheniya “Kontrol kachestva na ycastke oshipovki predpriyatiya “NOKIAN TAYERS” XLI nedelya nauki SPbGPU: materialy naychno-prakticheskoy konferentsyy s mezhdunarodnym uchastiem. P.IV. – SPb.: Izd-vo Politekn.un-ta, 2012. p.266-267 (rus).

[6] L.A. Demidova, A. N. Pylkin. Programmirovanie v Visual Basic for Applications: Praktikum.-M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2004, 175 p (rus).

[7] L.D. Sleptsova. Programmirovanie na VBA в Microsoft Office 2010. – M.: OOO «I.D. Vilyams», 2010. – 432 p (rus).

[8] S. M. Kashaev. Programmirovanie v Microsoft Excel – SPB.: BKHV- Saint-Petersburg, 2007. – 320 p (rus).

[9] M.I. Sedler, M.Kh. Sedler Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom [elektronnyy resurs]: uchebnoe posobie.- Saint-Petersburg, 2013. URL: http://dl.unilib.neva.ru/dl/2909.pdf> (rus).

[10] John Walkenbach Excel® 2010 Power Programming with VBA Wiley Publishing, Inc., 2010, 1052 p.

УДК 338.3

В.С. Силинский

ФАКТОРЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ РЫНКЕ

Вацлав Сергеевич Силинский, аспирант
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: silinskiy-vaclav@ya.ru.

Аннотация

В работе рассмотрена проблематика проведения маркетинговых исследований на отечественном промышленном высокотехнологичном рынке. Анализ ряда российских ИТ-компаний показал, что маркетинговые исследования могут быть эффективны, когда они продуманы и адаптированы под конкретный сценарий развития событий в локальном и временном промежутке.

Ключевые слова: промышленный рынок, маркетинговые исследования, высокотехнологичный товар.

Маркетинговые исследования сравнивают с коммуникационными каналами, которые обеспечивают фирме-производителю связь с внешней средой. Готовит ли фирма к выпуску новую продукцию, собирается ли диверсифицировать свою деятельность — во всех этих и подобных случаях необходимы маркетинговые исследования. Достоверность их — особая тема. Требуются для качественных исследований не только финансовые вложения (для привлечения специалистов), но и необходимые практические навыки и умения у менеджеров. Раскрытие характерных особенностей проведения маркетинговых исследований на отечественном высокотехнологичном рынке промышленной продукции есть важный этап в решении задач стратегического значения.

Маркетинговые исследования проводят, как правило, в четыре этапа. Первый шаг — это определение потребности в проведении исследования. Второй — разработка плана исследований: уточняются источники и методы сбора информации. Третий этап — реализация плана на практике. И последний — интерпретация и презентация полученных результатов исследования. Каждый этап включает в себя определённые действия, и их знание поможет избежать сбора избыточной информации на последующих ступенях исследования.

Более полно схема проведения маркетингового исследования впервые

была представлена доктором наук Е.В. Поповым [2, с.142]. Выглядит эта цепочка действий следующим образом. Сначала обозначается проблема, потом идёт разработка концепции исследования, затем следуют кабинетные маркетинговые исследования и полевые исследования рынка. Анализ рынка завершается имитационным моделированием, которое завершает разработку проблемы.

Сбор первичной или вторичной информации на промышленном высокотехнологичном рынке от схожих исследований на потребительском рынке существенных отличий не имеет. Информацию, в зависимости от её источника, здесь также делят на первичную информацию и вторичную. И также вторичная информация предшествует сбору первичных данных, и только когда станет окончательно ясно, какой именно вторичной информации не достаточно для данного исследования, менеджеры фирмы-товаропроизводителя приступают к сбору первичной информации. При этом на промышленном рынке, как и на потребительском рынке, к внутренним источникам информации относят бюджет фирмы, плановые задания, объёмы запасов и сбыта, счета клиентов, их жалобы и любую другую текущую информацию [11, с.289].

Внешних источников информации на высокотехнологичном рынке значительно меньше, чем на рынке потребительском в силу молодости и некоторой закрытости данного рынка. В связи с быстрым развитием высокотехнологичного рынка и разрастанием предлагаемого ассортимента товара маркетинговые анализы очень сложно делать по каким-то конкретным нишам. Ведь, как известно, почти любой игрок на рынке компьютерной техники занимается не только поставкой компьютеров, но и серверов, планшетов, ноутбуков и даже систем хранения данных. Каждая ниша нуждается в своём более конкретном исследовании — результаты анализа одного сегмента рынка могут не коррелировать с исследованиями схожей ниши деятельности даже в рамках одной и той же компании.

По опросу менеджеров крупных региональных предприятий, таких как «РАМЭК-ВС», «Ниеншанц-автоматика» и «Прософт», приемлемыми внешними источниками они считают исследования «Эксперт», «Эксперт Северо-Запад» и РБК. Из вторичной информации на высокотехнологичном рынке самой ценной считаются исследования IDC, C-NEWS и рейтингового агентства «Эксперт РА». С развитием интернета фирмы для сбора информации могут воспользоваться услугами виртуальных систем по сбору маркетинговой информации. Подобные информационные услуги предлагают коммерческие автоматизированные банки данных глобальных телекоммуникационных сетей, такие как Реллком, Ситек, SEDAB, REMART, информационно-вычислительные сети Госкомстата и Академии наук Российской Федерации [6]. Однако, по мнению аналитиков, при всём этом кажущемся разнообразии большого выбора источников информации на промышленном высокотехнологичном рынке пока ещё нет.

Метод наблюдения, метод экспериментов и метод опросов — это основные методы при сборе информации. Метод наблюдения считается одним из наиболее простых и соответственно недорогих методов исследования, при котором, принято считать, происходит минимум искажения информации. Метод эксперимента считается более затратным. В теории проведения исследований этот метод применяют обычно для оценки причинно-следственных связей, когда при проведении эксперимента изменяют один или несколько переменных параметров, когда, к примеру, выявляют реакцию потребителей, спрос на тот или иной товар. В маркетинговых исследованиях такие эксперименты проводят крайне редко: ограничиваются опросом. По общему мнению, это самый распространенный, а в некоторых случаях самый быстрый и эффективный метод исследования.

«Холодные звонки» в маркетинговых исследованиях применяются, в принципе, довольно широко, в силу их доступности. Порой они также позволяют получить оперативно самую достоверную информацию. Однако на рынке высоких технологий, как правило, продажа и закупка производится коллегиально. Закупку производит так называемая закупочная комиссия из числа ведущих специалистов организации, что автоматически делает холодные звонки неэффективным инструментом маркетингового исследования: вероятность попадания на контакт с лицом, принимающим окончательное решение, крайне низка — это, во-первых. Во-вторых, опрос, который производится непосредственно, с глазу на глаз, или с помощью анкет и телефона, хоть и остаётся удобным и малобюджетным способом получать информацию на любом рынке, на высокотехнологичном рынке чаще всего теряет свою действенность. Составление опросной анкеты требует от менеджера промышленного предприятия на B2B-рынке более высокой квалификации, чем на потребительском рынке. К тому же промышленный рынок считается более закрытым, и работа с анкетами на рынке B2B не отвечает существующим требованиям конфиденциальности.

На потребительском рынке результаты маркетинговых исследований обычно сводят в таблицы и производят обработку полученных данных с помощью статистических методик. Однако исследователи высокотехнологичного рынка в большинстве своем не советуют уповать на различные математические методики, считая, что результаты, не обработанные математическими методами, сами по себе достаточны для верного вывода. И в качестве примера обычно приводится самый начальный этап маркетинговых исследований — формулировку проблемы. Проблема — это «осознание противоречия между знанием и незнанием», и вряд ли в этом «осознании» человек уступит компьютеру. Более того, по мнению многих аналитиков, применение математических методов в маркетинговых исследованиях является во многих случаях вообще очень

проблематичным ввиду нелинейного характера сложных маркетинговых процессов и ввиду сложности проведения каких-либо количественных измерений. Качество подготовки информации для компьютерной обработки остаётся на совести исследователя, требуют от него креативных способностей, которых пока лишен самый продвинутый компьютер.

Наиболее доступным и информативным внутренним источником на предприятии промышленного высокотехнологичного рынка считается группа или отдел маркетинга. Для успешной и конкурентоспособной борьбы некоторые компании на рынке высоких технологий (например, ЗАО "Диджитал Дизайн") вменяют отделу маркетинга решение задач стратегического менеджмента. Служба маркетинга отвечает не только за сбор и анализ рыночной ситуации, но и за разработку новой маркетинговой политики. Подчас в сферу их ответственности подпадает и внедрение этой новой стратегии. Именно за счёт должного доверия и делегирования полномочий компаниям удаётся эффективно использовать службу маркетинга [10, с.261].

До Е.В. Попова в экономической литературе столь подробной схемы проведения маркетинговых исследований ещё не приводилось. По его же словам, столь тщательная алгоритмизация классическому маркетингу до поры до времени просто не требовалась — пока не «произошло... пополнение приемов и методов проведения исследований новыми передовыми разработками», чтобы «исходя из практической целесообразности» признать необходимость новых разработок методологии [1, с.92].

Для разработки любой методологии требуется набор необходимой информации. И потому, надо полагать, останутся долго в силе эвристические методы исследования, основанные на опыте исследователя и его интуиции.

Однако во всем выше сказанном — больше теории, чем практики. А на деле крупные фирмы, позиционирующие себя на промышленном высокотехнологичном рынке, и которые, казалось бы, просто обязаны создавать свои маркетинговые службы (куда бы входили самые разные специалисты — как говорится, от логистов до статистов), относятся к решению этого вопроса формально. Формально — мягко сказано. По сути, маркетинговые исследования, как таковые, в созданных отделах маркетинга и не проводятся.

Почему не проводятся — это уже вопрос, требующий серьёзного анализа. Нехватка специалистов? Финансовые проблемы? Или современный маркетинг взаимодействия не делает акцент на теоретическое изучение рынка? Возможно, и то, и другое, и третье. Одно пока ясно: маркетинговые исследования на высокотехнологическом рынке требуют серьёзные финансовые вложения, однако, как показали исследования в этой области, фирмы, ориентированные на производство передовой

компьютерной техники, применяют как раз не самые передовые методы финансирования — «от возможностей».

И образуется как бы замкнутый круг. Так, тот же широко распространенный метод «фиксированного процента», который основан на отчислении определённой доли от предполагаемого объёма сбыта, приводит к снижению трат на исследования. А чем меньше тратится, тем меньше и отдача.

Порой получается так. В конце концов, это приводит к тому, что фирма-производитель отказывается от серьёзных маркетинговых исследований — в силу их явной слабости. Вот и выходит, что на отечественном высокотехнологическом рынке, где мало того, что затруднён доступ к отраслевой информации, ещё, по большому счету, отсутствует в должном виде и сама культура маркетинговых исследований.

По мнению российского аналитика С.Р. Иванова [8, с.109], многочисленные учебники по маркетингу машиностроительной продукции индустриального назначения имеют тот существенный недостаток, что они, эти учебники, есть переводы исследовательских работ того рынка, который в своём развитии обгоняет наш отечественный рынок на десятилетия, и переведенные с английского языка научные тексты решают проблемы чужого, а не нашего рынка.

После проведённого анализа отечественных компаний на промышленном высокотехнологичном рынке можно сделать следующие выводы:

• большинство организаций относятся к маркетинговым исследованиям как к второстепенному инструменту ведения бизнеса ввиду консервативности устоев промышленной сферы бизнеса;

• маркетинговые исследования слабо эффективны, когда они плохо адаптированы под конкретный сценарий развития событий;

• сложно вычислить лицо, принимающее решение, у клиента для конструктивного диалога.

В качестве возможного улучшения сложившейся ситуации можно рекомендовать следующее:

• необходимо адаптировать полученные результаты исследований с учётом географических и временных корректировок;

• к сбору информации стоит привлекать административный ресурс как своей организации, так и компании-клиента для делового диалога с целью определения потребностей и возможных способов удовлетворения их с выгодой для обеих сторон.

• иностранный опыт маркетинговых исследований надо использовать с прицелом на будущее, потому что зарубежные высокие технологии и методы ведения бизнеса опережают наш рынок на десятилетие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендиков М.А. Рынки высокотехнологичной продукции: тенденции и перспективы развития / М.А. Бендиков, И.Э. Фролов // Маркетинг в России и за рубежом, 2011, №2. — С. 56—72
2. Голубков Е.П. Маркетинговые исследования: теория, методология и практика. М: Финпресс, 2005. — с. 464
3. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент [Текст] / Ф. Котлер, К. Л. Келлер; [пер. с англ. 12-го изд. С. Жильцов и др.]. — Москва [и др.] : Питер, 2006. — 814 с.
4. Котлер Ф. Основы маркетинга [Текст] : [пер. с англ. 5-го европ. изд.] / и др.; общ. ред. Н. В. Шульпиной. — Новое изд. — Москва [и др.] : Вильямс, 2012. — 1056 с
5. Ламбен Ж.-Ж. Менеджмент, ориентированный на рынок / Перев. С англ. под ред. В.Б. Колчанова. — СПб.: Питер, 2007. — 800 с.
6. Никольский А. Сорокалетняя инновация / А. Никольский, А. Фиалко // Ведомости, 2010, №56 (2574). С. 1—4
7. Пять конкурентных сил [Электронный ресурс] // Сайт 12 сил управления. — 2010. – Режим доступа http://www.12manage.com/methods_porter_five_forces_ru.html.-- Загл. с экрана. Пять конкурентных сил. (дата обращения: 10.03.2014)
8. Стрекалова Н.Д. Бизнес-модель как полезная концепция стратегического управления . — Евразийский международный научно-аналитический журнал «Проблемы современной экономики», N 2 (30), 2009 г.
9. Управление продажами: Учебник / Д. И. Баркан; Высшая школа менеджмента СПбГУ. — СПб.: Издат. дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2012. — 908 с.
10. Хулей Грэм, Сондерс Джон, Пирси Найджел Маркетинговая стратегия и конкурентное позиционирование / Пер. с англ. - Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2013 - 800с.
11. Черенков В.И. Международный маркетинг: Учебное пособие. — СПб.: ИВЭСЭП, Знание, 2003. — 848 с.
12. James W. Cortada Before the computer: IBM, NCR, Borroughs, and Remington Rand and the industry they created, 1865-1956. New Jersey: Princeton University Press, 2000. — 122 p.
13. Simchi-Levi. Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies. // Kaminsky, Simchi-Levi // McGraw Hill, Cambridge 2008. — p. 282.

V.S. Silinskii

FACTORS INCREASING PRODUCTIVITY OF MARKET RESEARCH OF HIGH-TECH INDUSTRY

Abstract

Market research is often compared with channels of communication, which establish connection between a manufacturer and its external environment. Market research is essential on different stages of a firm life cycle, like, for example, development of a new product and diversification of the business. Reliability of market research is a special topic to discuss. What is needed to conduct a high-quality market research goes beyond capital expenditures to recruit specialists, or essential practical skills of managers of the company. The peculiarities of market research of Russian high-tech industry is an important step to solve strategic problems.

Key words: industrial market, marketing research, hi-tech goods

REFERENCES

[1] Bendikov M.A. Rynki vysokotehnologichnoy produktsii: tendentsii i perspektivy razvitiya / M.A. Bendikov, I.E. Frolov // Marketing v Rossii i za rubezhom. — 2011. — №2. — pp. 56—72. (rus.)

[2] Golubkov E.P. Marketingovye issledovaniya: teoriya, metodologiya i praktika. Finpress, 2005. — p. 464 (rus.)

[3] Kotler F. Marketing menedzhment [Tekst] / F. Kotler, K. L. Keller; [per. s angl. 12-go izd. S. Zhil'tsov i dr.]. — Moskva [i dr.] : Piter, 2006. — 814 p. (rus.)

[4] Kotler F. Osnovy marketinga [Tekst] : [per. s angl. 5-go evrop. izd.] / i dr.; obsch. red. N. V. Shul'pinoy. — Novoe izd. — Moskva [i dr.] : Vil'yams, 2012. — 1056 p. (rus.)

[5] Lamben Zh.-Zh. Menedzhment, orientirovannyj na rynok / Perev. S angl. pod red. V.B. Kolchanova. — SPb.: Piter, 2007. — 800 p.

[6] Nikol'skiy A. Sorokaletnyaya innovatsiya / A. Nikol'skiy, A. Fialko // Vedomosti. — 2010. — №56 (2574). — pp. 1—4. (rus.)

[7] Pyat' konkurentnyh sil [Elektronnyj resurs] // Sayt 12 sil upravleniya. — 2010. – Rezhim dostupa http://www.12manage.com/methods_porter_five_forces_ru.html.-- Zagl. s ekrana. Pyat' konkurentnyh sil. (data obrascheniya: 10.03.2014)

[8] Strekalova N.D. Biznes-model' kak poleznaya kontseptsiya strategicheskogo upravleniya. – Evraziyskiy mezhdunarodnyj

nauchno-analiticheskiy zhurnal «Problemy sovremennoy ekonomiki», N 2 (30), 2009. (rus.)
[9] Upravlenie prodazhami: Uchebnik / D. I. Barkan; Vysshaya shkola menedzhmenta SPbGU. — SPb.: Izdat. dom S.-Peterb. gos. un-ta, 2012. — 908 p. (rus.)
[10] Huley Grem, Sonders Dzhon, Pirsi Naydzhel Marketingovaya strategiya i konkurentnoe pozitsionirovanie / Per. s angl. - Dnepropetrovsk: Balans Biznes Buks, 2013 – 800 p. (rus.)
[11] Cherenkov V.I. Mezhdunarodnyj marketing: Uchebnoe posobie. — SPb.: IVESEP, Znanie, 2003. — 848 p. (rus.)
[12] James W. Cortada Before the computer: IBM, NCR, Borroughs, and Remington Rand and the industry they created, 1865-1956. New Jersey: Princeton University Press, 2000. — 122 p.
[13] Simchi-Levi. Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies. // Kaminsky, Simchi-Levi // McGraw Hill, Cambridge 2008. — p. 282.

УДК 378.4

Д. И. Троицкий

МОДУЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЗНАНИЙ «АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ»

Дмитрий Игоревич Троицкий, к.т.н., доцент
Тульский государственный университет
Россия, Тула
Тел.: (4872)351887, E-mail: dtroitsky@tsu.tula.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы модульного построения подготовки студентов высшей школы по области знаний «автоматизированное проектирование» (CAD/CAM/CAE/PLM-системы). Проведена систематизация данной области знаний, выявлены модули и связи между ними, предложены подходы к формированию учебных планов по различным направлениям подготовки.

Ключевые слова: модульная подготовка, автоматизированное проектирование, построение учебного плана.

Введение. Переход к модульному и вариативному обучению требует выполнения четкой структуризации каждой области знаний. В настоящей работе проведен анализ предметной области «системы автоматизированного проектирования» (САПР) [2] и предложены варианты организации учебного процесса в области САПР для студентов различных направлений подготовки с учетом требований государственных образовательных стандартов.

Структура области знаний «САПР». Предлагается структурно подразделить область знаний «автоматизированное проектирование» [5, 6, 8] на ряд доменов, представленных на рис. 1.

Рассмотрим перечисленные домены более подробно.

1. CAD (computer-aided design). Базовое геометрическое моделирование деталей и сборок, в основном применительно к машиностроению. Необходимо всем студентам инженерных направлений.

2. CAE (computer-aided engineering). Прочностные расчеты методом конечных элементов на основе CAD-моделей. Необходимо всем студентам инженерных направлений. Специальные разновидности CAE (например, вычислительная газогидродинамика, прочностные расчеты строительных конструкций) должны изучаться в специализированных курсах по ряду направлений подготовки.

3. CAM (computer-aided manufacturing). Автоматизированная разработка технологий изготовления изделий на основе CAD-моделей и при ориентации на оборудование с ЧПУ (концепция «цифрового производства»). Изучение данного домена необходимо студентам технологического и станочного профиля.

4. Архитектурные САПР, ГИС (геоинформационные системы) и BIM-системы (building information model). Это отдельная подобласть, направленная на 3D-моделирование и создание информационных моделей зданий (BIM) и ландшафтов (ГИС). Изучение данного домена необходимо студентам строительного профиля.

5. ECAD (electronic computer-aided design). САПР электронных средств, применяемые при проектировании схем и печатных плат. Изучение данного домена необходимо студентам радиоэлектронного профиля.

6. PLM (product lifecycle management). Управление жизненным циклом изделия. PLM-системы обеспечивают управление всей обширной информацией, которая создается в CAD/CAM/CAE-средствах. Обязательно к изучению на всех инженерных специальностях на последнем этапе, после прохождения цепочки «общий курс по САПР – специализированный курс по CAE/CAM/BIM – курс по PLM»

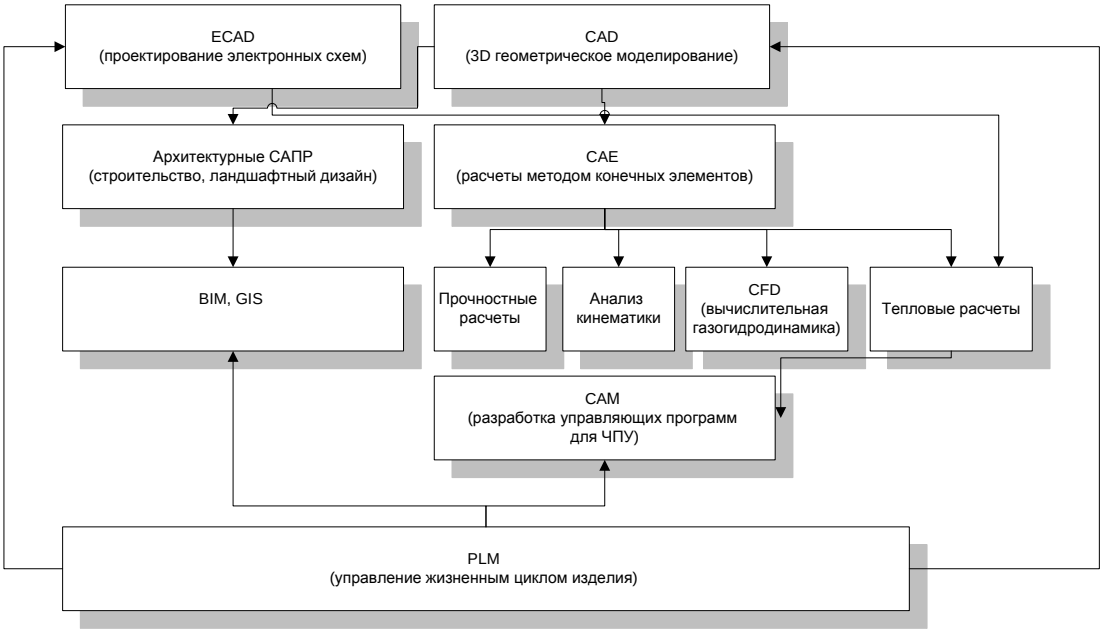


Рис. 1. Дерево предметной области САПР

Уровни подготовки. Предлагается в целом трехуровневая подготовка в области САПР (рис. 2).

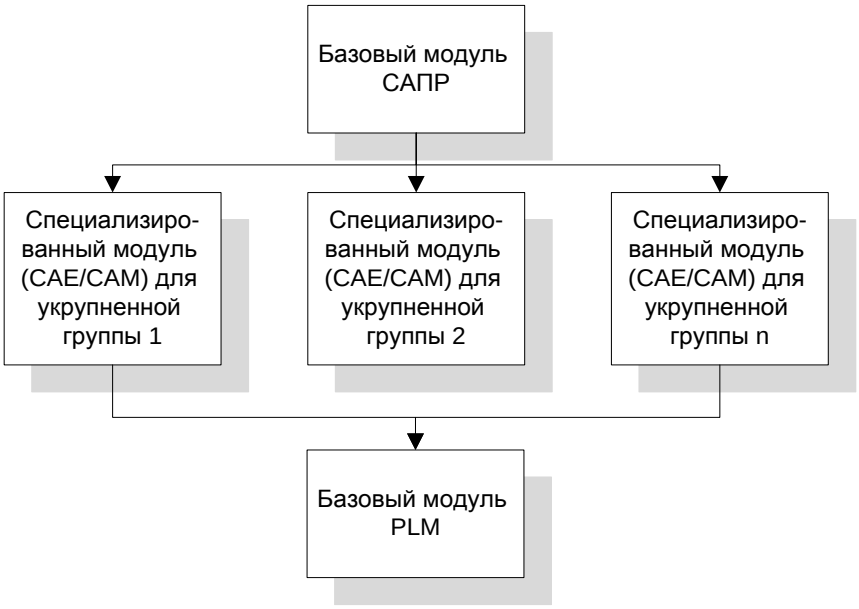


Рис. 2. Общая схема уровней подготовки по САПР

Специализированные модули второго уровня выбираются в зависимости от конкретной укрупненной группы [7]. Модули первого и третьего уровней инвариантны, так как не зависят от области применения САПР.

Система обозначений модулей. В мире давно принята единая система обозначений учебных курсов и модулей [10], которую необходимо перенять и в российской высшей школе. Модуль обозначается следующим кодом:

ABCD-XYZ

где ABCD – сокращенное наименование дисциплины (до 4-х букв), например — MATH (математика), PHYS (физика), CS (информатика), CAD (САПР) и т.д.;
X – уровень сложности дисциплины. Например, CAD 201 – это модуль для студентов профиля САПР (с большим объемом зачетных единиц (ЗЕ)), а CAD 101 – это САПР для студентов-технологов. Как правило, величина X коррелирует с числом ЗЕ и с курсом, на котором изучается модуль;
Y – чаще всего ноль. Иногда может применяться для указания того, какой преподаватель ведет данный модуль (скажем, MATH 111 ведет проф. Иванов, а MATH 121 – проф. Петров);
Z – последовательность изучения модулей. 1 – вводный модуль, 2 – следующий модуль и т.д. Сразу понятно, в какой последовательности изучать модули, скажем, сначала MATH 101 (традиционно первый модуль

обозначается 101), потом — MATH 102 и т.д. Для каждого курса с $Z_i>1$ пререквизитами автоматически становятся все курсы с $Z<Z_i$.

Модули по САПР. Предлагается следующий набор модулей (курсов) по предметной области «САПР» (см. табл. 1). Обозначения модулей приведены на рис. 1.

Таблица 1

Модули по САПР

1) Базовые

Наименование	Код	Число зачетных единиц	Семестр	Отчетность
Автоматизированное проектирование 101	CAD 101	3	5	Зачет
Управление жизненным циклом изделия 101	PLM 101	3	8	Зачет

2) Специализированные

Наименование	Код	Число зачетных единиц	Семестр	Отчетность
Инженерный анализ изделий	CAE 101	4	6	Экзамен, КР
Вычислительная газогидродинамика	CAE 102	8	7	Экзамен
Автоматизированное проектирование электронных систем	ECAD 101	5	6	Экзамен
Автоматизированная разработка технологических процессов	CAM 101	4	6	Экзамен
Автоматизированное проектирование в строительстве и архитектуре	CCAD 101, CCAD 102	10	6, 7	Экзамен, зачет, КР
Геоинформационные системы	GIS 101	5	7	Зачет

Распределение модулей по укрупненным группам направлений подготовки. Предлагается следующее распределение модулей (табл. 2):

Таблица 2

Распределение модулей по укрупненным группам

Код	Наименование	Уровень изучения САПР	Баз. модуль 1	Спец. модули	Баз. модуль 2
110000	Сельское и рыбное хозяйство	1	CAD 101	GIS 101	PLM 101
120000	Геодезия и землеустройство	1	CAD 101	GIS 101	PLM 101
130000	Геология, разведка и разработка полезных ископаемых	1	CAD 101	GIS 101	PLM 101
140000	Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника	1	CAD 101	CAE 101, CAM 101	PLM 101
150000	Металлургия, машиностроение и материало-обработка	2	CAD 101	CAE 101, CAM 101	PLM 101
160000	Авиационная и ракетно-космическая техника	2	CAD 101	CAE 101, CAE 102, CAM 101	PLM 101
170000	Оружие и системы вооружения	2	CAD 101	CAE 101, CAE 102, CAM 101	PLM 101
190000	Транспортные средства	1	CAD 101		PLM 101
200000	Приборостроение и оптотехника	2	CAD 101	CAE 101, CAM 101	PLM 101

Код	Наименование	Уровень изучения САПР	Баз. модуль 1	Спец. модули	Баз. модуль 2
210000	Электронная техника, радиотехника и связь	2	CAD 101	ECAD 101	PLM 101
220000	Автоматика и управление	1	CAD 101	ECAD 101	PLM 101
230000	Информатика и вычислительная техника	1, кроме профиля САПР	CAD 101		PLM 101
240000	Химическая и биотехнологии	1	CAD 101		PLM 101
270000	Строительство и архитектура	2	CAD 101	CCAD 101, CCAD 102, GIS 101	PLM 101

Содержание модулей. По всем предложенным модулям разработаны учебно-методические комплексы. В качестве примера рассмотрим содержание базового модуля CAD 101 (17 часов лекций, 34 часа лабораторных работ, 57 часов самостоятельной работы, 3 зачетные единицы):

1. Информационная поддержка проектирования
2. История развития САПР
3. Жизненный цикл изделия
4. Структура и разновидности САПР
5. CAD-системы
6. Трехмерное моделирование деталей и сборок
7. Задачи инженерного анализа
8. CAE-системы
9. Технологии цифрового производства
10. CAM-системы
11. PDM- и PLM-системы

Содержание лабораторного практикума:

1. 3D моделирование (вариант ПО: Компас 3D)
2. Прочностной расчет в (вариант ПО: АРМ WinMachine)
3. Разработка управляющей программы (вариант ПО:СПРУТ CAM)
4. Основы PLM-систем (вариант ПО:ЛОЦМАН PLM)

Влияние модульного подхода на другие курсы. В основе САПР лежит переход от приближенных эмпирических методов решения задач подготовки производства к точным аналитическим. В частности, проектное решение представляется не чертежом, а 3D-моделью, а чертежи вообще не применяются, так как вся атрибутивная информация (допуски, посадки, свойства материала) представляется также на 3D-модели; прочностные расчеты выполняются не методами сопромата, а универсальным методом конечных элементов и т.д. В результате ряд традиционных дисциплин в современных условиях оказываются устаревшими и избыточными.

1. Начертательная геометрия. В основе данной дисциплины лежат методы построения проекций и сечений. 3D-моделирование легко и эффективно решает все задачи начертательной геометрии [9]. Сохранение данного курса в нынешнем виде, не сильно изменившемся со времен Гаспара Монжа, представляется недопустимым, так как получаемые знания не могут быть применены студентами в реальной производственной практике.

2. Черчение. Системы автоматизированного проектирования все больше ориентируются на отказ от чертежей вообще. Ряд российских заводов уже порядка 10 лет работают по безбумажной технологии «CAD/CAM/CAE – производство» и вообще не выпускают чертежи. Поэтому требуется серьезное переосмысление содержания курса черчения [1] и безусловное устранение из него процессов ручного вычерчивания проекций, написания текста чертежным шрифтом и прочих процессов, неприменимых в реальной производственной практике.

3. Сопротивление материалов. Современные стандарты серии ISO прямо запрещают использование каких-либо иных методов прочностных расчетов ответственных изделий, кроме метода конечных элементов. Изделие, рассчитанное традиционными методами сопромата, просто не пройдет сертификацию. Требуется безусловная переориентация данного курса на освоение CAE-систем.

4. Проектирование технологических процессов (ТП). До сих пор упор делается на ручное создание карты маршрутного или операционного ТП, фактически являющегося инструкцией рабочему: «обточить валик до диаметра 20 мм» и т.д. Во всем мире от таких ТП уже давно отошли, поскольку практически все современное технологическое оборудование оснащено ЧПУ и речь идет о разработке управляющих программ, их верификации и полном 3D-моделировании процессов обработки и сборки. Требуется переориентация технологических курсов на освоение студентами CAM-систем.

5. Теоретическая механика (ТМ). При безусловной полезности и применимости математического аппарата ТМ [4] необходимо включить в

курс и освоение современных систем моделирования кинематики, позволяющих в численном виде решать задачи ТМ по определению траекторий движения деталей механизмов.

Заключение. В данной работе предложен вариант перехода на модульное преподавание области знаний «автоматизированное проектирование» в масштабах университета, показана структура данной области, раскрыта связь между укрупненными группами подготовки и модулями по САПР, предложено содержание базовых модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Л. Альшакова. Инновационные методики обучения конструкторско-технологической подготовке производства // 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. – 1205 с. С. 23-28
2. М. М. Донская, В. И. Петраш, Н. А. Солодилова Преподавание дисциплины «САПР в машиностроении» в институте металлургии, машиностроения и транспорта // 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. – 1205 с. С. 85-89
3. Б.А. Смольников, В.А. Пальмов Уровни образования в российских технических университетах // 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. – 1205 с. С. 168-172
4. О.В. Мкртычев Компьютерные технологии в преподавании ТММ – цель или средство? // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М.Радкевича и А.Н.Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 846 с. С. 179-184
5. Groover, Mikell P. CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing/ Prentice-Hall, Inc. 1984.
6. И.П. Норенков. Основы автоматизированного проектирования. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 336 с.: ил.
7. Чошанов М. Гибкая технология проблемно-модульного обучения.

М.: Народное образование, 1996. - 160 с, ил.
8. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) — СПб.: Питер, 2004. — 560 с.: ил.
9. А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, Е.С. Писанка Перспективы развития дисциплины «Начертательная геометрия» // 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. – 1205 с. С. 179-184
10. A. Henshaw. How To Standardize College Course Numbers [Электронный ресурс] // URL: http://www.ehow.com/how_5859544_standardize-college-course-numbers.html (дата обращения: 10.04.2014).

D.I.Troitsky

MODULAR-BASED EDUCATION IN THE COMPUTER-AIDED DESIGN DOMAIN

Tula State University, Russia.

.

Abstract

The paper considers the modular approach to university education in the domain of computer-aided design (CAD/CAM/CAE/PLM). The domain has been analyzed, the modules and their relations have been identified, an approach to curriculum development for various engineering majors has been proposed.

Key words: modular education, computer-aided design, curriculum development

REFERENCES

[1] E.L. Al`shakova. Innovatcionny`e metodiki obucheniia konstruktorsko-tekhnologicheskoi` podgotovke proizvodstva // MODERN MANUFACTURING: SCIENCE AND EDUCATION: Proceedings of the 3rd International Conference/ Edited by M.M. Radkevich and A.N. Yevgrafov. – SPb.: Polytechnic University Publishing, 2013. – 1205 p. Pp. 23-28. (rus.)
[2] M. M. Donskaia, V. I. Petrash, N. A. Solodilova Prepodavanie distcipliny` «SAPR v mashinostroenii» v institute metallurgii, mashinostroeniia i transporta // MODERN MANUFACTURING: SCIENCE AND EDUCATION: Proceedings of the 3rd International

Conference/ Edited by M.M. Radkevich and A.N. Yevgrafov. – SPb.: Polytechnic University Publishing, 2013. – 1205 p. Pp. 85-89. (rus.)
[3] B.A. Smol`nikov, V.A. Pal`mov Urovni obrazovaniia v rossii`skikh tekhnicheskikh universitetakh // MODERN MANUFACTURING: SCIENCE AND EDUCATION: Proceedings of the 3rd International Conference/ Edited by M.M. Radkevich and A.N. Yevgrafov. – SPb.: Polytechnic University Publishing, 2013. – 1205 p. Pp. 168-172. (rus.)
[4] O.V. Mkrty`chev Komp`iuterny`e tekhnologii v prepodavanii TMM – tcel` ili sredstvo? // MODERN MANUFACTURING: SCIENCE AND EDUCATION: Proceedings of the 2nd International Conference/ Edited by M.M. Radkevich and A.N. Yevgrafov. – SPb.: Polytechnic University Publishing, 2013. – 846 p. Pp. 179-184. (rus.)
[5] Groover, Mikell P. CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing/ Prentice-Hall, Inc. 1984.
[6] I.P. Norenkov Osnovy` avtomatizirovannogo proektirovaniia. 2nd edition, revised. Moscow, Bauman University Publishing, 2002. — 336 p. (rus.)
[7] Choshanov M. Gibkaia tekhnologiia problemno-modul`nogo obucheniia. M.: Narodnoye Obrazovanie Publusing, 1996. - 160 p. (rus.)
[8] Kunwoo Lee Principles of CAD/CAM/CAE. Addisson-Valley, 1999. (rus.)
[9] A.A. Sholomitckii`, A.L. Sotneykov, E.S. Pisanka Perspektivy` razvitiia distcipliny` «Nachertatel`naia geometriia» // MODERN MANUFACTURING: SCIENCE AND EDUCATION: Proceedings of the 3rd International Conference/ Edited by M.M. Radkevich and A.N. Yevgrafov. – SPb.: Polytechnic University Publishing, 2013. – 1205 p. Pp. 179-184. (rus.)
[10] A. Henshaw. How To Standardize College Course Numbers http://www.ehow.com/how_5859544_standardize-college-course-numbers.html

УДК 621.08

Д. И. Троицкий

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ТОКАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ЭТАПЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

Дмитрий Игоревич Троицкий, к.т.н., доцент
Тульский государственный университет
Россия, Тула
Тел.: (4872)351887, E-mail: dtroitsky@tsu.tula.ru.

Аннотация

В работе решена задача прогнозирования трудоемкости токарной обработки на этапе конструкторского проектирования с применением регрессионных уравнений, коэффициенты которых устанавливаются при проведении виртуальных экспериментов в CAM-системе.

Ключевые слова: токарная обработка, трудоемкость, регрессионная зависимость, CAM-система.

Введение. Одним из основных направлений дальнейшей автоматизации процессов конструкторско-технологической подготовки производства в настоящее время является обеспечение обратной связи между последующими и предыдущими этапами разработки изделия. Речь идет о передаче информации с производственного участка инженеру-технологу, а от технолога — конструктору. Подобная обратная связь необходима при возникновении несоответствий в проектных решениях и конфликтов профессиональных интересов между участниками процессов проектирования и изготовления изделия. Современные PLM-системы достаточно эффективно решают задачу обеспечения подобной обратной связи. Однако она действует только после возникновения и выявления несоответствия, позволяя избежать аналогичных ошибок в будущем, но не позволяя предотвращать их.

Постановка задачи. Для активного предотвращения несоответствий, выявляемых на последующих этапах разработки, необходимо наличие не просто обратной связи, а инструментов, позволяющих на n – 1-м этапе оценивать последствия принимаемых проектных решений с точки зрения $n-$го, n + 1-го… и всех последующих этапов. Таким образом, проектное решение не будет передаваться на последующий этап, если оно противоречит каким-либо ограничениям, накладываемым дальнейшими процессами подготовки производства.

В настоящей статье решается задача создания математической модели оценки трудоемкости токарной обработки на этапе конструирования изделия, когда технология его производства еще не разработана [7]. Наличие подобной модели, входными параметрами которой служит 3D-модель детали, позволяет конструктору с высокой точностью оценить основную составляющую трудоемкости — штучное время $T_{шт}$ и сравнить его с максимально допустимым $T_{шт}^{max}$, задаваемым руководителями проекта, исходя из экономических соображений. Если $T_{шт} < T_{шт}^{max}$, то принятое конструкторское проектное решение является пригодным для передачи на последующий этап. В противном случае трудоемкость слишком высока и от конструктора требуется пересмотреть конструкцию детали: изменить допуска, материал, требования к качеству поверхности и пр.

Следует отметить, что в реальной производственной практике экономические соображения играют главенствующую роль, поэтому в большинстве случаев руководством принимается решение именно о внесении изменений в конструкцию, а не о, скажем, замене имеющегося оборудования на новое, более производительное.

Входные параметры математической модели расчета трудоемкости. В основу предлагаемой математической модели положен метод регрессионного анализа, позволяющий выявить корреляционную зависимость между штучным временем и набором параметров детали. Корреляционную связь представляют в виде уравнения множественной регрессии (1):

$$T_{шт} = A \cdot P_1^{\alpha_1} \cdot P_2^{\alpha_2} \cdot ... \cdot P_n^{\alpha_n}, \quad (1)$$

где A – некоторая постоянная; P_1, P_2, … , P_n – технические параметры, учтенные в модели; $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n$ – показатели (коэффициенты), указывающие на степень влияния параметров P_n на величину штучного времени.

Спецификой токарной обработки является большое разнообразие инструмента, причем для каждого инструмента задается своя скорость резания. Поэтому для повышения точности необходим поэлементный расчет штучного времени как суммы времен выполнения технологических переходов. Так как все элементы представляют собой тела вращения, они в общем случае задаются диаметром D и длиной L. Кроме этого, конструктор назначает материал детали, имеющий ту или иную обрабатываемость. Наконец, для расчета штучного времени требуется знать подачу инструмента S и припуск на проход t.

Число проходов рассчитывается, исходя из габаритов заготовки, назначаемых путем увеличения максимальных габаритных размеров детали на величину припуска, определяемого нормативным методом в зависимости от заданного конструктором качества поверхности. Анализ

отраслевых и общероссийских стандартов (ГОСТ 7062-67, 7829-70, 1855-55, 2009-55 и др.), а также реально применяемых на предприятиях машиностроения методик расчета по нормативному методу позволил установить [8, 10], что общий припуск T на механическую обработку сортового металлопроката является дискретной функцией вида

$$T = f_1\left(N_T, S, K\right), \tag{2}$$

где S — номинальное значение обрабатываемого размера;

N_T — число переходов при обработке размера S;

K — вид размера S (диаметр, длина, внутреннее отверстие и т.д.)

В свою очередь, число переходов есть функция от параметров качества обрабатываемой поверхности:

$$N_T = f_2\left(K_V, R_a\right), \tag{3}$$

где K_v — квалитет точности обрабатываемого размера;

R_a — параметр шероховатости обрабатываемой поверхности.

На этапе конструкторского проектирования применим только нормативный метод назначения припусков [2], так как технологический процесс еще не разработан. Поэтому функции f_1 и f_2 являются дискретными и задаются таблично.

Из (2) и (3) видно, что общий припуск зависит от четырех конструктивных параметров: величины и вида обрабатываемого размера, требований к точности обработки и шероховатости обрабатываемой поверхности. Все эти параметры имеются на расширенной 3D-модели детали [6], включающей как геометрию модели, так и параметры качества ее поверхностей. Большинство современных CAD-систем поддерживают простановку шероховатости, размерных и геометрических допусков непосредственно на 3D-модель детали. Структура данных подобной расширенной 3D-модели для тела вращения показана на рис. 1.

Из литературы [3] известно, что трудоемкость механической обработки наиболее точно описывается степенной зависимостью. Тогда время обработки i-го элемента будет представлено как

$$T_i = a_0 \cdot D^{x_1} \cdot L^{x_2} \cdot S^{x_3} \cdot t^{x_4}, \tag{4}$$

где a_0 – коэффициент, учитывающий свойства материала детали;

$x_1 \ldots x_4$ — подлежащие определению степенные показатели регрессионной зависимости.

Таким образом, для расчета штучного времени регрессионным методом на этапе автоматизированного конструкторского проектирования имеются все необходимые исходные данные: геометрические (размеры), показатели качества поверхности (размерная точность и шероховатость), а также свойства материала.

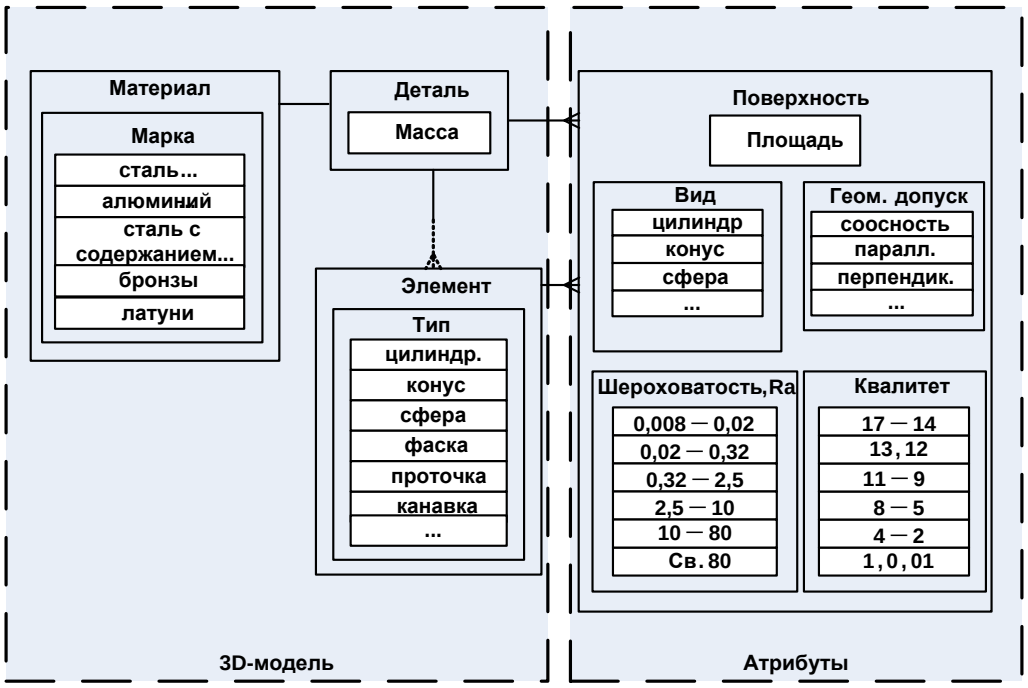


Рис. 1. Структура данных расширенной 3D-модели

Построение уравнения регрессии. Прологарифмируем уравнение (4)

$$lg\, T_i = lg\, a_0 + x_1 \cdot lg\, D + x_2 \cdot lg\, L + x_3 \cdot lg\, S + x_4 \cdot lg\, t\,. \tag{5}$$

Введем следующие обозначения:

$$lg\, T_i = F,\ lg\, a_0 = a'_0,\ lg\, D = U_1,\ lg\, L = U_2, lg\, S = U_3, lg\, t = U_4\,.$$

В результате исходное степенное уравнение можно представить в линейном виде, что позволяет значительно упростить последующие расчеты

$$F = a'_0 + x_1 \cdot U_1 + x_2 \cdot U_2 + x_3 \cdot U_3 + x_4 \cdot U_4\,, \tag{6}$$

Таким образом, получаем систему уравнений [9]:

$$\begin{cases} \sum F = n + x_1 \cdot \sum U_1 + x_2 \cdot \sum U_2 + x_3 \cdot \sum U_3 + x_4 \cdot \sum U_4 \\ \sum FU_1 = a'_0 \cdot \sum U_1 + x_1 \cdot \sum U_1^2 + x_2 \cdot \sum U_1U_2 + x_3 \cdot \sum U_1U_3 + x_4 \cdot \sum U_1U_4 \\ \sum FU_2 = a'_0 \cdot \sum U_2 + x_1 \cdot \sum U_1U_2 + x_2 \cdot \sum U_2^2 + x_3 \cdot \sum U_2U_3 + x_4 \cdot \sum U_2U_4 \\ \sum FU_3 = a'_0 \cdot \sum U_3 + x_1 \cdot \sum U_1U_3 + x_2 \cdot \sum U_3U_2 + x_3 \cdot \sum U_3^2 + x_4 \cdot \sum U_3U_4 \\ \sum FU_4 = a'_0 \cdot \sum U_4 + x_1 \cdot \sum U_1U_4 + x_2 \cdot \sum U_4U_2 + x_3 \cdot \sum U_4U_3 + x_4 \cdot \sum U_4^2 \end{cases}, \tag{7}$$

Неизвестные определяем с помощью следующих выражений:

$$
\begin{cases}
\sum F = \lg T_1 + \lg T_2 + ... + \lg T_n, \\
\sum U_1 = \lg D_1 + \lg D_2 + ... + \lg D_n, \\
\sum U_2 = \lg L_1 + \lg L_2 + ... + \lg L_n, \\
\sum U_3 = \lg S_1 + \lg S_2 + ... + \lg S_n, \\
\sum U_4 = \lg t_1 + \lg t_2 + ... + \lg t_n \\
\sum U_1^2 = (\lg D_1)^2 + (\lg D_2)^2 + ... + (\lg D_n)^2, \\
\sum U_2^2 = (\lg L_1)^2 + (\lg L_2)^2 + ... + (\lg L_n)^2, \\
\sum U_3^2 = (\lg S_1)^2 + (\lg S_2)^2 + ... + (\lg S_n)^2, \\
\sum U_3^2 = (\lg t_1)^2 + (\lg t_2)^2 + ... + (\lg t_n)
\end{cases}, \quad (8)
$$

$$
\begin{cases}
\sum FU_1 = \lg T \cdot \lg D_1 + \lg T \cdot \lg D_2 + ... \lg T \cdot \lg D_n, \\
\sum FU_1 = \lg T \cdot \lg D_1 + \lg T \cdot \lg D_2 + ... \lg T \cdot \lg D_n, \\
\sum FU_1 = \lg T \cdot \lg D_1 + \lg T \cdot \lg D_2 + ... \lg T \cdot \lg D_n, \\
\sum FU_1 = \lg T \cdot \lg D_1 + \lg T \cdot \lg D_2 + ... \lg T \cdot \lg D_n,
\end{cases}, \quad (9)
$$

$$
\begin{cases}
\sum U_1 U_2 = \lg D_1 \cdot \lg L_1 + \lg D_2 \cdot \lg L_2 + ... \lg D_n \cdot \lg L_n, \\
\sum U_1 U_3 = \lg D_1 \cdot \lg S_1 + \lg D_2 \cdot \lg S_2 + ... \lg D_n \cdot \lg S_n, \\
\sum U_1 U_4 = \lg D_1 \cdot \lg t_1 + \lg D_2 \cdot \lg t_2 + ... \lg D_n \cdot \lg t_n. \\
\sum U_2 U_3 = \lg S_1 \cdot \lg L_1 + \lg S_2 \cdot \lg L_2 + ... \lg S_n \cdot \lg L_n, \\
\sum U_2 U_4 = \lg L_1 \cdot \lg T_1 + \lg L_2 \cdot \lg T_2 + ... \lg L_n \cdot \lg T_n, \\
\sum U_3 U_4 = \lg S_1 \cdot \lg t_1 + \lg S_2 \cdot \lg t_2 + ... \lg S_n \cdot \lg t_n.
\end{cases} \quad (10)
$$

Решение системы уравнений представляет собой вектор значений переменных a_0 и $x_1 \ldots x_4$.

Проведение виртуальных экспериментов. Для получения конкретных численных значений коэффициентов уравнения (4) необходимо применить приведенную модель к достаточно большой и достоверной выборке данных, содержащих как конструктивные параметры деталей, так и значения штучного времени. Как показал анализ имеющейся на машиностроительных предприятиях документации, во многих случаях расчет трудоемкости выполняется недостоверно, содержит ошибки, не коррелирует со сложностью детали [4] и т.д. Поэтому реальные заводские данные в данном случае не могут служить достоверной исходной информацией.

Было предложено воспользоваться функционалов современных CAM-систем, выполняющих не только автоматизированную разработку

управляющих программ для станков с ЧПУ, но и моделирование такой обработки. В числе прочих параметров в результате моделирования определяется и время выполнения каждого перехода, причем оно точно соответствует реальному времени обработки при выполнении исследуемой управляющей программы на станке.

В настоящей работе в качестве инструмента моделирования применялась российская система СПРУТ-САМ. Рассматривались следующие основные конструктивные элементы деталей, получаемых точением: наружная цилиндрическая поверхность; наружная канавка; наружная резьба. Параметры каждого из этих элементов задавались в диапазонах, указанных в таблице.

Таблица

Параметры элементов токарной обработки

Элемент	Параметр	Мин. значение	Макс. значение	Шаг изменения параметра
Наружная цилиндрическая поверхность	Диаметр, мм	10	40	1
	Длина, мм	20	80	1
	Подача, мм/мин	100	200	10
	Припуск за проход, мм	0,2	1	0,1
Наружная канавка	Диаметр детали, мм	30	70	1
	Ширина канавки, мм	5	10	1
	Глубина канавки, мм	2	5	1
	Подача, мм/мин	100	300	10
	Припуск за проход, мм	0,1	0,2	0,1
Наружная резьба	Длина, мм	60	120	1
	Шаг, мм	1,5	3	0,5
	Число проходов	4	10	1

Во всех случаях материалом заготовки принималась сталь 40, частота вращения шпинделя — 600 мин$^{-1}$. В результате обработки полученных в виртуальных экспериментах величин штучного времени и применения выражений (6)-(10) были получены соответствующие регрессионные уравнения. Для сокращения объема статьи далее будет рассматриваться только один элемент — наружная цилиндрическая поверхность, штучное время обработки которой выражается следующей зависимостью:

$$T_i(D,L,S,t) = 10^{4,159} \cdot D^{2,001} \cdot L^{-1,094} \cdot S^{-1,074} \cdot t^{-0,963}. \qquad (11)$$

Проверка адекватности модели. Рассмотрим деталь, представляющую собой цилиндр диаметром 30 мм и длиной 60 мм. Будем использовать подачу 150 мм/мин, снимая за один проход 0,5 мм. Скорость вращения шпинделя принимаем равной 600 мин$^{-1}$. В качестве заготовки служит пруток диаметром 36 мм, т.е. припуск на сторону равен 3 мм.

Нормативный метод [5] дает результат 156,52 с. Расчет по уравнению (10) дает результат 144,27 с. Превышение на 8% является ожидаемым, так как нормативный метод по своей природе завышает показатель трудоемкости на 10…12%.

Заключение. Проведенное исследование показало, что на этапе разработки конструкторского проектного решения в расширенной 3D-модели детали содержится достаточный объем информации для поэлементного расчета штучного времени токарной обработки. Полученные регрессионные уравнения позволяют с достаточной точностью прогнозировать трудоемкость процессов точения. Дальнейшие исследования направлены на дальнейшее повышение точности математической модели и включение в нее новых конструктивных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабанов А.Н. Технологичность конструкции машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
2. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Калинин М.А. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении. Справочник технолога. М.: Машиностроение, 1976. – 288с.
3. Бухалков М.И. Организация и нормирование труда / Под ред. М.В. Мельник. — 2 изд., испр. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2008. – 416 с.
4. Троицкий Д.И. Количественная оценка сложности машиностроительных деталей / Оборудование и инструмент для профессионалов. №3, 2011. с. 62-65

5. Нормирование расхода материальных ресурсов в машиностроении: Справочник: В 2 т./Г.М. Покараев, А.А. Зайцев, О.В. Карасев и др.; Под общ. Ред. Г. М . Покараева и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 372с.: ил.
6. Новикова М.В., Троицкий Д.И. Интегрированная конструкторско-технологическая модель детали как средство оценки трудоемкости ее изготовления // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 1. С. 22
7. Yamnikova O.A., Troitsky D.I., Balasheva Yu.V. Evaluating the Design of Parts in the Form of Solids of Revolution // Russian Engineering Research. 2008. Т. 28. № 9. С. 910-912.
8. Троицкий Д.И. Выбор стратегий формирования размерного ряда металлопроката в заготовительном производстве // Заготовительные производства в машиностроении. №5, 2006. С. 50-53
9. Troitsky D.I., Inozemtsev A.N., Novikova M.V. Manufacturability Analysis in Intelligent CAD Systems // 10th International Conference Computer Graphics and Artificial Intelligence. Proceedings of the Conference. Athens, Greece, 2007. Pp. 295-298
10. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н., Троицкий Д.И. Материальное нормирование на базе интегрированной компьютеризированной системы // Техника машиностроения, №4(22), 1999, с.33-37

D.I.Troitsky

MODULAR-BASED EDUCATION IN THE COMPUTER-AIDED DESIGN DOMAIN

Tula State University, Russia.

Abstract

The paper proposes a turning time evaluation model used at the design stage of product lifecycle. The model is based on the regression equation obtained by virtual experiments performed in a CAD system.

Key words: turning, machining time, regression equation, CAM system

REFERENCES

[1] Balabanov A.N. Tekhnologichnost` konstruktcii mashin. – M.: Mashinostroyenie, 1987. – 336 p. (rus.)
[2] Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K., Kalinin M.A. Tochnost` obrabotki, zagotovki i pripuski v mashinostroenii. Spravochnik tekhnologa. M., Mashinostroenie, 1976. – 288 p. (rus.)

[3] Bukhalkov M.I. Organizatciia i normirovanie truda / Edited by M.V. Melnik. — 2nd edition, revised. — M.: INFRA-M, 2008. – 416 p. (rus.)
[4] Troitsky D.I. Kolichestvennaia ocenka slozhnosti mashinostroitelnykh detalei / Oborudovanie i instrument dlia professionalov. No. 3, 2011. pp. 62-65. (rus.)
[5] Normirovanie rashoda material`ny`kh resursov v mashinostroenii: Spravochnik: V 2 t./G.M. Pokaraev, A.A. Zaitsev, O.V. Karasev et al.; Edited by G. M . Pokaraev et al. – M.: Mashinostroyenie, 1988. – 372 p. (rus.)
[6] Novikova M.V., Troitsky D.I. Integrirovannaia konstruktorsko-tekhnologicheskaia model` detali kak sredstvo ocenki trudoemkosti ee izgotovleniia // Vestneyk kompiuternykh i informatcionny`kh tekhnologii. 2006. No 1. p. 22. (rus.)
[7] Yamnikova O.A., Troitsky D.I., Balasheva Yu.V. Evaluating the Design of Parts in the Form of Solids of Revolution // Russian Engineering Research. 2008. Т. 28. № 9. С. 910-912.
[8] Troitsky D.I. Vy`bor strategii` formirovaniia razmernogo riada metalloprokata v zagotovitel`nom proizvodstve // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. No. 5, 2006. pp. 50-53. (rus.)
[9] Troitsky D.I., Inozemtsev A.N., Novikova M.V. Manufacturability Analysis in Intelligent CAD Systems // 10th International Conference Computer Graphics and Artificial Intelligence. Proceedings of the Conference. Athens, Greece, 2007. Pp. 295-298. (rus.)
[10] Antsev V.Iu., Inozemtsev A.N., Troitsky D.I. Materialnoe normirovanie na baze integrirovannoi kompiuterizirovannoi sistemy // Tekhnika mashinostroeniia, No. 4(22), 1999, pp.33-37. (rus.)

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621:658.512:65.011.56

К.П. Помпеев

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ В ЦЕНТРАХ

Кирилл Павлович Помпеев, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kirpom@rambler.ru

Аннотация

Рассматриваются особенности применения методики размерно-точностного анализа технологических процессов изготовления валов в центрах. Описаны особенности методики составления схем биений для этого случая с учетом соблюдения принципа постоянства баз, а также наличия погрешности предварительной зацентровки исходных заготовок валов.

Ключевые слова: размерно-точностной анализ, изготовление валов в центрах, схема биений, принцип постоянства баз, погрешность центрирования заготовки.

В условиях автоматизированного производства, при автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) и при постоянном повышении требований к качеству проектных решений особенно актуальным становится решение задачи формализации и алгоритмизации процесса проектирования ТП механической обработки, что в свою очередь предполагает дальнейшее развитие теории и методологии проектирования, предопределяющих дальнейшее развитие и совершенствование базы технических знаний [1].

Одним из важных этапов ТПП является проведение размерно-точностного анализа при проектировании маршрутных технологий [2], позволяющий оценить точность основных выходных параметров ТП, а также точность ТП в целом [3]. Проведение размерно-точностного анализа позволяет проектировать надежные технологии, гарантирующие при их реализации обеспечение заданной точности размеров и технических требований чертежа. От тщательности проведения размерно-точностного анализа значительно зависит снижение материальных и временных затрат на последующую отработку и внедрение спроектированных технологий в производство по результатам опытных и установочных партий [2, 4].

В основу размерно-точностного анализа (РТА) маршрутных ТП изготовления деталей типа тел вращения положена разработанная в СЗТУ методика, которая подробно изложена в [5] и [6]. При этом в [5] были уточнены некоторые формулировки, использованные в [6] для описания этой методики. Поэтому в своих дальнейших рассуждениях будем опираться на представленное в [5] описание методики РТА маршрутных ТП.

Целями проведения РТА маршрутных ТП являются:

- расчет (определение) всех операционных размеров и припусков на обработку;

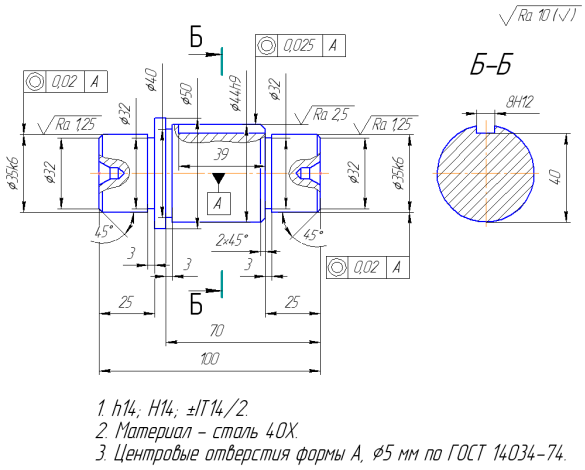
- анализ возможности выполнения конструкторских размеров и технических требований взаимного расположения элементов с заданной точностью на выбранном оборудовании автоматически при установке заготовки без выверки или с применением выверки.

Для деталей типа тел вращения, к которым относятся валы, согласно методике, представленной в [5], проведение РТА ТП неразрывно связано с синтезом соответствующих схем линейных размеров и схем биений.

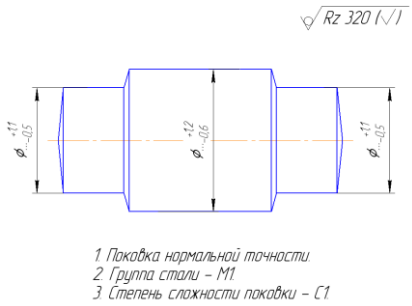
Схемы линейных размеров разрабатываются с целью анализа возможности обеспечения точности конструкторских размеров, расчета линейных операционных размеров и припусков на обработку. Целями разработки схем биений, возникающих при реализации ТП, являются: проверка возможности выполнения технических требований взаимного расположения (ТВР) элементов вращения; определение неравномерности припусков; расчет диаметральных операционных размеров и припусков на обработку.

Если проведение РТА ТП изготовления валов в центрах для линейных размеров ничем не отличается от описанной в [5] общей методики РТА, то для элементов вращения она имеет некоторые особенности, которые не освещены в указанной литературе. Проиллюстрируем это на примере ТП изготовления в центрах детали «Валик», чертеж и операционные комплексы (ОК) которого представлены на рис. 1. В предлагаемом ТП изготовления детали «Валик» на операции 010 проводится подготовка баз (центровых отверстий) для последующей обработки заготовки в центрах на операциях 015, 020, 025 и 030. При этом на обеспечение ТВР поверхностей (элементов) вращения, указанных на чертеже детали, оказывают влияние операции 010, 015, 020, 025 и 030, а операция 035 на это не влияет.

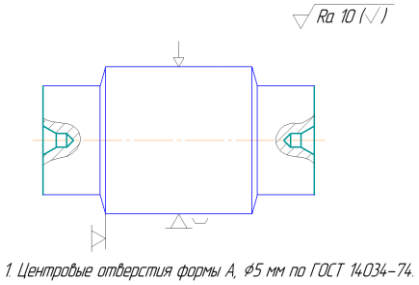
Сначала разработаем схему биений (см. рис. 2, *а*) в полном соответствии с представленной в [5] методикой, согласно которой все обрабатываемые элементы имеют свой уникальный номер. Его первая цифра (первые две цифры) соответствует номеру элемента в структуре Т-системы «Деталь» (ТСД), а последняя цифра обозначает его состояние в Т-системе «Заготовка» (ТСЗ).



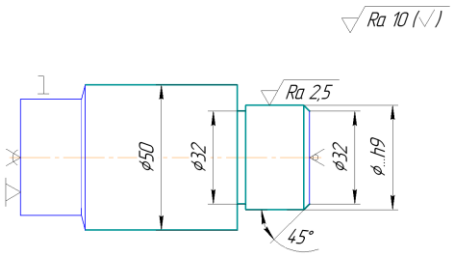
Операция 005 (ОК1)



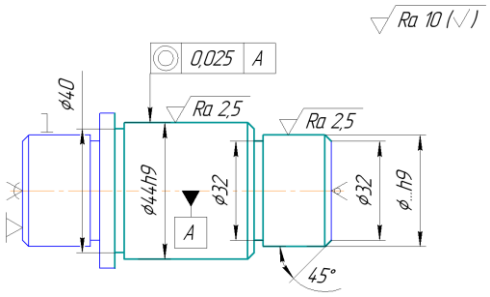
Операция 010 (ОК2)



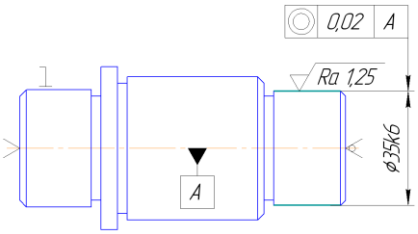
Операция 015 (ОК3)



Операция 020 (ОК4)



Операция 025 (ОК5)



Операция 030 (ОК6)

Операция 035 (ОК7)

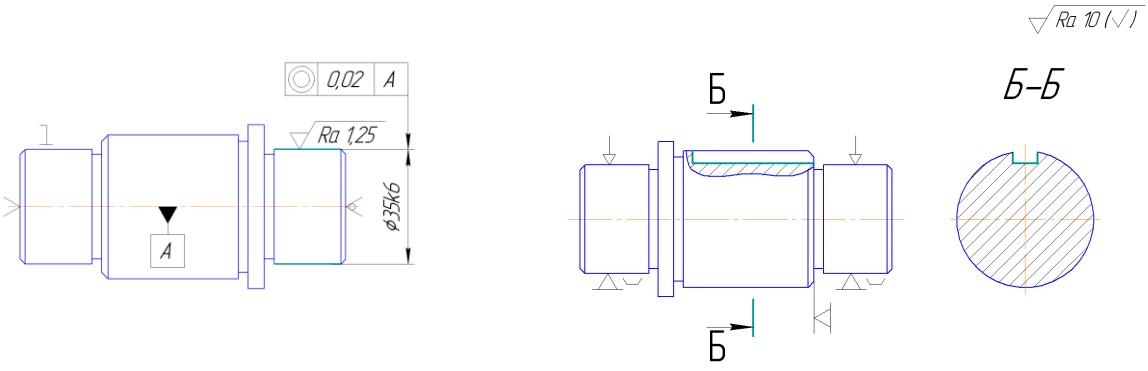
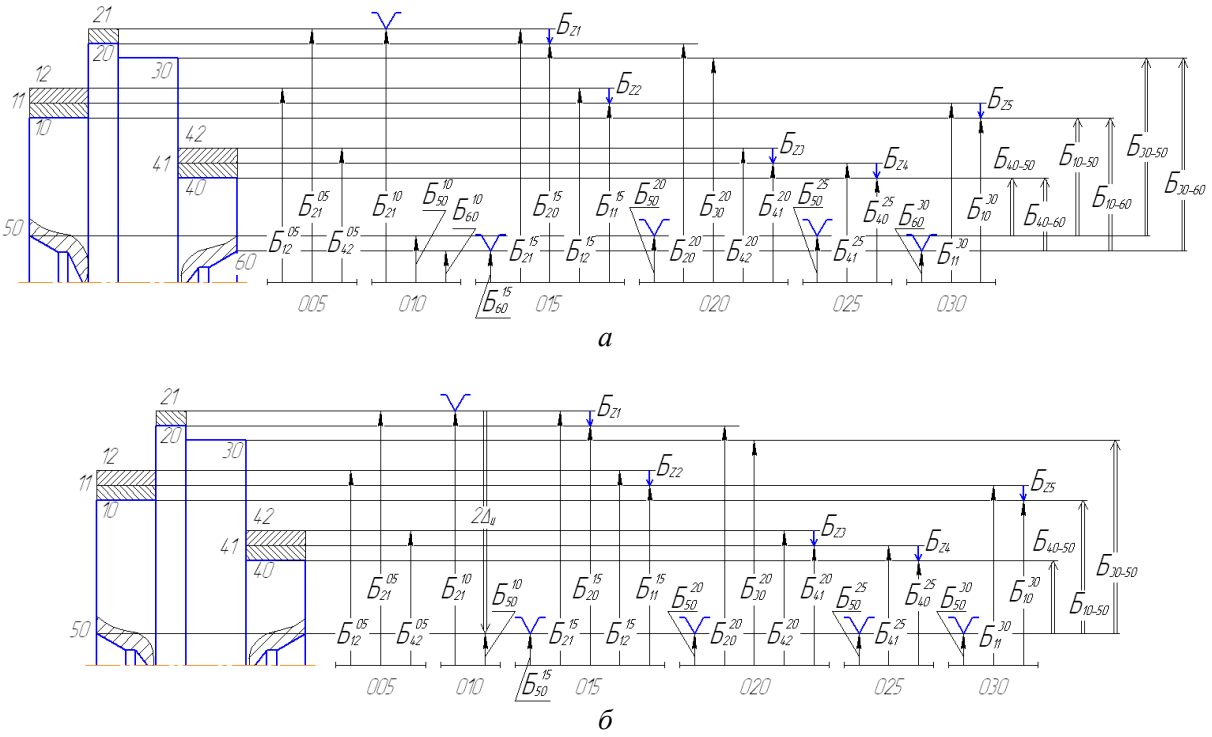


Рис. 1 – Чертеж детали «Валик» и операционные комплексы его изготовления с использованием центров

В этой методике принято, что если последняя цифра номера элемента «ноль», то это соответствует его окончательному состоянию. Поэтому левое и правое центровые отверстия обозначены на схеме биений номерами 50 и 60 соответственно.



а

б

Рис. 2 – Варианты схем биений: *а* – исходный; *б* – окончательный

Анализируя представленную схему биений, видим, что при смене стороны обработки происходит смена баз. Это также подтверждается уравнениями биений обрабатываемых элементов вращения 12 и 42, возникающих на операциях 015 и 020 соответственно. Согласно представленной в [5] методике биение каждого обрабатываемого элемента вращения определяется способом геометрического суммирования допусков составляющих биений, так как искомое и составляющие биения являются векторами, а их номинальные значения равны нулю. Итак, уравнения биений обрабатываемых элементов вращения 12 и 42 соответственно на операциях 015 и 020 выглядят следующим образом:

$$\acute{A}_{12}^{15} = \sqrt{\left(\acute{A}_{60}^{15}\right)^2 + \left(\acute{A}_{60}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{12}^{05}\right)^2} \qquad (1)$$

и

$$\acute{A}_{42}^{20} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{20}\right)^2 + \left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{42}^{05}\right)^2} . \qquad (2)$$

В уравнении (1) в качестве одного из составляющих звеньев цепи биений используется биение базовой поверхности 60 (см. рис. 2, *а*), возни-

кающее при установке заготовки на операции 015, а в уравнении (2) в качестве одного из составляющих звеньев цепи биений используется биение базовой поверхности 50, возникающее при установке заготовки на операции 020, то есть биение другой базовой поверхности, находящейся в структуре ТСЗ с другой стороны заготовки.

В действительности смена стороны обработки для элементов вращения не приводит к смене баз, так как базой обрабатываемой заготовки является ось центров, а центровые фаски при их одновременной подготовке на фрезерно-центровочном станке, пример обработки которых представлен на рис. 3, по сути, имеют общую ось, то есть в случае изготовления валов в центрах соблюдается принцип постоянства баз [7].

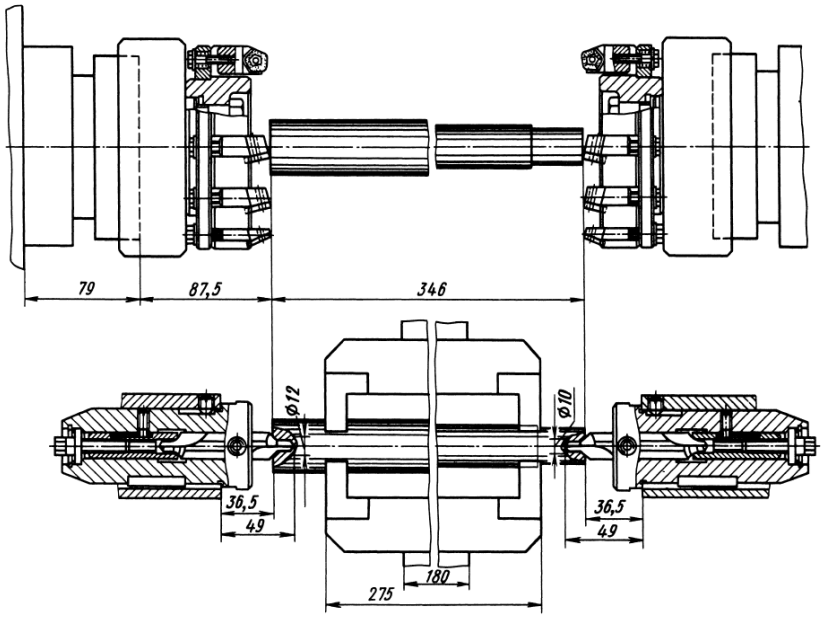


Рис. 3 – Пример наладки фрезерно-центровочного станка [8]

Таким образом, возникает противоречие: формально имеется смена баз, а фактически ее нет. Устранить это противоречие можно рассматривая центровые фаски (отверстия) как единый элемент (см. рис. 2, *б*, элемент номер 50). При этом в два раза уменьшается количество векторов технических ТВР элементов вращения, по расчетным величинам которых проверяется возможность выполнения соответствующих технических требований чертежа.

Далее анализируя структуру биений, возникающих на операции 010 (см. рис. 2, *а*), и перечень формул, приведенных [8] в разделе «Правила расчета припусков на обработку», а также используя известное из [9] соотношение биения поверхности вращения и смещения ее оси (***Б***=2***е***), напрашивается вывод, что биения центровых отверстий (элементов 50 и 60) после их сверления могут быть определены единственным образом, а именно:

$$\acute{A}_i^j = 2\Delta_\Sigma . \quad (4)$$

При этом суммарные отклонения Δ_Σ после сверления отверстия, согласно [8], определяются по следующей формуле:

$$\Delta_\Sigma = \sqrt{(\Delta_o l)^2 + C_O^2} . \quad (5)$$

где $\Delta_У$ – значение увода оси сверла, мкм на 1 мм;

l – длина просверливаемого отверстия, мм;

C_O – смещение оси отверстия, мкм.

Увод оси сверла и смещение оси отверстия при обработке спиральными и специальными сверлами определяются по справочным данным, представленным в [8]. Однако если сравнить между собой центровочное сверло и спиральное сверло с цилиндрическим хвостовиком, имеющих одинаковый диаметр рабочей части, с точки зрения их конструкции, то становится очевидным, что центровочное сверло обладает большей жесткостью, так как длина его рабочей части значительно меньше, а диаметр хвостовика в несколько раз больше. Поэтому использование формул (4) и (5), а также справочных данных, для этого случая некорректно.

Исходя из этого следует, что в рассматриваемом случае мы имеем тупиковую ситуацию. Однако это не так. Этот кажущийся тупик, во-первых косвенно подтверждает необходимость рассматривать центровые фаски как единый элемент, а во-вторых естественным образом приводит к мысли о необходимости учитывать погрешность зацентровки заготовки.

С учетом этого и был разработан окончательный вариант схемы биений, представленный на рис. 2, *б*. Поэтому на схеме биений появился вектор биения центровых фасок (единого элемента под номером 50) относительно базовой поверхности (элемента под номером 21), который обозначен как $2\Delta_Ц$. То есть в подобных случаях с учетом вышеупомянутого соотношения $Б=2e$ этот вектор биения рассматривается как удвоенное смещение оси фасок в результате погрешности центрирования заготовки. Используя схему биений его можно определить следующим образом:

$$2\Delta_{\ddot{o}} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2} . \quad (6)$$

$$\text{Отсюда } \left(2\Delta_{\ddot{o}}\right)^2 = \left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2 . \quad (7)$$

При этом уравнения биений обрабатываемых элементов вращения 12 и 42 соответственно на операциях 015 и 020 будут выглядеть следующим образом:

$$\acute{A}_{12}^{15} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{15}\right)^2 + \left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{12}^{05}\right)^2} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{15}\right)^2 + \left(2\Delta_{\ddot{o}}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{12}^{05}\right)^2}$$

и

$$\acute{A}_{42}^{20} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{20}\right)^2 + \left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{42}^{05}\right)^2} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{20}\right)^2 + \left(2\Delta_{\ddot{o}}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{05}\right)^2 + \left(\acute{A}_{42}^{05}\right)^2}.$$

Аналогично $\acute{A}_{21}^{15} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{15}\right)^2 + \left(\acute{A}_{50}^{10}\right)^2 + \left(\acute{A}_{21}^{10}\right)^2} = \sqrt{\left(\acute{A}_{50}^{15}\right)^2 + \left(2\Delta_{\ddot{o}}\right)^2}$.

Согласно [8] погрешность зацентровки $\Delta_{\textit{Ц}}$ – смещение оси заготовки в результате погрешности центрирования относительно базы заготовки, использованной при центрировании, определяется по следующей формуле:

$$\Delta_{\ddot{o}} = 0{,}25\sqrt{\grave{O}^2 + 1}, \qquad (8)$$

где $\boldsymbol{T}$ – допуск на диаметральный размер базы заготовки, использованной при центрировании, мм.

Таким образом, при наличии связующего вектора биения $\Delta_{\textit{Ц}}$ между векторами биений базовой поверхности и центровых отверстий на фрезерно-центровочной операции и возможности определения его величины по формуле (8) отпадает необходимость определения величин последних. То есть в рассматриваемом случае при определении состава цепей биений, замыкающими звеньями которых являются биения обрабатываемых поверхностей номеров 12 и 42 на операциях 015 и 020 соответственно, переход с операции 015 или 020 на операцию 005 через операцию 010 осуществляется непосредственно через связующий вектор биения $\Delta_{\textit{Ц}}$.

Биения базовых поверхностей при установке заготовки в центрах определяют по формуле

$$\acute{A}_i^j = 2\left(a_3\sqrt{D} + bL\right), \qquad (9)$$

где $\boldsymbol{D}$ – диаметр центровой фаски;

$\boldsymbol{L}$ – общая длина заготовки;

$\boldsymbol{a_3}$ и $\boldsymbol{b}$ – коэффициенты, зависящие от точности установки: $\boldsymbol{a_3}$ = 0,006 и $\boldsymbol{b}$ = 0,00005 – нормальная точность установки, $\boldsymbol{a_3}$ = 0,0018 и $\boldsymbol{b}$ = 0,000015 – повышенная точность установки, $\boldsymbol{a_3}$ = 0,0009 и $\boldsymbol{b}$ = 0,000007 – высокая точность установки.

Для рассматриваемого ТП изготовления детали «Валик» по формуле (9) определяются биения центровых фасок (единого элемента под номером 50) на операциях 015, 020, 025 и 030 (см. рис. 2, *б*).

В остальном расчет величин биений элементов исходной заготовки, биений обрабатываемых и обработанных элементов относительно базы обработки и между собой, расчет неравномерности припусков и проверка возможности выполнения технических ТВР элементов вращения при выбранных системах базирования и на выбранных приспособлениях, а также расчет промежуточных диаметральных размеров осуществляются в полном соответствии с методикой РТА маршрутных ТП, описанной в [5], формализованное представление которой дано в [10].

Указанные выше особенности составления схем биений и их расчета являются основой формализации процесса размерно-точностного анализа ТП изготовления валов в центрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов В.А. О роли методологии в развитии технических знаний и обучении // В.А. Клевцов, В.В. Максаров. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 109-117. – 1205 с. – ISSN 2223-0807.
2. Помпеев К.П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 600-609. – 1205 с. – ISSN 2223-0807.
3. САПР изделий и технологических процессов в машиностроении / Р.А. Аллик, [и др.]; под общ. ред. Р.А. Аллика. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 319 с.
4. Помпеев К.П. Интерактивный синтез и расчет биений / К.П. Помпеев, Э.Е. Лазарев, Д.С. Пинаев // Труды десятой сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», посвященной памяти В.П. Булатова, VPB-11, 24-28 октября 2011 г. – СПб.: ИПМаш РАН, 2011. – С. 334-340.
5. Валетов В.А. Технология приборостроения. Учеб. пособие / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
6. Основы технологии машиностроения: Учеб. пособие / А.Е. Вороненко [и др.]. – СПб.: СЗТУ, 2010. – 210 с.
7. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.
9. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
10. Помпеев К.П. Формализация анализа возможности выполнения технических требований чертежа и расчета диаметральных размеров // Машиностроение и автоматизация производства: межвуз. сб. – СПб.: СЗПИ, 1993. – С. 25-30.

K.P.Pompeev

SPECIFICS OF PRECISION DIMENSIONAL ANALYSIS OF SHAFTS MAKING TECHNOLOGIES IN BENCH CENTERS

SPb National Research University Information Technology,
Mechanics and Optics, Russia, St. Petersburg

Abstract

This article deals with specifics of precision dimensional analysis of manufacturing processes application for making shafts in bench centers. It described the specifics of drawing up methodology of rotational errors diagram for this case with a glance of basis constancy principle compliance and also with a presence of preliminary centered blanks errors of shafts.

Key words: precision dimensional analysis, making shafts using bench centers, rotational errors diagram, basis constancy principle, the errors of centered blank.

REFERENCES

[1] Klevtsov, V.A. O roli metodologii v rasvitii tekhnicheskikh znaniy i obuchenii // V.A. Klevtzov, V.V. Maksarov. Materialy 3-ey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrasovanie». – SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo Universiteta. 2013. – P. 109-117. – 1205 p. – ISSN 2223-0807. (rus.)

[2] Pompeev, K.P. Rasmerno-tochnostnoy analis pri avtomatisirovannom proektirovanii nadezhnykh tekhnologiy // Materialy 3-ey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrasovanie». – SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo Universiteta. 2013. – P. 600-609. – 1205 p. – ISSN 2223-0807. (rus.)

[3] SAPR isdeliy i tekhnologicheskikh prozessov v mashinostroenii / R.A. Allik, [i dr.]; pod obshch. red. R.A. Allika. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1986. – 319 p. (rus.)

[4] Pompeev, K.P. Interaktivnuy sintes i raschet bieniy / K.P. Pompeev, E'.E. Lasarev, D.S. Pinaev. // Trudy desyatoy sessii Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly «Fundamental'nye i prikladnye problemy nadezhnosti i diagnostiki mashin i makhanizmov», posvyashchennoy pamyati V.P. Bulatova, VPB-11, 24-28 oktyabrya 2011 g. – SPb.: IPMash RAN, 2011. – P. 334-340. (rus.)

[5] Valetov, V.A. Tekhnologiya priborostroeniya. Ucheb. posobie / V.A. Valetov, K.P. Pompeev. – SPb.: NIU ITMO, 2013. – 234 p. (rus.)
[6] Osnovy tekhnologii mashinostroeniya: Ucheb. posobie / A.E. Voronenko [i dr.]. – SPb.: SZTU, 2010. – 210 p. (rus.)
[7] Matalin, A.A. Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov. – 3-e izd., ster. – SPb.: Lan', 2010. – 512 p. (rus.)
[8] Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2-ch t. T.1 / Pod red. A.M. Dal'skogo, A.G. Kosilovoy, R.K. Meshcheryakova, A.G. Suslova. – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie-1, 2001. – 912 p. (rus.)
[9] Ivashchenko, I.A. Tekhnologicheskie razmernye raschety i sposoby ich avtomatizatsii. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 222 p. (rus.)
[10] Pompeev, K.P. Formalisatsiya analiza vozmozhnosti vypolneniya tekhnicheskikh trebovaniy chertezha i rascheta diametral'nykh rasmerov // Mashinostroenie i avtomatizatsiya proisvodstva: mezhvuz. sb. – SPb.: SZPI, 1993. P. 25-30. (rus.)

УДК 621.431

С.Н. Степанов[1], Н.Ю. Видинеева[2].

МИКРОГЕОМЕТРИЯ ЗЕРКАЛА ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЯ 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 микрогеометрии поверхности зеркала цилиндра двигателя внутреннего сгорания и моторесурса до капитального ремонта. Результаты показали, что качество блока цилиндров двигателя 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.

Исследования, направленные на повышение моторесурса, снижения содержания CO и других вредных соединений в выхлопных газах, проводятся при использовании разных методов, но для достижении одной цели.

Ниже приведен список наиболее распространенных методов с помощью которых исследователи пытаются добиться увеличения моторесурса двигателя:

- уменьшение деформации блока цилиндров за счет увеличения его жесткости. Тем самым достигается уменьшение зазоров в паре трения поршневое кольцо – цилиндр, улучшается процесс приработки;

- применение специальных моторных масел, которые лучше удерживаются на поверхностях, участвующих в процессе трения при работе двигателя, и имеют повышенную (по сравнению с обычными маслами) температуру сгорания;
- нанесение антифрикционных покрытий, что уменьшает коэффициент трения;
- управление микрогеометрией поверхностей, участвующих в процессе трения.

Все вышеперечисленные методы в той или иной степени дают положительные результаты, но именно последний метод дает наибольший эффект. Поэтому остановимся на нем подробнее.

Для наиболее полного и наглядного понимания преимуществ этого метода, рассмотрим процессы, происходящие при длительной работе двигателя.

Приведенный ниже график (рис.1) показывает характер износа поверхности цилиндра (вопросы, связанные с износом поршневого кольца здесь не рассматриваются) при работе двигателя. Кривая износа трущихся поверхностей наглядно показывает зависимость износа поверхностей (в данном случае поверхности цилиндра) от пробега автомобиля или от времени его работы.

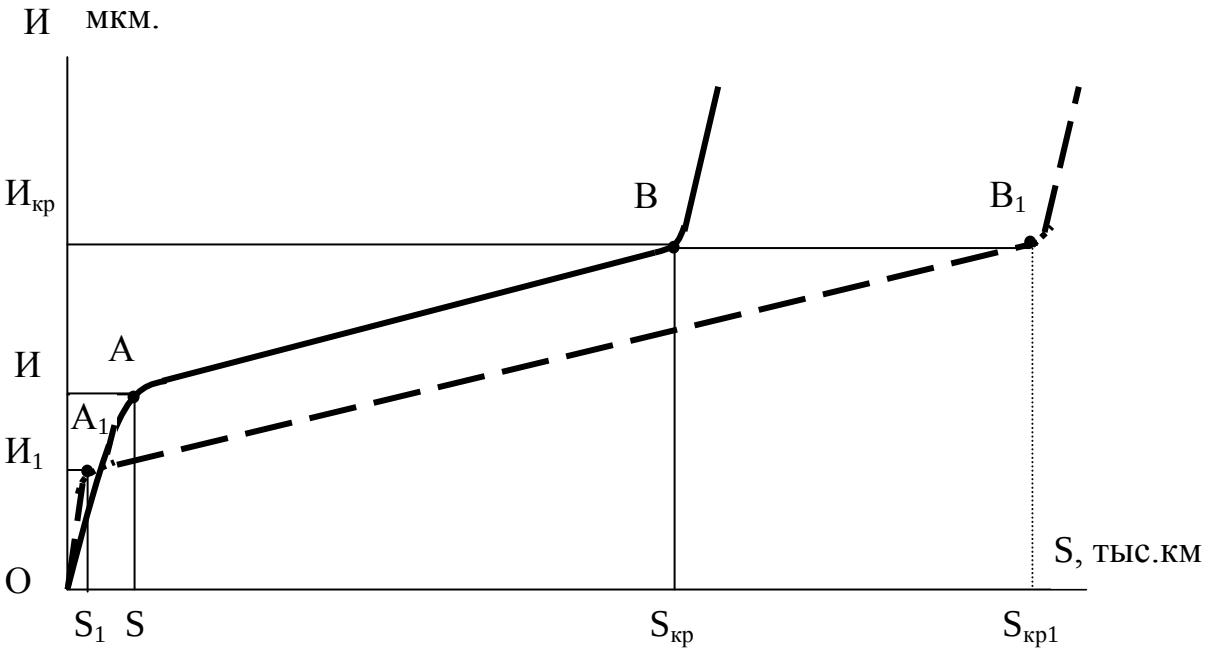


Рис. 1. Зависимость износа цилиндра от пробега автомобиля.

Из практики оценки двигателей, работавших длительное время известно, что любая хорошо приработанная поверхность трущейся детали имеет вид «плато» и так называемых «масляных карманов» чередующихся между собой.

Стоит заметить также, что платовершинный профиль, получаемый в процессе приработки, не зависит от метода обработки поверхности в процессе изготовления детали. До недавнего времени внутренняя поверхность цилиндров блока, после окончательной операции – хонингования, имела равновершинный рельеф. В процессе приработки «выступы» микрорельефа срезаются или сминаются, тем самым образуя платовершинный профиль. При этом происходит повышенный износ деталей трущейся пары. На графике этот процесс обозначен отрезком ОА кривой износа. При достижении оптимального, для данной пары трения, микрорельефа процесс износа резко замедляется и на протяжении последующего длительного пробега имеет малый прирост отрезок АВ на графике рис.1.

Наконец, износ достигает критической величины (на графике точка В) и его прирост снова возрастает. Между поршневым кольцом и цилиндром зазоры увеличиваются, снижается компрессия, как следствие снижается мощность двигателя.

Увеличивается угар масла, так как под действием вакуума оно через увеличенный зазор попадает в рабочее пространство и сгорает там. Двигатель начинает «дымить», и приходит в негодность для дальнейшей эксплуатации.

Впервые на отечественных автомобилях ОАО АвтоВАЗа поверхность цилиндров двигателя предварительно, т.е. в процессе механической обработки, приобрела платовершинный профиль на моделях ВАЗ 1111 и ВАЗ 2110. Была применена технология платовершинного хонингования.

В этом случае, уже в начале работы, поверхность цилиндра имеет микропрофиль максимально приближенный к оптимальному. Приработочный износ, который происходит потому, что каждая пара трения стремиться достигнуть своего собственного оптимального платовершинного профиля, будет намного меньше (отрезок $ОА_1$). Меньшая величина приработочного износа означает меньшие зазоры между поршневым кольцом и цилиндром, лучшую компрессию, меньший угар масла и т.д. Но самое важное, что увеличивается моторесурс двигателя, т.к. увеличивается разница между приработочным износом (на графике точка $А_1$, износ $И_1$) и износом критическим (точка $В_1$, износ $И_{кр}$). Таким образом при использовании технологии платовершинного хонингования цилиндров двигателя мы имеем два важных преимущества. Первое – уменьшение времени приработки, второе – увеличение моторесурса двигателя.

В процессе изучения конструкторско-технологической документации ряда предприятий производителей двигателей внутреннего сгорания, изучения зарубежного опыта выявлено:

1. Отставание на отечественных предприятиях нормативно-технической и измерительной базы в области обработки параметров микро и макрогеометрии поверхности гильз от мирового уровня.

2. Интерес конструкторов и технологов к использованию методов и средств контроля параметров зеркала цилиндра блоков цилиндров двигателей и гильз для совершенствования требований КТД при проведении мероприятий повышения долговечности двигателей.
3. Повышение долговечности двигателей за счет отработки параметров микро и макрогеометрии, линейных размеров, физических свойств и структуры контактной группы: гильза (блок цилиндров) –кольца – поршень, а также влияние условий сборки двигателей на изменение микрогеометрии контактной группы.

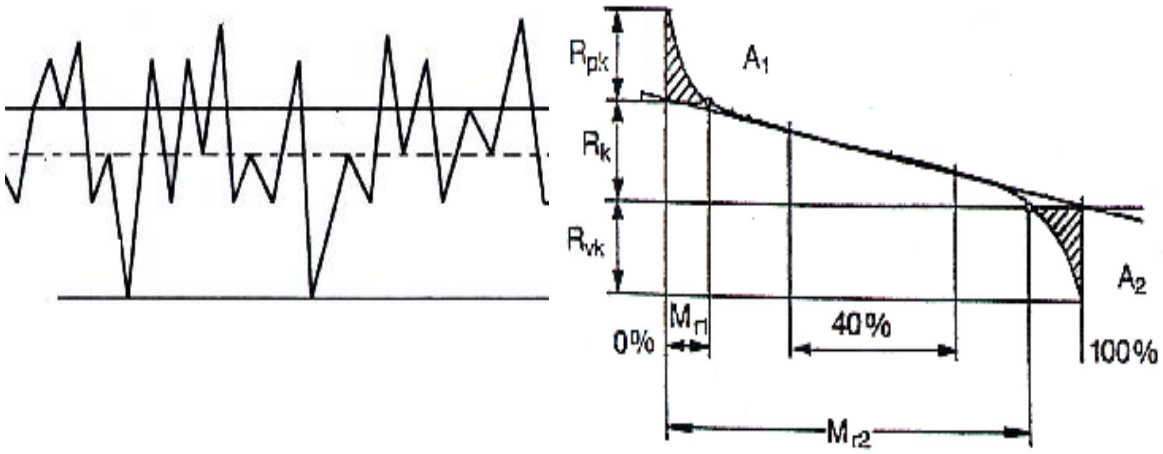


Рис. 2. Семейство R_k параметров

Изучение мирового опыта контроля качества обработки внутренней поверхности гильз и блоков цилиндров после плато-хонингования позволяет дать следующие рекомендации, направленные на повышение долговечности двигателей внутреннего сгорания:

1. Практически все фирмы, производящие двигатели внутреннего сгорания Западной Европы, Америки и Японии контролируют параметр цилиндричности.
2. Большинство фирм применяют стандарт ISO 13565-2:1998 контроля семейства параметров Rk (рис. 2.)
3. Наиболее широко используются приборы двух фирм:

- стационарные приборы контроля шероховатости параметра Rk - фирмы “Рунк Тейлор Хобсон” Англия – ведущей фирмы в области контроля микро и макрогеометрии обработанных поверхностей и разработчика основных стандартов ISO по этим направлениям;
- фирмы «Mahr» Германия, производящей переносные приборы контроля как гильз в свободном состоянии, запрессованных в блок цилиндров, затянутых при монтаже головки цилиндров, так и блоков цилиндров.

4. Наработаны вопросы создания аналогичных приборов отечественными научно-производственными предприятиями с привлечением опыта и возможностей предприятий ВПК.

В помощь автомобильной промышленности для оценки поверхностей, подвергаемых плато-хонингованию (внутренняя поверхность гильз блоков цилиндров), эксперты – метрологи и европейские производители измерительных средств разработали значения параметров Rk таких поверхностей:

- верхняя часть поверхности, которая будет быстро изнашиваться, как только двигатель начинает работать. Она известна как сокращенная высота пиков Rpk;
- часть поверхности, находящейся в работе длительное время, и которая влияет на ресурс двигателя. Она известна как Сердцевина шероховатости Rk;
- часть поверхности, содержащая глубокие маслосодержащие желоба (впадины), которые остались после черновой обработки, Она известна как сокращенная глубина впадин Rvk;
- материал детали Mr_1 и Mr_2 (в %) определяется точкой перегиба, совмещенной с верхней и нижней границами Сердцевины шероховатости профиля;
- маслоемкости канавок, полученных в результате операции хонингования

  V0 = Rvk(100-Mr2)/200. Объем наполнения, задержания;
- зона выступов наполнения материалом A_1 и зона впадин наполнения маслом A_2.

Параметр Vo используется для определения маслозадерживающего объема поверхности на выбранной опорной площадке (зоне). Оценка требует определения этой зоны, ограниченной кривой опорного отношения (рис.3) при помощи базового уровня и опорной поверхности. Базовый уро-

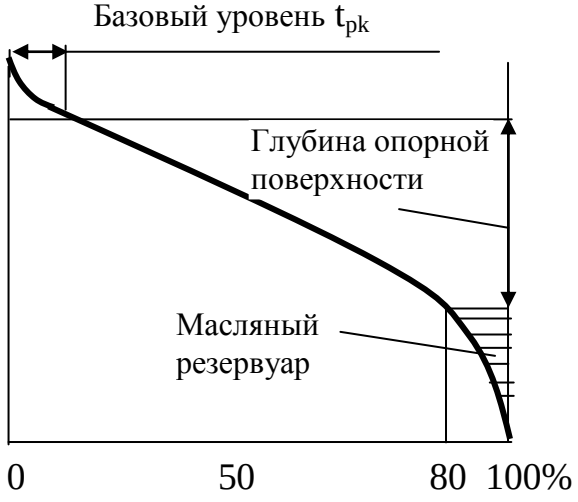


Рис. 3. Определение маслозадерживающего объема.

вень tp% определяет уровень tp%. Этот метод дает возможность исключить нежелательные данные из результирующей оценки. При этом значения могут быть представлены только в метрических единицах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов С.Н, Тарасов С.Б., Видинеева Н.Ю Диагностика, ремонт и обслуживание автомобилей: учебное пособие. Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург. 2010.
2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург. 2007.
3. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, применяемые методы и приборы. Под ред. Мышкина Н.К. Московская обл.: Издательство Дом «Интеллект», 2009.
4. 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.
5. Krystek M.P. ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement. Berlin: Beuth-Verlag; 2010.
6. Learn R. The Measurement of Surface Texture using Stylus Instruments. Measurement Good Practice Guide № 37. National Physical Laboratory Tedolington, Middlesex, United Kingdom. 2001.
7. Mummery L. Surface Texture Analysis. The Handbook. Hommelwerke GmbH. West Germany. 1990.
8. Sander M. A. Practical Guide to the Assessment of Surface Texture. Feinpriit Perthen GmbH.
9. Tabenkin A. Surface Finish Measurement Basics. Magazine Quality 101. USA.2004.
10. Tabenkin A. To Each This Own Parameter. Quality Digest, USA, 2001.
11. Tabenkin A. ABCs of Rz. Quality Magazine USA, 2007.

S.N. Stepanov, N.U.Vidineeva

MICROGEOMETRY OF THE MIRROR OF THE CYLINDER OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In work, questions of interrelation of microgeometry of a surface of a mirror of the cylinder of an internal combustion engine and motor potential before capital repairs are considered. Results showed that quality of the block of cylinders of the engine 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 a curve of Abbott – Fayrstouna which use 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, engine of internal combustion.

REFERENCES

[1] Stepanov S.N, Tarasov S.B, Vidineeva N.U. Diagnostika, remont i obclygivanie avtomobilei: ychebnoe posobie. Izdatelstvo Politehnicheckogo yniversiteta. Sankt-Peterbypg. 2020. (rus.)
[2] Tabenkin A.N, Tarasov S.B, Stepanov S.N. Sherohovatoct, volnistost, profil. Megdunarodnoi opit. Izdatelstvo Politehnicheckogo yniversiteta. Sankt-Peterbypg. 2007. (rus.)
[3] Yaithayz D. Metrologiy poverhnocti. Principi, primenyemie metodi I pribori. Pod. red. Mishkina N.K. Mockovckay obl.: Izdatelstvo Dom “Intelekt”, 2009. (rus.)
[4] 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.
[5] Krystek M.P. ISO Filters in Precision Engineering and Production Measurement. Berlin: Beuth-Verlag; 2010.
[6] Learn R. The Measurement of Surface Texture using Stylus Instruments. Measurement Good Practice Guide № 37. National Physical Laboratory Tedolington, Middlesex, United Kingdom. 2001.
[7] Mummery L. Surface Texture Analysis. The Handbook. Hommelwerke GmbH. West Germany. 1990.
[8] Sander M. A. Practical Guide to the Assessment of Surface Texture. Feinpriit Perthen GmbH.
[9] Tabenkin A. Surface Finish Measurement Basics. Magazine Quality 101. USA.2004.
[10] Tabenkin A. To Each This Own Parameter. Quality Digest, USA, 2001.
[11] Tabenkin A. ABCs of Rz. Quality Magazine USA, 2007.

УДК 621.9.08

С. Б. Тарасов[1], С. Н. Степанов[2], А.В. Петров[3]

КАЧЕСТВО ДЕТАЛЕЙ И ТЕКСТУРА ПОВЕРХНОСТИ

[1]Станислав Борисович Тарасов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail:imcmikro@mail.ru

[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

[3]Антон Владимирович Петров, ст. преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 591-66-61, E-mail:a-v_petrov@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы взаимосвязи текстуры поверхности и функционального назначения детали. Результаты показали, что качество деталей определяется не только допуском на размер, но и текстурой поверхности после механической обработки. Самыми распространенными параметрами являются параметры профиля шероховатости Ra и Rz, однако в мире существует множество других параметров использование которых позволит значительно улучшить качество и обеспечить функциональное назначение поверхности детали.

Ключевые слова: качество поверхности, параметры шероховатости, волнистость, форма, направление неровностей, изъяны поверхности.

За последние годы в мире накоплен огромный опыт в обеспечении требуемого функционального назначения деталей за счет оптимального нормирования параметров шероховатости и их технологического обеспечения.

В то же время российские стандарты по шероховатости поверхности давно не пересматривались. Отсутствует литература, освещающая миро-

вые достижения в вопросах описания, нормирования и измерения текстуры поверхности. Российские конструкторы практически ничего не знают о параметрах шероховатости, отражающих функциональные возможности поверхностей.

Качество деталей определяется допусками на размер, допусками формы, допусками расположения и параметрами шероховатости поверхности.

Во время обработки на поверхности детали под действием процесса появляются следы обработки – неровности поверхности. Наличие неровностей на поверхностях деталей является не только неизбежным, но и часто необходимым для обеспечения функциональных свойств поверхности.

Процессы традиционной металлообработки существенно не изменились с тех пор, как они появились и, по-прежнему, оставляют на обработанной поверхности следы всех операций технологического процесса. Эти следы и формируют на поверхности детали текстуру, состоящую из неров-

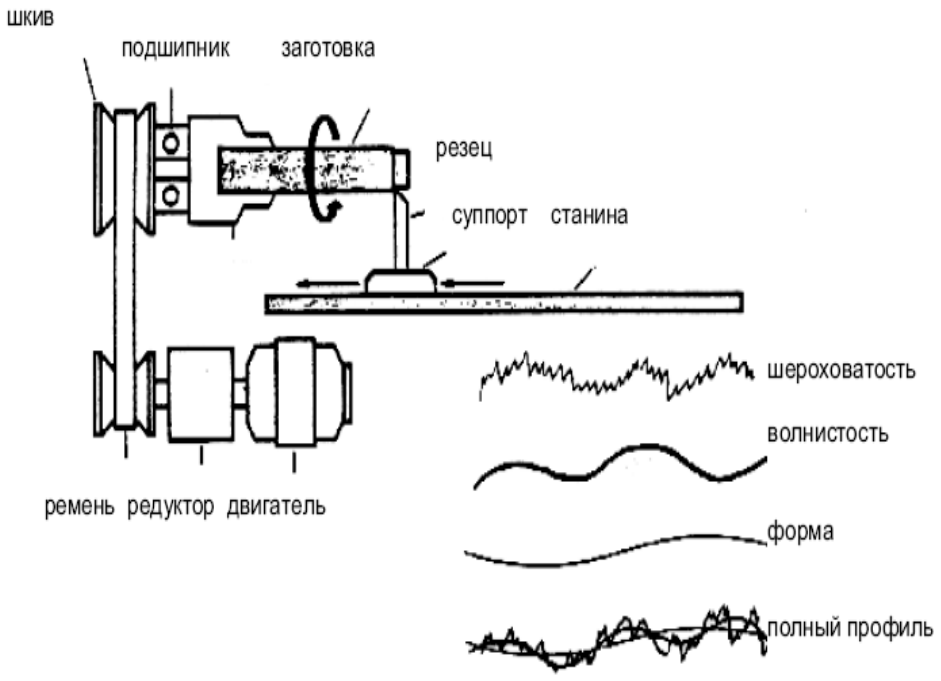


Рис. 1. Основные компоненты текстуры поверхности.

ностей рис. 1.

Текстура поверхности ИСО 4287:1997– это повторяющиеся и случайные отклонения от геометрической (номинальной) поверхности, которые формируют трехмерную топографию поверхности.

Текстура поверхности включает шероховатость, волнистость, направление неровностей, изъяны поверхности и отклонение формы в пределах ограниченной поверхности.

Шероховатость поверхности – совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенными, например, с помощью базовой длины (ГОСТ 25142 – 82).

Шероховатость поверхности – это следы инструмента, оставленные точением, фрезерованием, строганием, шлифованием, доводкой и другими технологическими процессами.

Требования к шероховатости поверхности устанавливают без учета изъянов поверхности.

Волнистость поверхности – второй тип неровностей. Неровности, относящиеся к волнистости, возникают в результате внешних воздействий (например, вибраций) и колебаний станка. Иногда волнистость может быть вызвана внутренними напряжениями в самой заготовке.

Направление неровностей – это направление преобладающего рисунка поверхности. Согласно ГОСТ 25142-82 направление неровностей – условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность.

Направление неровностей обычно определяется технологическим процессом.

Изъян поверхности – элемент, неровность или группа элементов или неровностей реальной поверхности непреднамеренно или случайно образованные во время производства, хранения или использования поверхности.

К изъянам поверхности относятся царапины, поры, трещины, заусенцы и т.п.

Самым распространенным параметром текстуры поверхности является шероховатость. Именно шероховатость определяет многие функциональные свойства поверхности:

- качество сопряжения (посадки);
- износоустойчивость (износостойкость);
- контактная прочность;
- светоотражательная способность;
- теплопередача;
- удержание смазки;
- адгезия и т.д.

В настоящее время в мире применяются более ста параметров шероховатости.

Параметры отражают некоторую определенную особенность поверхности, выраженную числом. Так как самые первые параметры Ra и Rq не отражали функциональные требования к детали, то начался процесс появления все новых параметров. Большинство из многочисленных параметров шероховатости поверхности, которые включены в международные, национальные и корпоративные стандарты, описывают большое разнообразие особенностей поверхностей и находят применение в производстве.

Какие параметры и сколько нужно нормировать для обеспечения требуемого качества поверхности – вот вопрос ответ, на который необходим конструкторам и технологам.

В настоящее время существует два основных метода измерений параметров шероховатости – оптический (бесконтактный) и щуповой. Оба являются профильными. В последнее время получают развитие топографические (трехмерные-3D) методы измерений шероховатости поверхности.

Применение указанных методов позволяет решать многочисленны задачи, возникающие в области измерений параметров шероховатости:

- измерение поверхностей, образованных традиционными методами обработки;
- измерение поверхностей, выполненных традиционными методами, но со специальными требованиями (слишком короткие, слишком длинные, труднодоступные и т.д.);
- измерение очень чистых или слишком грубых поверхностей;
- измерение многопрофильных, многоцелевых поверхностей;
- одновременное измерение формы, волнистости и шероховатости;
- измерение пористых поверхностей (чугуна, металлокерамики, керамики);
- измерение на острых кромках;
- измерение на криволинейных поверхностях.

В условиях нарастающего числа параметров шероховатости поверхности, методов и средств измерения конструкторам, технологам, операторам станков, контролерам становится все труднее ориентироваться.

На фоне большого числа параметров шероховатости, применяемых в мире, в чертежах отечественных разработчиков можно увидеть только высотные параметры Ra и Rz. А правильно ли мы их понимаем?

Ra - среднее арифметическое отклонение профиля - среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины.

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |y(x)|dx \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$$

где l- базовая длина.

Ra - самый распространённый из всех параметров шероховатости поверхности. Другие параметры, которые могут дать больше информации о функциональности поверхности, часто назначаются в дополнение к Ra.

Графическое представление Ra показано на рис. 2.

Значение Ra, определённое на базовой длине, характеризует среднюю амплитуду профиля шероховатости, поэтому единичный нетипичный выступ или впадина незначительно влияют на значение Ra.

На практике среднее значение Ra определяется в пределах нескольких последовательных базовых длинах, по стандарту ИСО 4288 на 5. Однако Ra не содержит никакой информации о форме неровностей профиля.

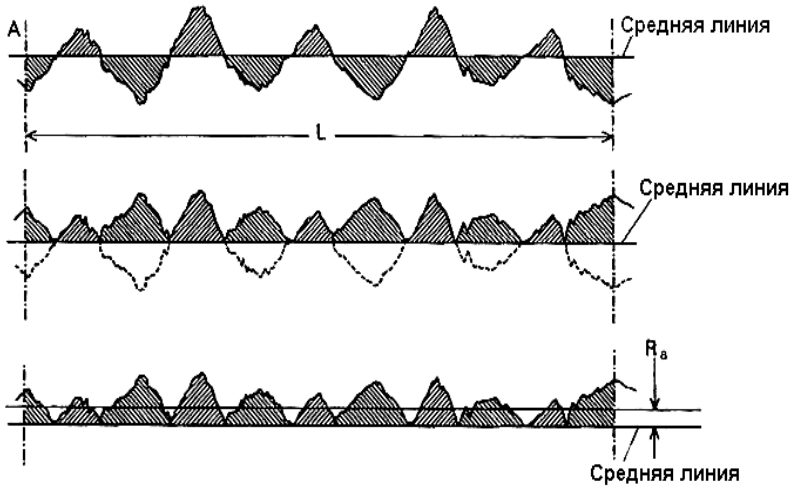


Рис. 2. Графическое представление Ra.

Можно получить одинаковые значения Ra для поверхностей, имеющих совершенно разный профиль (рис. 3), и поэтому, если не указаны другие параметры, полезно указывать технологический процесс, используемый для получения поверхности.

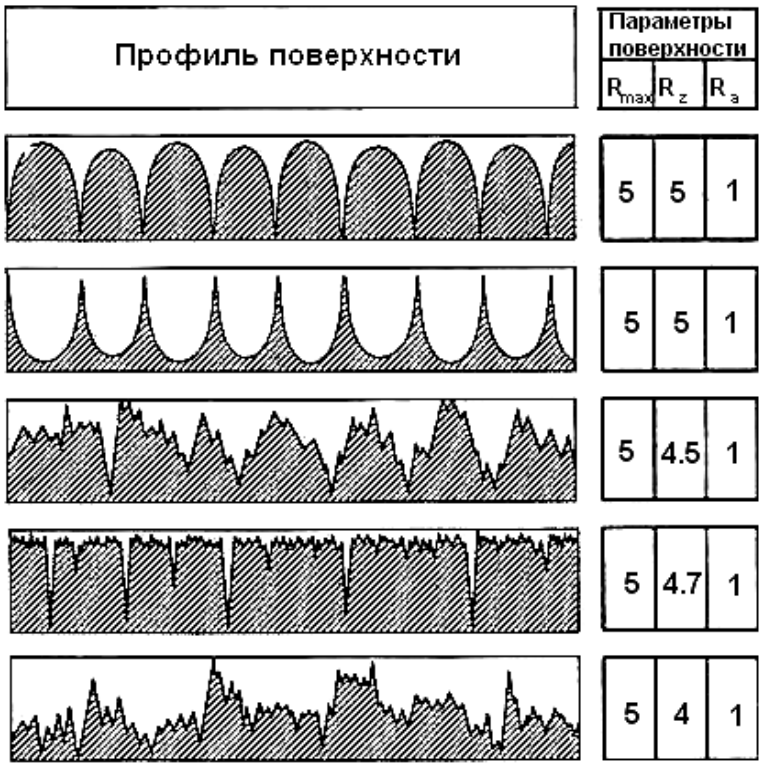


Рис. 3. Различные профили с одинаковым значением Ra.

Достоинства параметра Ra:

-наиболее часто применяемый параметр для контроля за стабильностью технологического процесса;

-может быть измерен любыми, даже самыми простыми приборами;

-статистически очень стабильный, с высокой повторяемостью результатов измерений;

-оптимален для поверхностей со случайным характером профиля, например, шлифованных;

-успешно применяется там, где процесс находится под контролем и где условия постоянные (инструмент, скорости, подача, охлаждение).

Недостатки:

- не позволяет определить тип профиля поверхности (не изменяется при изменении формы профиля);

-не очень информативен для поверхностей, полученных наложением нескольких технологических процессов;

-мало критичен для поверхностей, которые должны обеспечить герметичность соединений.

Таким образом, для отражения функционального назначения поверхности детали недостаточно указывать на чертеже только параметр Ra, необходимо дополнительно указывать и другие параметры.

Rz - высота неровностей профиля по десяти точкам - сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины.

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^{5} \left| y_{pi} \right| + \sum_{i=1}^{5} \left| y_{vi} \right|}{5}$$

где y_{pi} – высота i-го наибольшего выступа профиля; y_{vi} - глубина i -ой наибольшей впадины профиля.

Параметр Rz является наиболее проблемным, так как имеет не менее пяти различных определений:

1. Японский стандарт JIS B 0601 -1982.

Рис. 4. Параметр Rz по JIS B 0601 - 1982

$$Rz = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5}$$

Rz - среднее расстояние по 10 точкам между пятью наивысшими пиками и пятью самыми глубокими впадинами в пределах длины оценки от нефильтрованного профиля (рис. 4).

2. Стандарты ГОСТ 25142-82, ASME B46.1-1985, ISO 4287/1-1984, JIS B0601-1994.

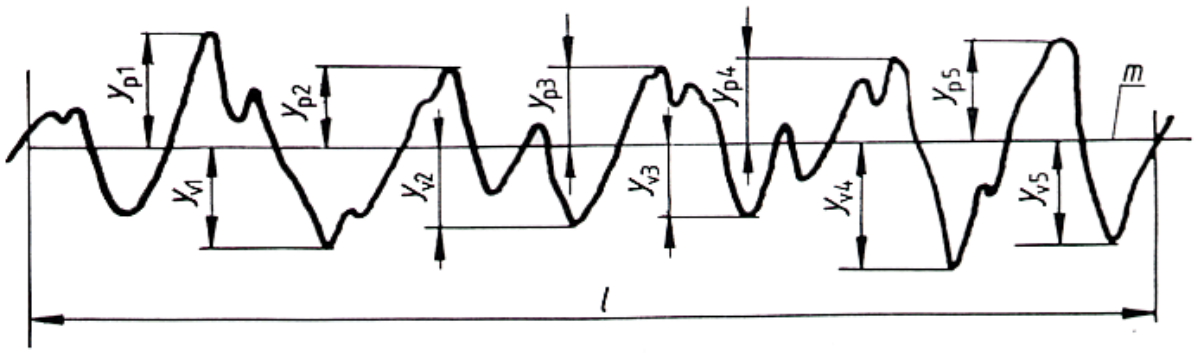


Рис. 5. Параметр Rz (ГОСТ 25142-82, ASME B46.1-1985, ISO 4287/1-1984, JIS B0601-1994.

Rz - 10-и точечное среднее расстояние между пятью наибольшими выступами и пятью наибольшими впадинами в пределах базовой длины профиля шероховатости (рис. 5).

3. Стандарт ASME B46.1-2002, DIN 4762/1-1974.

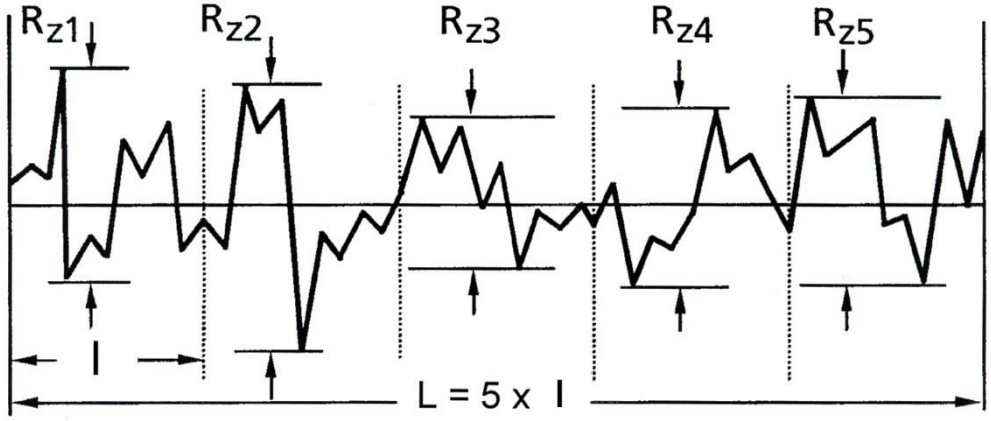


Рис. 6. Параметр Rz ASME B46.1-2002, DIN 4762/1-1974.

Rz - среднее из максимальных расстояний между выступами и впадинами в каждой из пяти отсечек шага профиля шероховатости (рис. 6).

4. Стандарт ISO 4287:1997 - бывший «Ry» в ISO 4287:1984.

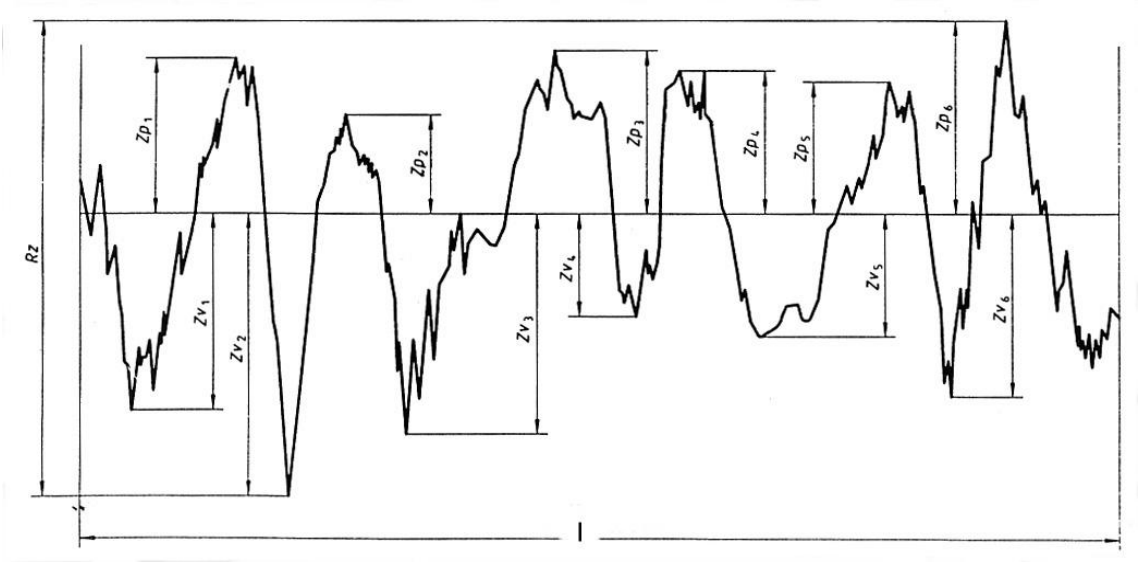


Рис. 7. Параметр Rz по ISO 4287:1997

Rz - сумма высот наибольшего пика и наибольшей впадины профиля в пределах базовой длины профиля шероховатости (рис. 7), аналогичен Rmax по ГОСТ 25142-82.

5. Стандарт компании Daimler Benz Corporate Standart № 31007:1983.

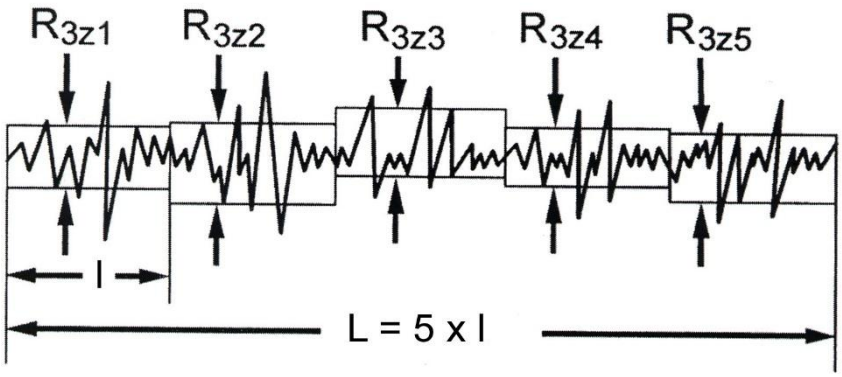


Рис. 8. Параметр R_{3z}

$$R_{3z} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{5} R3zi$$

R_{3z} - среднее расстояние между третьим наивысшим пиком и третьей наинизшей впадиной в пределах пяти базовых длин (рис. 8).

R_{3z} исключает из рассмотрения два наивысших пика и две низших впадины, которые имеют слабое влияние на назначение поверхности. Это уменьшает нестабильность, свойственную таким высотным параметрам как Rz.

Учитывая такую неоднозначность параметра Rz, необходимо очень внимательно использовать импортные приборы для измерения шероховатости, чтобы измерять именно тот Rz, который указан в чертеже.

Параметр Rz, как средняя высота неровностей по 10-ти точкам, уходит из международной практики, и в стандарте ИСО 4287:1997 такой параметр отсутствует. Однако в практике нашей страны параметр Rz используется для связи допуска на размер и высоты неровностей.

В России сложился порядок задавать высоту неровностей через Rz, который не должен превышать 1/3 допуска на размер. Затем устанавливают параметр Ra, пересчитывая полученное значение Rz из соотношения Rz = 4.. .5 Ra.

Однако в британском стандарте Rz = 4...7 Ra, а в рекомендациях Siemens Rz = 4... 10 Ra.

Такое расхождение объясняется тем, что реальное соотношение Ra и Rz зависит от формы профиля. Для периодического профиля действительно Rz = 4...5 Ra.

В современных условиях, чтобы избежать грубых ошибок при оценке качества поверхности, следует исключить практику пересчёта параметров Ra и Rz. Современные, даже самые простые и недорогие приборы позволяют измерять параметры Ra и Rz, поэтому надо измерять тот параметр, который указан на чертеже без пересчёта.

Стандарт ИСО предлагает рекомендации по установлению значений Ra и Rz в зависимости от стандартного допуска 1T на размер.

Соотношение между значениями Rz и Ra допуском на размер и значениями Rz и Ra изменяется в зависимости от номинального размера и квалитета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Издательство Политехнического университета. Санкт-Петербург. 2007.
2. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, применяемые методы и приборы. Под ред. Мышкина Н.К. Московская обл.: Издательство Дом «Интеллект», 2009.
3. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000.

4. Валетов В.А., Иванов А.Ю. Непараметрический подход к оценке качества изделий. //Стандартизация и сертификация качества № 6, 2010.
5. Brown Christofer. What is Roughness? An introduction to Surface metrology. Proceedings of the 2 ut 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.B. Tarasov, S.N. Stepanov, A.V. Petrov

QUALITY OF DETAILS AND TEXTURE OF THE SURFACE

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

In work, questions of interrelation of surface texture and a functional purpose of a detail are considered. Results showed that quality of details is defined not only the tolerance on the size, but also the surface texture after machining. The most widespread parameters are parameters of roughness profile a Ra and Rz, however in the world there are a set of other parameters using of which will allow to improve quality considerably and to provide a functional purpose of detail surface.

Key words: quality of a surface, roughness parameters, sinuosity, form, lays, surface imperfections.

REFERENCES

[1] Tabenkin A.N, Tarasov S.B, Stepanov S.N. Sherohovatoct, volnistost, profil. Megdunarodnoi opit. Izdatelstvo Politehnicheckogo

yniversiteta. Sankt-Peterbupg. 2007. (rus.)
[2] Yaithayz D. Metrologiy poverhnocti. Principi, primenyemie metodi I pribori. Pod. red. Mishkina N.K. Mockovckay obl.: Izdatelstvo Dom “Intelekt”, 2009. (rus.)
[3] Suslov A.G. Kachectvo poverhnostnogo sloy detaley mashin. M.: Mashinoctroeniy, 2000. (rus.)
[4] Valetov V.A., Ivanov A.Y. Neparametricheskiy podhod k ocenke kachestva izdeliy.// Standartizaciy i sertifikaciy kachestva № 6, 2010. (rus.)
[5] Brown Christofer. What is Roughness? An introduction to Surface metrology. Proceedings of the 2 ut 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.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ

УДК 621.923

Ю.М. Барон

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЕ УДАЛЕНИЕ ЗАУСЕНЦЕВ НА ЗАГОТОВКАХ ПОСЛЕ ВЫРУБКИ

Юрий Михайлович Барон д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-93-02, E-mail: baron_yuri2002@mail.ru

Аннотация

В статье изложены исследования магнитно-абразивного удаления заусенцев, на нежёстких деталях, полученных вырубкой из листового материала. Исследования показали высокую производительность метода, сочетающуюся с возможностью обработки нежёстких деталей.

Ключевые слова: листовой материал, нержавеющая сталь, вырубка, магнитно-абразивная обработка, удаление заусенцев, высокая производительность.

На заготовках из листовой стали, получаемых штамповкой, на кромках по периметру вырубки и на кромках после других операций обработки резанием образуются заусенцы, удаление которых вызывает серьёзные трудности. Заготовки из листовых материалов обычно имеют малую жёсткость и легко деформируются во время обработки. Из-за этого невозможно применение многих высокопроизводительных технологий, и удаление заусенцев приходится выполнять вручную с большими затратами труда. Технология эффективного удаления заусенцев на нежёстких заготовках будет востребована при изготовлении медицинских инструментов, столовых приборов и деталей электротехнических, электронных изделий, радиоаппаратуры.

Для решения задачи нами был выбран метод магнитно-абразивной обработки (МАО), неоднократно ранее использовавшийся для получения высококачественных кромок разными авторами [1 - 12].

Согласно избранной схеме процесса листовая заготовка 1 (образец) закреплена на стержне 4, который может вращаться относительно вертикальной оси O (рис. 1). При движении по окружности с диаметром D заготовка с частотой n_1 и окружной скоростью v_1 пересекает рабочую зону 3 между полюсными наконечниками 2 электромагнита постоянного тока. Дополнительно заготовка 1 и стержень 4 осциллируют в вертикальной плоскости с частотой n_2 и средней скоростью v_2.

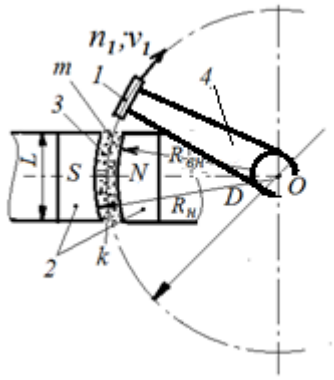


Рис. 1. Схема процесса (вид сверху):
1 – заготовка;
2 – сменные полюсные наконечники;
3 – рабочая зона, заполненная магнитно-абразивным порошком;
4 – вращающийся стержень

Магнитное поле, созданное электромагнитным индуктором, удерживает магнитно-абразивный порошок в рабочей зоне 3 и сообщает порошку заданную жёсткость. Зёрна порошка, обладая абразивными свойствами и, будучи прижаты к поверхности заготовки, обрабатывают со всех сторон часть заготовки, погружённую в рабочую зону. При этом на поверхностях снижается шероховатость, а кромки округляются с удалением заусенцев по всему периметру.

Образцами в эксперименте служили плоские заготовки чайных ложек, вырубленные из листовой нержавеющей стали Х18Н9Т с толщиной 1,5 мм. Первоначально форма рабочей зоны была выполнена серповидной, сужающейся по мере приближения к входу (область *k*) и выходу (область *m*) вдоль окружности *D*: $R_{вн} \geq R_{н}$. Такая форма выбрана с целью увеличения жёсткости порошковой среды в зонах *k* и *m* из рабочей зоны, Коэффициент серповидности равен $\psi = \frac{R_{вн} + \delta}{R_{н}} = 1{,}1$, где $R_{н}$ и $R_{вн}$ - радиусы наружной и внутренней полюсных поверхностей рабочей зоны, δ – ширина рабочей зоны.

Оценкой оптимизации условий обработки служил удельный съём металла q_1 мг/(см^2·с). Для уменьшения разброса значений q_1 на этой стадии исследования заусенцы на кромках образца предварительно удаляли.

Постоянными условиями на этой стадии экспериментов были: - размеры рабочей зоны: $R_{н} = R_{вн}$=150 мм; H=15 мм, L=80 мм; - ширина рабочей зоны δ=14,5 мм; - частота вертикальной осцилляции образца $n_{осц}$ = 600 мин$^{-1}$; амплитуда $A_{осц}$ = 3 мм; средняя скорость осцилляции v_2=7,2 м/мин; - объём порции порошка в насыпном виде $V_{п}$ равен объёму рабочей зоны $V_{р.з.}$; коэффициент заполнения рабочей зоны порошком $k_{з}$ = 1[1]; - охлаждающая жидкость – 5%-ная эмульсия олеиновой кислоты в воде; - магнитно-абразивные порошки – кермет ЭБМ40+80%Fe, зернистость 100/160 мкм; закалённый чугун, зернистость 600 мкм.

Эксперименты показали, что порошок кермета плохо удерживается в

[1] $k_{з} = \frac{V_{п}}{V_{р.з.}}$, где $V_{п}$ – объём порции порошка в насыпном виде, $V_{р.з.}$- объём рабочей зоны.

рабочей зоне, имеющей форму, изображённую на рис.1. Образец 1, двигаясь со скоростью v_1= 58 м/мин, выталкивает порошок из рабочей зоны. В оставшейся порции порошка образуется не зарастающий след от похождения образца. Осцилляция образца в вертикальной плоскости сопровождается выталкиванием части порошка вниз. Выбрасывание порошка снижает стойкость порции порошка, помещённой в рабочую зону[2]. Для оценки роли выбрасывания порошка выполнен эксперимент с различными значениями окружной скорости v_1 (табл. 1).

Таблица 1

Окружная скорость $v_{окр}$, м/мин	Удельный съём q_1, мг/(см^2·с)
2	0,013
5	0,015
8	0,023
11	0,025
14	0,026
58	0,0084

Использование диапазона малых скоростей v_1 = 2…14 м/мин привёло к существенному улучшению удерживания порошка и увеличением съёма q_1 в 3 раза, по сравнению с предыдущими результатами. Однако выбрасывание порошка происходило ещё достаточно активно.

На основе теоретических положений о силах, действующих на ферромагнитное тело в магнитном поле [13, 14] в работе [15] была получена упрощенная формула, удобная для анализа магнитных сил, действующих на зёрна магнитно-абразивного порошка в рабочей зоне:

$$\overline{F_m} \approx \frac{3\mu \cdot V}{\mu_0 \left(\mu + 2\mu_0\right)} \cdot B \cdot gradB, \qquad (1)$$

при допущении, что зерно порошка состоит из однородного материала и имеет симметричную форму (сфера, куб, эллипсоид, др.). Здесь μ – абсолютная магнитная проницаемость материала зерна; V –объём зерна; B – магнитная индукция в точке расположения зерна; $gradB$ – градиент магнитной индукции в этой же точке (вектор): ; μ_0 =– магнитная проницаемость вакуума.

Сила $\overline{F_m}$, действующая на зерно ферромагнитного порошка в рабочей зоне, пропорциональна магнитной индукции и градиенту магнитной индукции в точке расположения зерна и тем больше, чем больше объём и магнитная проницаемость зерна. Направление силы $\overline{F_m}$ одинаково с направлением $gradB$.

Пользуясь представлениями, основанными на формуле (1), были изготовлены 16 пар полюсных наконечников, позволивших изменять форму рабочей зоны, соответственно влиять на направления действующих магнитных сил и на жёсткость порошковой среды на разных участках рабочей зоны. Новые формы рабочей зоны были экспериментально исследованы.

[2] Условимся называть стойкостью порции порошка длительность сохранения в рабочей зоне объёма порошка, достаточного для продолжения обработки.

Предварительно были проверены такие возможные резервы повышения интенсивности процесса, как материал и размеры зёрен порошка, параметры осциллирующего движения.

Замена порошка кермета порошком закалённого чугуна с зернистостью 600 мкм увеличило удельный съём металла до q_1 = 0,044 мг/см^2·с. Увеличение зернистости чугунного порошка до 1000 мкм повысило удельный съём до q_1 = 0,049 мг/см^2·с. Повышение частоты осцилляции образца n_2 с 600 мин$^{-1}$ до 1200 мин$^{-1}$ сопровождалось повышением удельного съёма q с 0.032 до 0.063 мг/см^2·с. Увеличение амплитуды осцилляции с 2 до 6 мм повышает интенсивность обработки, но одновременно способствует выталкиванию порошка из рабочей зоны в вертикальном направлении.

При сравнении различных форм рабочей зоны были использованы: порошок закалённого чугуна с зернистостью 1000 мкм, окружная скорость v_1 = 2 м/мин, частота осцилляции n_2=1000 мин$^{-1}$, амплитуда осцилляции – 2 мм, магнитная индукция В = 1,5 Тл, длительность нахождения образца в порошковой среде - τ = 9,6 с. Обработка производилась в присутствии СОЖ - 5%-ной эмульсией Э2.

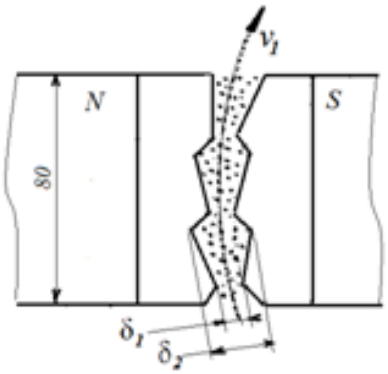


Рис. 2. Форма рабочей зоны, обеспечивающая высокую стойкость порции магнитно-абразивного порошка.

Лучшие результаты по удельному съёму и по стойкости порции порошка получены с полюсными наконечниками, изображёнными на рис. 2. Выбрасывание порошка при использовании этих наконечников происходит, но значительно медленнее, чем при других испытанных формах рабочей зоны. После 20 проходов образца через рабочую зону порошок убывает, освободив зону до первого выступа полюсов. После 28 проходов свободной оказывается зона до второго выступа. Таким образом, выталкивание порошка в направлении движения образцов полностью не исключается, но при периодической дозаправке рабочей зоны порошком (например, после прохождения каждых 20 образцов) схема обработки становится приемлемой для промышленного использования.

В результате постепенного уменьшения порошка в рабочей зоне зависимость удельного съёма металла q (мг/см^2) от длительности обработки τ имеет степенной характер:

$$q = q_1 \cdot \tau^b , \qquad (2)$$

Здесь q_1, мг/(см^{2}с) отражает начальную интенсивность процесса – съём с единицы площади образца за первую секунду обработки, показатель степени b косвенно отражает уменьшение порции порошка в рабочей зоне.

Например, при сравнении магнитно- абразивных порошков –кермета и закалённого чугуна получены зависимости, показанные на рис. 3. В табл. 2 приведены характеристики q_1 и b для этих порошков.

Таблица 2

Ферромагнитный порошок	Удельный съём q_1, мг/(см^{2}с)	Показатель степени b
Закалённый чугун, 600 мкм	0,49	0,73
Кермет ЭБМ40+80%Fe, 100-160 мкм	0.01	1,00

Порошок закалённого чугуна проявляет меньшую стойкость порции порошка, но обладает высокой начальной производительностью.

Полученные при оптимизации процесса режим обработки и форма рабочей зоны использованы для проверки основной задачи исследования – оценки применимости данной схемы процесса магнитно-абразивной обработки для удаления заусенцев на нежёстких заготовках после их вырубки листовой штамповкой[3].

Высоту заусенцев измеряли с помощью микрометра в нескольких местах на каждом образце до обработки и после каждого прохода образца через рабочую зону.

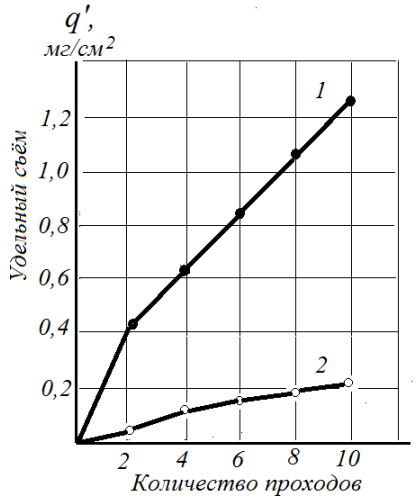


Рис. 3. Съём металла с порошками: 1 – крошка закалённого чугуна, 600 мкм; 2 – кермет, 100 – 160 мкм

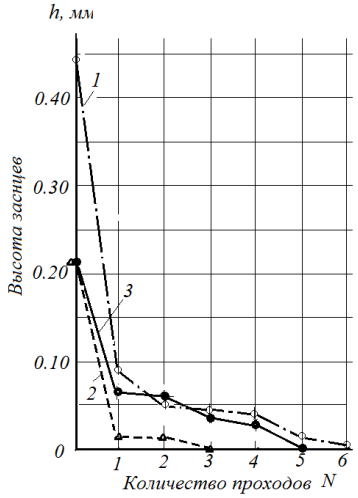


Рис. 4. Снижение высоты заусенцев: 1, 2, 3 – номера опытов

Результат этого эксперимента представлен на рис. 4. На графиках отме-

[3] Условия экспериментов: v_1= 2 м/мин; v_2= 12 м/мин; тип полюсных наконечников - Y; B = 1,5 Тл; $k_з$ =2,3; без СОЖ.

чены наибольшие по высоте заусенцы, оставшиеся после каждого прохода через рабочую зону.

Заусенцы, первоначально достигавшие по высоте 0,2-0,4 мм, резко снижаются уже после 2,5секунд обработки и практически полностью исчезают после 12-15 секунд. По отзывам производственников, такая производительность на операции удаления заусенцев вполне устроит производство. Здесь же следует отметить, что исследованная схема процесса МАО не представляет проблем для создания автоматического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. св. СССР 109734, кл.67а; 67л, 10. Устройство для шлифования стальных игл и т.п. мелких деталей. \\ Гончаренко К.С. Дрогаль, В.А. Молдавский Г.Д. -опубл. в БИ, № 12. 1957
2. Dehoff A., Krull P., Mattke W. MagnetabrasiveBearbeitung, eine nicht-konventionelle Methode der Werkstoffbearbeitung. (Магнитно-абразивная обработка, один из нетрадиционных способов обработки деталей) \\ Fertigungstechnik und Betrieb, 1976,- N26,- C. 738-741 (Germ)
3. Македонски Б.Г. и др. Експериментално изследоване на процесса на магнитно-абразивната обработване във въртящи магнитни полета.\\ Н.-техн. сб. «Технология на машиностроенето», - София: ЦМИ,1977. – свитък 5, с.29-33 (Bulg)
4. Шляго Ю.И. и др. Применение магнитно-реологических жидкостей с абразивным наполнителем для обработки стекла \\ ж. Стекло и керамика.-1978. -N 1.- с.19-20.
5. Кобчиков В.С. Технология магнитно-абразивного полирования изделий из твёрдых сплавов.: Автореф. дисс…соиск. учён. степ. к.т.н.- Л.: ЛПИ, 1983.- 17 с.
6. Полищук В.С., Наливко Г.Д., Кисель Н.Г. Композиционные магнитно-абразивные порошки на основе железа, карбидов титана, ванадия и хрома \\ ж. Порошковая металлургия, 1983. - №3.-с.94-100.
7. Shinmura Takeo, Takazawa Koya, Hatano-Eiju. Study of Magnetic-Abrasive Process Application to Edge Finishing \\ Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, v 19 No 3 Sep 1985, pp. 218-220 IS: 0582-4206 (Eng)
8. Ефремов В.Д. и др. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильного режущего инструмента из быстрорежущего сталей \\ Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов. – Пенза, 1986.- с.58-59.
9. Shinmura T., Yamaguchi H., Watanabe M. Study of a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining - De-

velopment of an abrasives slurry circulating system and its effect on the finishing characteristics\\ J. JSPE, v.67, n.4, (2001), pp.575-580 (Eng)
10. Авт. свид. СССР 1523314, МКИ В 24 В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки \ М.Д. Крымский, Л.И. Тульчинский и Е.Г. Дядько. заявл. 27.04.88, 4415997/31-08; опубл. 23.11.89. БИ. № 43
11. Yamaguchi, H., Shinmura, T., Horiuchi, N. Study of the Magnetic Tool Behavior and Its Relationship to the Processing Characteristics in a Magnetic Field Assisted Barrel Finishing Process / Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME. v.29,2001, pp.197-204 (Eng)
12. Baron Yu.M., Ko Sung-Lim, and Repnikova E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2nd Asia Pacific Forum on Precision Surface Finishing and Deburring Technology, 22-24, July, Seoul, Korea, 2002. – pp.166-178 (Eng)
13. Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: ГТТИ, 1954. – 685 с.
14. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, т.II, Л.: Энергия, 1975. 407 с.
15. Барон Ю.М. Теоретические и экспериментальные исследования процесса абразивной обработки деталей машин в магнитном поле: Дисс…соиск. уч. степ. к.т.н. – Л.: ЛИЭИ, 1969. – 212 с.

Y. M. Baron

PRODUCTIVE DEBURRING ON WORKPIECES AFTER BLANKING

St. Petersburg State Politechnical University, Russia

Abstract

In the article the result of magnetic abrasive deburring researches are set. The researches achieved an opportunity of processing at high productivity of not rigid parts after stamping or cutting.

Key words: a sheet material, stainless steel, cutting down, magnetic abrasive finishing, deburring, high efficiency.

REFERENCES

[1] Invention USSR № 109734, kl.67a; 67l, 10. The device for grinding steel needles and others fine parts.\\ Goncharenko K. S., Drogal, V.A., Moldavsky G.D. -published in BI, № 12. 1957 (Rus)
[2] Dehoff A., Krull P., Mattke W. MagnetabrasiveBearbeitung, eine nichtkonventionelle Methode der Werkstoffbearbeitung. \\ Fertigungstechnik und Betrieb, 1976,- N26,- C. 738-741 (Germ)

[3] Makedonsky B. G. etc. Experimental research of Magnetic Abrasive Finishing Process at revolving magnetic \\ J. "Engineering technique", - Sofia: CMI, 1977. – v. 5, pp. 29-33 (Bulg)
[4] Shlyago Y. I. Etc. Application of magnetic- rheological liquids with an abrasive filling agent for processing glass \\ J. Glass and ceramics.- 1978, - № 1,- pp.19-20 (Rus).
[5] Kobchikov V. S. Engineering of Magnetic Abrasive Polishing of products made from hard metals.: Thesis on PhD.- Leningrad.: LPI, 1983.- 17 p. (Rus)
[6] Polystchuk V. S., Nalivko G. D., Kisel N. G. Composite magnetic abrasive powders on the basis of iron, carbides of titanium, vanadium and chromium \\. J. Powder metallurgy, 1983. - №3.-c.94-100 (Rus).
[7] Shinmura Takeo, Takazawa Koya, Hatano-Eiju. Study of Magnetic-Abrasive Process Application to Edge Finishing \\ Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, v 19 No 3 Sep 1985, pp. 218-220 IS: 0582-4206
[8] Efremov V.D. etc. Magnetic abrasive processing of complex-profile cutting tools made from high speed steels \\ Progressive methods of finishing processing of machines and devices parts. – Penza, 1986.- pp.58-59 (Rus).
[9] Shinmura T., Yamaguchi H., Watanabe M. Study of a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining - Development of an abrasives slurry circulating system and its effect on the finishing characteristics\\ J. JSPE, v.67, n.4, (2001), pp.575-580
[10] Invention USSR № 1523314, IKI B 24 B 31/112. Device for magnetic abrasive finishing \ M.D. Krymsky, L.I. Tulchinsky and E.G. Dyadko; appl. 27.04.88, 4415997/31-08; published 23.11.89. BI. № 43 (Rus)
[11] Yamaguchi, H., Shinmura, T., Horiuchi, N. Study of the Magnetic Tool Behavior and Its Relationship to the Processing Characteristics in a Magnetic Field Assisted Barrel Finishing Process / Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME. v.29, 2001, pp.197-204
[12] Baron Yu.M., Ko Sung-Lim, and Repnikova E. Experimental Verification of Deburring by Magnetic Abrasive Finishing (MAF) Method // 2nd Asia Pacific Forum on Precision Surface Finishing and Deburring Technology, 22-24, July, Seoul, Korea, 2002. – pp.166-178
[13] Maxwell D. The elected compositions under the theory of an electromagnetic field. – M.: GTTI, 1954. – 685 p. (Rus)
[14] Neiman L.R., Demirchyan K.S. Theoretical bases of the electrical engineers, ,- L.: Энергия, 1975. v.II, 407 p. (Rus)
[15] Baron Y.M. Theoretical and Experimental Investigations for the Process of the abrasive Processing of Machine Components in Magnetic Field: PhD thesis – Leningrad, 1969. – 212 pages. (Rus)

УДК 621.31

Ю. С. Барышников[1], В.Д. Азаров[2], М.В. Яковицкая[3]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИЯХ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

[1] Юлиан Семенович Барышников, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7-904-552-43-22, E-mail: iulianbaryshnikov@yandex.ru.

[2] Виталий Дмитриевич Азаров,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:+7-911-956-15-44, E-mail: avd34@yandex.ru.

[3] Марина Валентиновна Яковицкая, к.т.н.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7-904-558-07-76, E-mail: mava1968@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрена возможность увеличения энергосбережения при торможениях вала электродвигателя. Результаты эксперимента показали, что энергоэффективность в новой спроектированной конструкции электродвигателя, при механических торможениях, больше в 2.5 раза, чем в аналогичном электродвигателе со статичным статором.

Ключевые слова: электродвигатель, рекуперация, энергосбережение.

Цель: Повысить энергосбережение электродвигателей в режимах торможения.

Задачи:

1. Спроектировать электродвигатель новой конструкции с лучшими показателями энергоэффективности.
2. Провести экспериментальные исследования электродвигателя новой конструкции.
3. Провести сравнительный анализ конструкции с аналогами, применяемыми в настоящее время.
4. Сделать выводы об эффективности в энергосбережении электродвигателя новой конструкции.

Значение энергосбережения в электродвигателях важно для

экономического развития (сбережение не возобновляемых источников энергии). Данной проблемой, занимались и занимаются множество ученых, не смотря на постановку проблемы с XIX века, т.е. со времен появления первых электродвигателей вплоть до наших дней.

В нашем исследовании затрагивается возможность увеличения энергосбережения при механическом торможении вала двигателя, при этом электродвигатель выполняет работу в режиме генератора, то есть вырабатывает электроэнергию. Такое торможение широко используется в транспортной технике, электромобилях, трамваях, троллейбусах, электричках, поездах, а также в центрифугах и в подъемно-транспортном оборудовании (краны, подъемники, лифты), но при этом количество вырабатываемой энергии в режимах механического тормоза сравнительно мало.

В статье [1] представлено: разработка электродвигателя и математическая формула используемого при этом эффекта для возможности его применения в технике (электродвигатели с частыми механическими торможениями [5, 7-9]). А также сравнительные значения получаемой энергии рекуперации для электродвигателей: со статичным статором (электродвигатель применяемой в настоящее время) и с вращающимся статором (разработанный электродвигатель).

Была изготовлена экспериментальная установка (рис. 1), состоящая из переносной платформы, на которой был укреплен электродвигатель, диск, тормоза и измеряющие приборы.

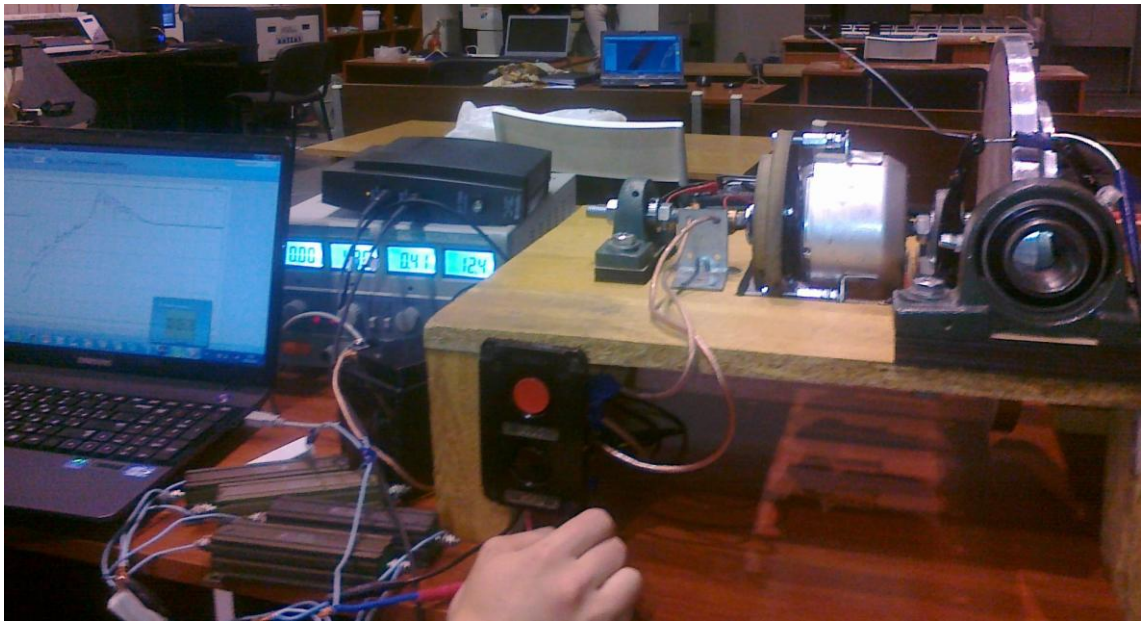


Рис.1. Экспериментальная установка.

Для электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов, мощностью 250 Вт, был сделан переходник из текстолита, который дает

возможность вращения статора, при торможении вала двигателя, а также при торможениях вала, по выбору, для последующих сравнений, оставлять статичным статор, с помощью вставляемого упора.

К валу электродвигателя присоединялся алюминиевый диск диаметром 300 мм, толщиной 10 мм, а к диску, в свою очередь, устанавливался ручной механический тормоз.

При механических торможениях, энергия рекуперации подавалось в двухканальный USB-осциллограф PCS 250, в свою очередь осциллограф выдавал значение этой энергии на компьютер.

Для измерения энергии, от установки на второй канал осциллографа подсоединялись несколько резисторов сопротивлением 1 Ом, мощностью 20 и 100 Вт, соединенные параллельно между собой, которые служили для расчета тока в цепи.

Данные измеряемых значений, записывались в файл, для последующей обработки в программе Excel. Также велась запись максимальных оборотов в минуту, достигнутых диском на валу, с помощью тахометра UT371.

Запись данных энергии рекуперации при механическом торможении вала, проводились в двух режимах, при не вращающемся статоре и вращающемся статоре. Для этих двух режимов был выбран одинаковый максимальный интервал частоты вращения диска, при котором велась запись данных эксперимента, этот интервал составлял от 500 до 600 об/мин. Всего было сделано 12 замеров для каждого режима.

В итоге для обработки были взяты по 8 измерений для каждого режима. Чтобы среднеарифметическое значение максимальной частоты вращения вала перед торможением, для двух режимов были примерно одинаковы (табл. 1).

Таблица.1

Значение получаемой энергии для двух режимов рекуперации

Энергия рекуперации при вращающемся статоре, Дж	Энергия рекуперации при статичном статоре, Дж
4,9544	2,4912
5,7671	2,2518
4,8023	1,9125
4,9543	2,0699
5,2958	1,8749
5,4738	1,9548
5,7731	1,8661
5,4642	1,942

По максимальной частоте вращения перед торможением с помощью расчета среднеквадратичного отклонения (для каждого режима отдельно) были отсеяны результаты получаемой энергии рекуперации, не попадающие в доверительный интервал.

Для вращающегося статора среднеарифметическое составило 558.5 (об/мин), для статичного статора 559.1 (об/мин).

Среднеарифметическое значение получаемой энергии рекуперации при механическом торможении для вращающегося статора составило 5.3 Дж, для статичного статора 2.04 Дж (рис. 2).

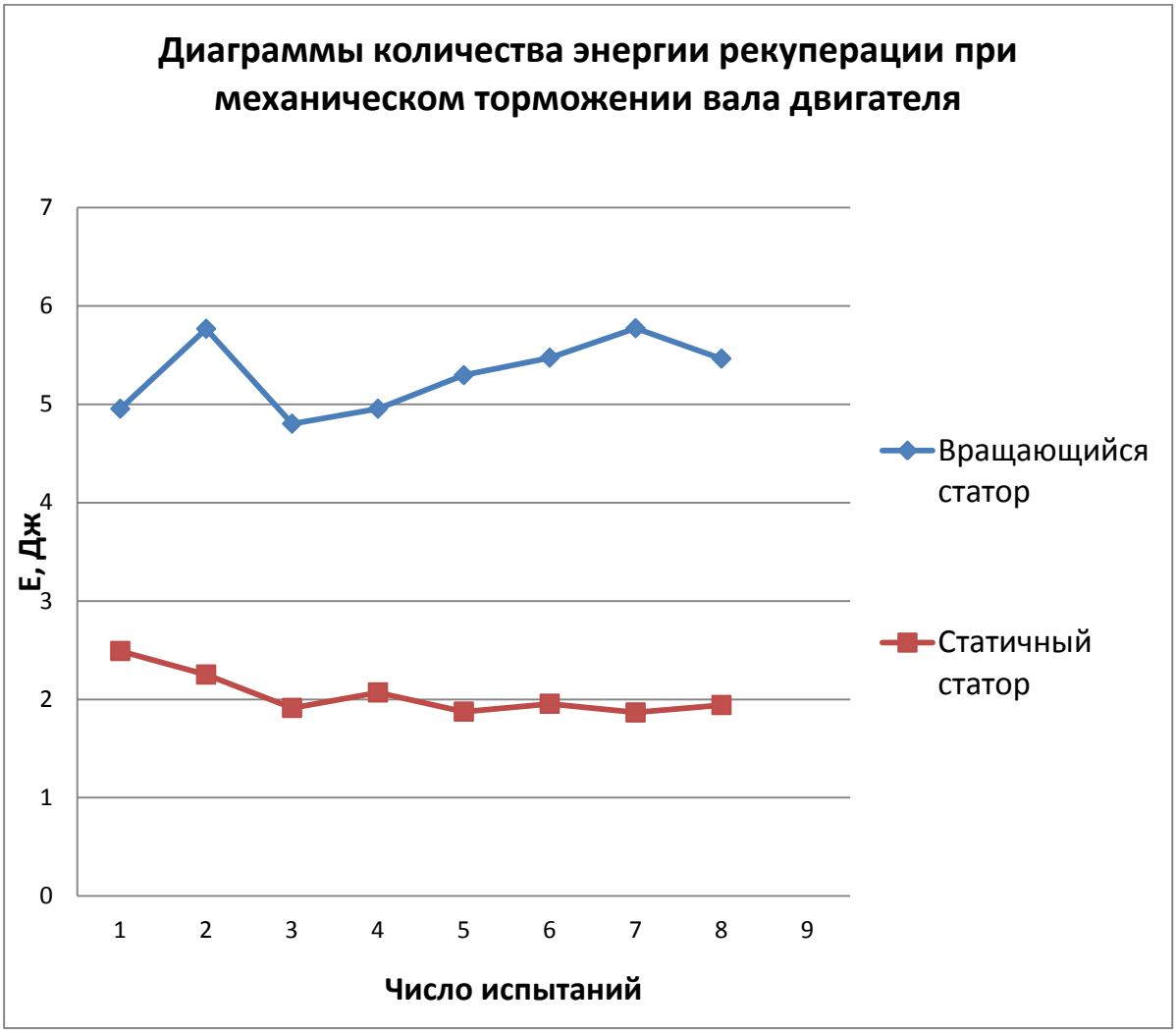


Рис. 2. Количество испытаний и число получаемой энергии для двух режимов.

Стоит обратить внимание на характер полярности выдаваемой энергии рекуперации, в электродвигателе новой конструкции напряжение меняло свою полярность, на обратную (рис. 3), а в конструкции со статичным статором, напряжение не меняло свою полярность (рис. 4).

Чтобы использовать энергию обратной полярности, можно использовать для этих целей переключатель полярности.

Вывод: в опытной конструкции двигателя при механическом торможении вала с вращающимся статором получается в 2,5 раза энергии рекуперации больше чем со статичным статором, что наглядно

иллюстрирует возможность повысить энергосбережение электродвигателей в режимах механического торможения.

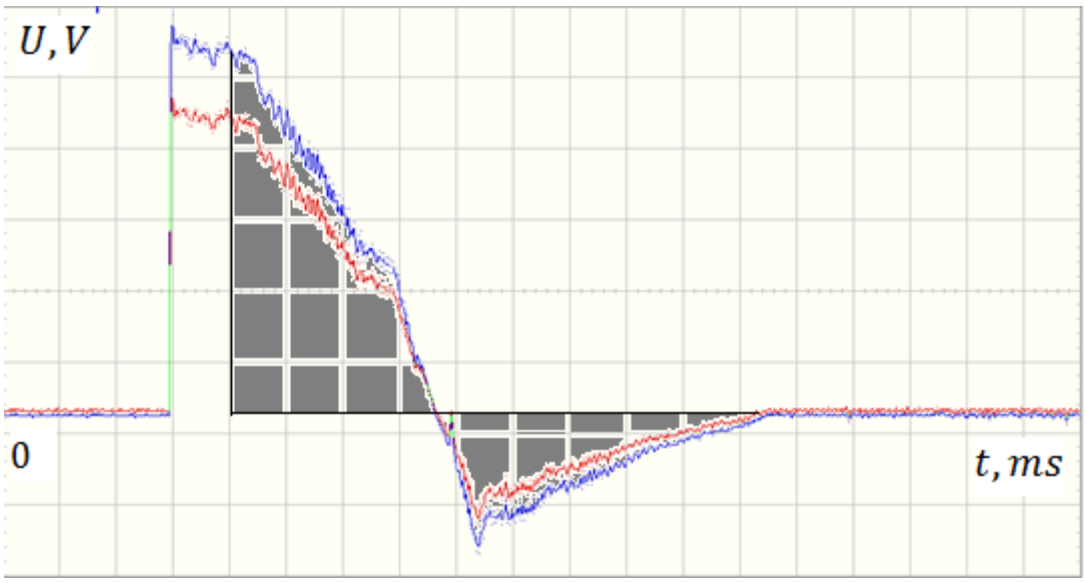


Рис. 3. Характеристика осциллограммы напряжения по времени на клеммах электродвигателя с вращающимся статором. Заштрихована область механического торможения. Одна клетка на осциллограмме для *t* (времени) равна 200 *мс*, для *U* (напряжения) равна 0.2 *В*.

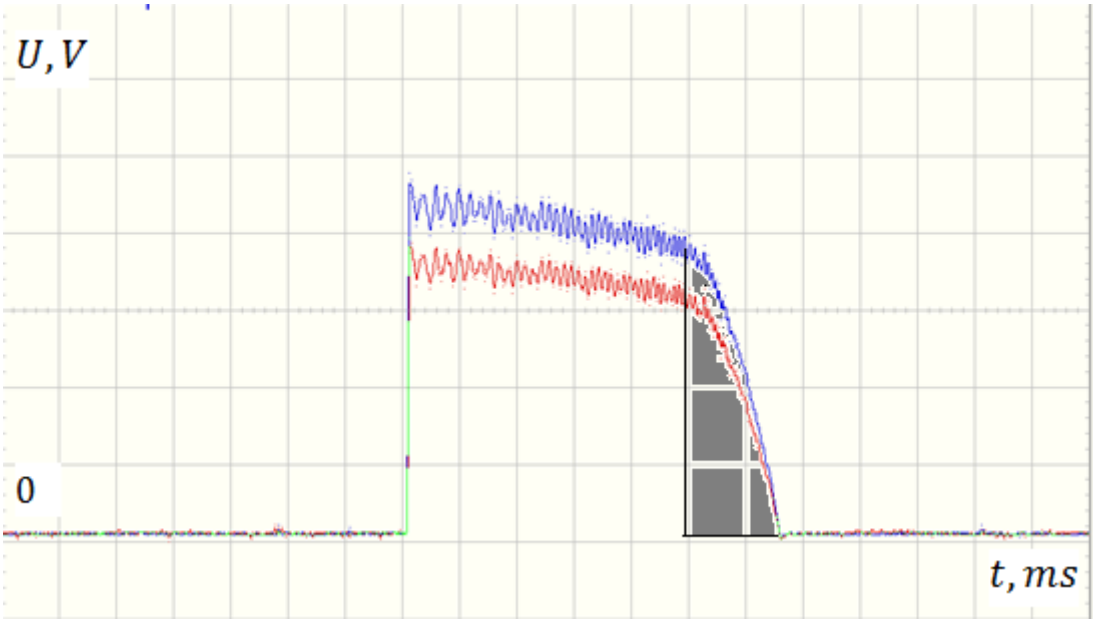


Рис. 4. Характеристика осциллограммы напряжения по времени на клеммах электродвигателя со статичным статором. Заштрихована область механического торможения. Одна клетка на осциллограмме для *t* (времени) равна 200 *мс*, для *U* (напряжения) равна 0.2 *В*.

Количество энергии рекуперации будет больше при более большей

нагрузке на валу (т.е. у более мощных двигателей) и максимальной частоты вращения вала перед торможением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.С. Барышников. Вращение статора двигателя при торможении вала, как дополнительный источник энергии / Высокие технологии, исследования, финансы. Т. 2: сборник статей Пятнадцатой международной научно-практической конференции Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике“ / под ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 368 с.
2. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб и доп. Л., «Энергия», 1974.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 320 с.: ил.
5. Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена: Учебник для нач. проф. образования / Э. М. Добровольская. – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2003. – 320 с.
6. С. Клеманов. Автомат-переключатель полярности напряжения [Электронный ресурс] / С. Клеманов // http://www.radioradar.net/. – 2011. – Режим доступа: http://www.radioradar.net/radiofan/motorcar_enthusiast/automatic_switch_polarity_voltage_charger.html
7. А. Компанеец. Рекуперативный тормоз для электромобилей и гибридов [Электронный ресурс] / А. Компанеец // Ecology.md. – 2010. – Режим доступа: http://www.ecology.md/section.php?section=tech&id=3594
8. В. Кукреш. Рекорд взят [Электронный ресурс] / В. Кукреш // Gudok.ru. – 2011. – Режим доступа: http://www.gudok.ru/transport/zd/?ID=884553&sphrase=2365975
9. Б. Ступин. Эффект возвращения энергии [Электронный ресурс] / В. Кукреш // Gudok.ru. – 2013. – Режим доступа: http://www.gudok.ru/transport/zd/?ID=884553&sphrase=2365975
10. W. F. Borchers, A. S. Farag, E. F. Knuth. Floating electromagnetic brake system [Электронный ресурс]/ Borchers, W. F. [и др.] // www.google.com/patents.-1998.-Режим доступа http://www.google.com/patents/US5775467?hl=ru&dq=5775467

Y.S. Baryshnikov[1], V.D. Azarov[2], M.V. Yakovitskaya[1]

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES INCREASE ENERGY SAVINGS WHEN BRAKING MOTOR SHAFT

[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Private entrepreneur Sorokin, Russia.

Abstract

In this paper we consider the possibility of increasing energy savings when braking the motor shaft. The experimental results showed that energy efficiency in new construction designed motor with mechanical braking, 2.5 times more than in the same motor stator with static.

Keywords: motor, recuperation, energy saving

REFERENCES

[1] Y.S. Baryshnikov. The rotation of the motor stator shaft during braking, as an additional source of energy / High technology , research and finance. Vol. 2 : a collection of articles Fifteenth International Scientific and Practical Conference Fundamental and applied research, development and application of high technology in the industry and the economy " / ed. AP Kudinova . - St. Petersburg. Univ. Polytechnic. University Press, 2013. 368 p. (rus.)

[2] Bobrovnikov L.Z. Electronics: Textbook for universities. 5th ed . , Rev . and add. - St. Petersburg. : Peter , 2004 . - 560 . : Il. - (Series " Textbook for high schools ") (rus.)

[3] Voldek A.I. Electrical Machines. Textbook for university students . tehn. Training. institutions. Ed. 2nd, revised and supplemented. L., "Energy" , 1974. (rus.)

[4] Voldek A.I. Popov V.V. Electrical Machines . Introduction to electrical engineering . DC machines and transformers : Textbook for universities. - St. Petersburg. : Peter , 2010 . - 320 p. : Il. (rus.)

[5] Dobrovol'skaya E.M. Metro Trains : A Textbook for the beginning. prof. Education / Elsa M. Dobrovol'skaya . - M.: IRPO : Publishing Center "Academy ", 2003 . - 320 . (rus.)

[6] S. Clemanov. Automatic switch voltage polarity [electronic resource] / S. Clement / / http://www.radioradar.net/. - 2011 . - Mode of access : http://www.radioradar.net/radiofan/motorcar_enthusiast/automatic_switch_polarity_voltage_charger.html (rus.

[7] A. Kompaneets. Regenerative brake for electric vehicles and hybrids [electronic resource] / A. Kompaneets / / Ecology.md. - 2010 . - Mode of access :

http://www.ecology.md/section.php?section=tech&id=3594
[8] V. Kukresh. Record taken [electronic resource] / B. Kukresh / / Gudok.ru. - 2011 . - Mode of access : http://www.gudok.ru/transport/zd/?ID=884553&sphrase=2365975
[9] B. Stupin. Effect return energy [electronic resource] / B. Kukresh / / Gudok.ru. - 2013 . - Mode of access: http://www.gudok.ru/transport/zd/?ID=884553&sphrase=2365975
[10] W. F. Borchers, A. S. Farag, E. F. Knuth. Floating electromagnetic brake system [electronic resource] / Borchers, WF [etc.] / / www.google.com/patents.-1998.-Mode of access: http://www.google.com/patents/US5775467?hl=ru&dq=5775467

УДК 669.14.018

Н.Р.Варгасов[1], Б.К. Барахтин[2]

НОВЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

[1]Николай Рафаилович Варгасов – д.т.н., профессор,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
тел.: +7 (812) 554-2737, E-mail: erker1@ yandex.ru.

[2]Барахтин Борис Константинович – к.ф-м.н., доцент,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Россия, Санкт-Петербург
тел.: +7 (812) 560-9954, E-mail: mail@crism.ru

Аннотация

Приведено описание построения карты процесса по результатам механических испытаний образцов рельсовой стали К76Ф в диапазоне температур 800-1100 ^{o}C и скоростей деформации 10-10^{-3} с$^{-1}$. С помощью карты и структурных исследований определен режим деформации, который позволяет в стали сформировать предельно фрагментированную структуру.

Ключевые слова: рельсовая сталь, горячая пластическая деформация, структура и свойства.

Развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации предусматривает разработку технологий производства рельсов с высоким эксплуатационным ресурсом. Поиски наилучшего сочетания механических свойств и внутреннего строения рельсовых сталей осуществляются в тесном взаимодействии теоретических и экспериментальных исследований [1,2]. Многочисленные лабораторные, стендовые и натурные испытания рельсов показали [3], что возможности применения низколегированных перлитных сталей далеко не исчерпаны. Ключевая проблема производства рельсов из перлитных сталей состоит в выборе такой термодеформационной обработки, по окончании которой будет сформировано предельно упрочненное (фрагментированное) состояние, способное обеспечить длительную эксплуатацию железнодорожных путей. Можно считать надежно установленным [4-7], что с помощью горячей пластической деформации аустенита и последующего эвтектоидного

превращения при охлаждении, в перлитной стали можно добиться наследования необходимой фрагментированной структуры.

Возможным решением задачи совершенствования технологий термодеформационной обработки металлов с достижением необходимого структурно-механического состояния является построение карт процессов, на которых в координатах технологического воздействия (степень деформации ε, скорость пластической деформации έ и температура T) указываются области формирования структур, ответственных за комплекс механических свойств [8]. В построении таких карт одним из новых подходов являются механические испытания образцов металла по режимам, имитирующим условия реального технологического процесса, с последующей математической обработкой зависимостей «напряжение – деформация» (σ(ε)) по выбранной синергетической [9], реологической [10] или структурной [11] модели.

Целью представленной работы является демонстрация оценки структурно состояния металла с помощью карты процесса по реологической модели горячей деформации и данным структурных исследований применительно к низколегированной рельсовой стали.

Для обработки результатов имитационного моделирования термодеформационного воздействия выбрана простая реологическая модель:

$$\sigma = Q\,\varepsilon^{n} = K\,\acute{\varepsilon}^{m}, \qquad (1)$$

которая удовлетворительно описывает распространенные технологические операции с применением горячей пластической деформации [12,13]. Здесь σ, ε и έ – истинные напряжение, деформация и скорость деформации, n – показатель упрочнения, m – показатель скоростной чувствительности напряжения течения, K и Q – коэффициенты.

Согласно [14] предполагается, 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:

$$P = G + J = \int \sigma d\acute{\varepsilon} + \int \acute{\varepsilon} d\sigma. \qquad (2)$$

Слагаемое $G = \int \sigma d\acute{\varepsilon}$ характеризует долю энергии, расходуемой на макроскопическое формоизменение материала, обусловленное зарождением, движением и взаимодействием дислокаций.

Компонента $J = \int \acute{\varepsilon} d\sigma$ представляет рассеяние механической энергии вследствие структурных превращений – аккомодации и модернизации структуры дефектов кристаллического строения. Составляющая J в значительной степени определяет изменение напряжения течения на стадии развитой пластической деформации [10]. Величина J оценивается через показатель скоростной чувствительности $m = \Delta(\lg\sigma) / \Delta(\lg\acute{\varepsilon})$ как:

$$J = \sigma\,\acute{\varepsilon}\,m / (m+1) \qquad (3)$$

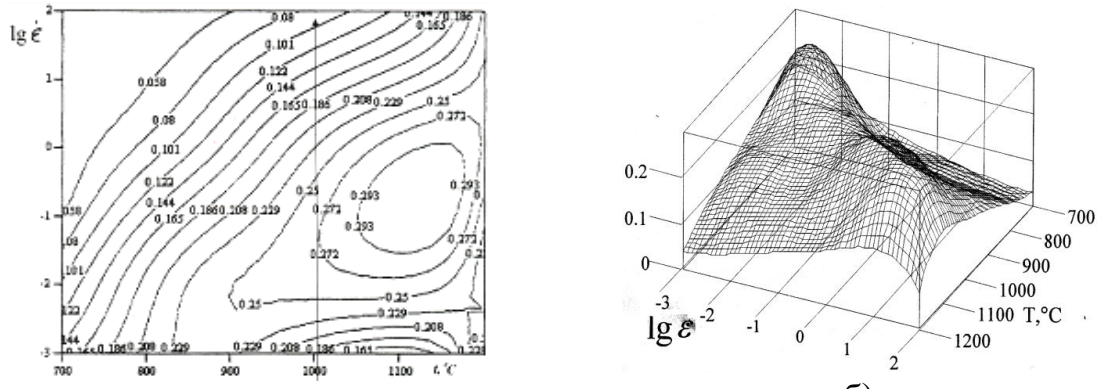
Для количественной аттестации распределения механической энергии используется безразмерный параметр η, который вычисляется по соотношению:

$$\eta = J / J_{max} = 2m / (m+1), \quad (4)$$

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, максимальное значение которой соответствует упруго-вязко-пластичной среде с полной релаксацией напряжений и указывает на возможность структурного фазового перехода.

Минимальная величина η соотносится с нестабильным и термодинамически неравновесным состоянием деформируемого материала. Во всех остальных случаях в поле параметров горячей деформации (ε-ε̇-T) распределение значений η характеризует способность структуры кристаллических дефектов рассеивать подводимую механическую энергию. Результаты обработки диаграмм σ(ε) при ε̇ = var и T = var с последующим вычислением значений η представляются в виде карт в линиях постоянных уровней или 3D реконструкций в координатах η-ε̇-T или η-lgε̇-T (рис. 1) [15].



а) б)

Рис. 1. Пример построения карты распределений коэффициента η = f(lgε̇, T) в линиях постоянных уровней –а) и трехмерной (3D) реконструкции – б) по данным горячей деформации технического железа, ε = 0,3 [16].

Образцы высотой 10 мм и диаметром 5 мм изготовлены из рельсовой стали К76Ф, химический состав которой приведен в таблице 1. С помощью дилатометра «ДИЛ 805» образцы деформировали сжатием до величины ε = 0,3 со скоростями 10^{-3} – 10 $с^{-1}$ в диапазоне температур от 800 до 1200°С.

Таблица 1

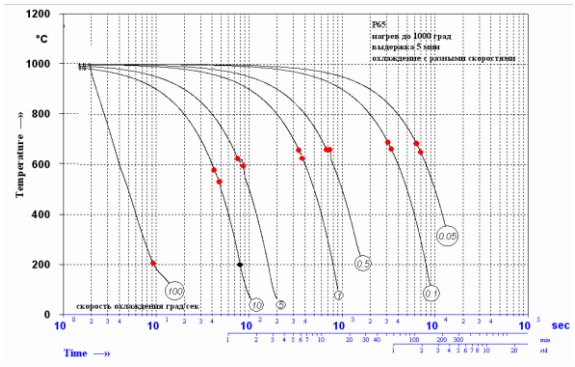
Химический состав стали К76Ф

Концентрация химических элементов, вес.%						
C	Mn	Si	V	S	P	Fe
0,75	0,89	0,3	0,06	0,012	0,013	основа

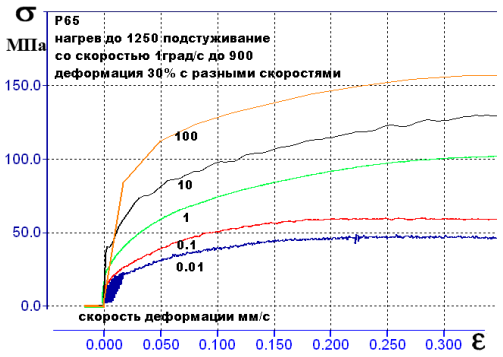
После деформации образцы разрезали вдоль оси. На образовавшихся сечениях по распространенным методикам [17] подготавливали шлифы. Для наблюдения и документирования изображений структур применялись микроскопы: световой («Обсервер») и электронный растровый («Тескан»). При обработке изображений структур использовались методы цифровой металлографии [18].

Методами термокинетического анализа и металлографии установлено (рис. 2, а), что после нагрева до 1000 ^{o}C и охлаждения с разными скоростями структура стали К76Ф характеризуется феррито-перлитным строением с содержанием свободного феррита 3%.

Вариациями скоростей и температур испытаний установлено, что по мере увеличения степени деформации тенденции в изменениях напряжений (рис. 2, б) не противоречат сложившимся представлениям о поведении металлических поликристаллов в условиях горячей деформации. Например, с ростом пластической деформации до ε = 0,3 напряжение плавно возрастает с выходом на насыщение, величина которого снижается с ростом температуры и уменьшением скорости деформации.



а)



б)

Рис. 2. Термокинетические диаграммы стали К76Ф –а) и примеры диаграмм σ(ε), полученных при сжатии образцов в камере дилатометра «ДИЛ 805» со скоростями толкателей 10^{-2}-10^{2} мм/с при Т = 900°С -б).

При обработке диаграмм σ(ε) замечено, что назначение разных температурно-скоростных режимов сжатия сопровождается изменениями, как показателя деформационного упрочнения n, так и величины показателя скоростной чувствительности m (табл. 2). Данные факты подтверждают

правильность выбора реологической модели, согласно которой «прочностная» реакция материала определяется конкуренцией процессов упрочнения и разупрочнения, а структурные перестройки обусловлены кинетикой дислокационного ансамбля как основной пластической моды диссипации механической энергии.

Исходные данные (ε, έ, T), взятые из диаграмм сжатия σ(ε) для расчета коэффициентов эффективности диссипации энергии и построения карт процесса в координатах η-lgέ-T, представлены в табл. 3. Результаты расчета значений коэффициентов эффективности диссипации в виде карты постоянных уровней приведены на рис. 3.

Таблица 2

Изменение показателей упрочнения и скоростной чувствительности

Интервал температур, ^{o}C	Показатель упрочнения n	Показатель скоростной чувствительности m
800 – 900	≈ 0,1	0,15
1000	0,25	>0,3

Таблица 3

Напряжение пластического течения стали К76Ф при различных температурно-скоростных условиях сжатия.

Деформация ε	Скорость деформации έ, c^{-1}	При температурах (ºС) напряжение σ, МПа				
		800	900	1000	1100	1200
0,1	0,001	60	42	25	16	12
	0,01	83	50	31	24	20
	0,1	120	72	52	36	33
	1	150	104	76	55	39
	10	202	128	101	77	58
0,2	0,001	75	48	26	18	12
	0,01	107	60	33	22	19
	0,1	149	90	65	40	33
	1	170	120	92	62	45
	10	230	148	115	90	70
0,3	0,001	80	49	26	16	10
	0,01	121	60	32	22	18
	0,1	160	98	67	40	28
	1	198	126	105	66	47
	10	241	154	125	102	76

Согласно использованной методологии [10,15], вид полученной карты отображает распределение механической энергии в процессе деформации образца за счет изменений в системе дефектов кристаллического строения. Можно видеть, что распределение значений коэффициентов диссипации характеризуется экстремумами: максимумом при T ~ 1000 ^{o}C и lgέ ~ -1÷-1,5 и двумя минимумами при T = 800÷1100 ^{o}C, lgέ>0 и T = 900÷1050 ^{o}C, lgέ ~ -3. Как правило, обнаружение максимумов связывают с образованием однородной равновесной структуры, а минимумы истолковывают как проявление в неоднородной структуре локальных пластических неустойчивостей с возникновением несплошностей в виде пор и микротрещин.

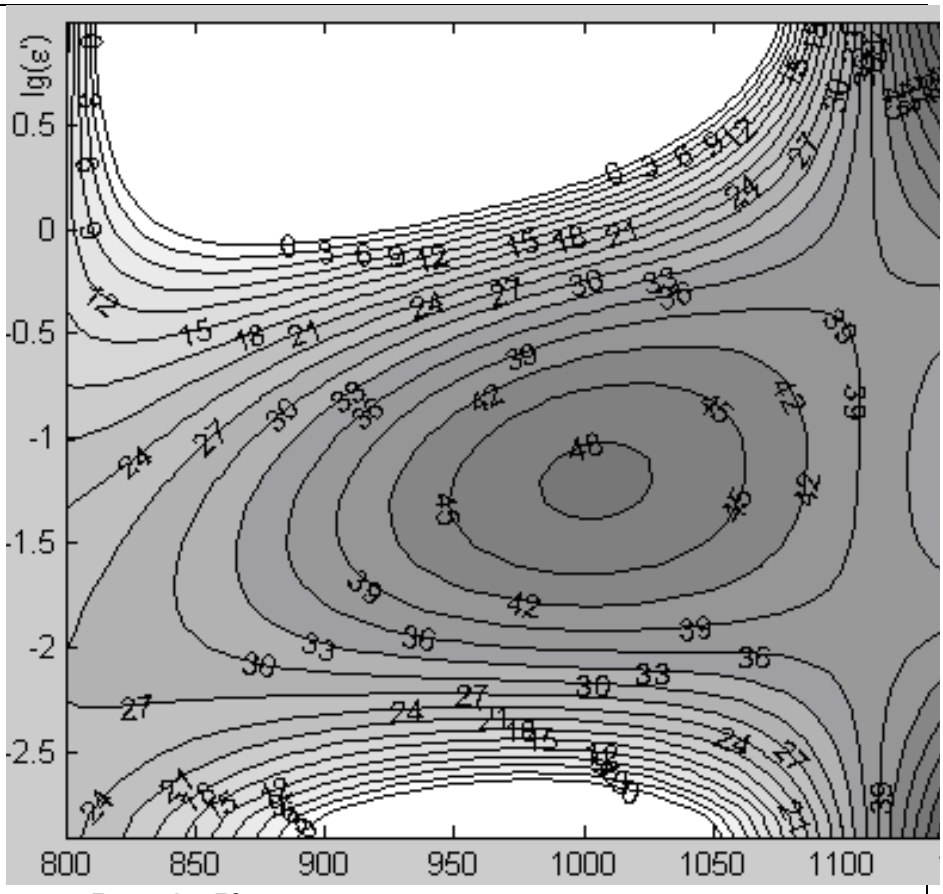
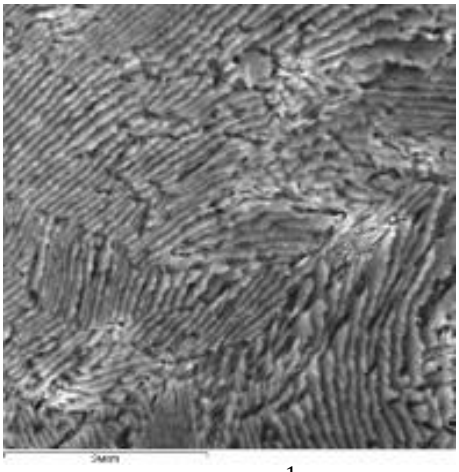


Рис. 3. Карта процесса горячей пластической деформации рельсовой стали К76Ф (ε = 0,3) в виде постоянных уровней значений коэффициентов η

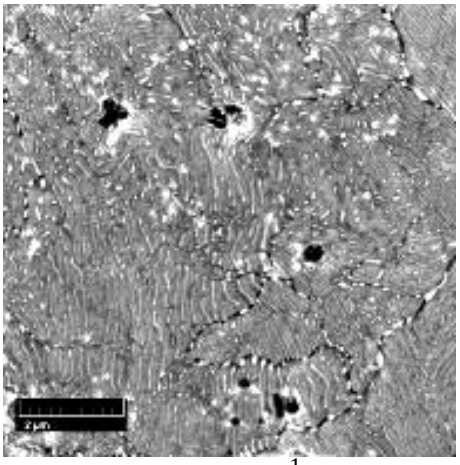
Анализом диаграмм σ(ε) и карт η(lgέ-T) установлено, что при степени деформации 0,1 и T = 1000 ^{o}C максимальное значение коэффициента η не превышает 25%, а при степени деформации 0,3 его величина возрастает почти до 50%. Подверженный влиянию деформации рост максимальных значений η указывал на возможное структурно-фазовое превращение за счет накопленной латентной энергии в дислокационной структуре.

Исследования внутреннего строения стали показали (рис. 4), что вариация условий горячей деформации не оказывает существенного влияния на межпластинчатые расстояния в перлитной составляющей (в среднем 0,12 мкм), которые обусловлены величиной переохлаждения металла при эвтектоидном превращении.

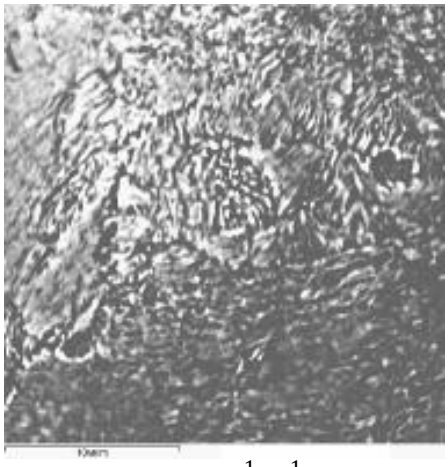
Зафиксировано, что в температурном интервале 950-1050 ^{o}C после деформации со скоростью 10 c^{-1} структура стали находится в неравноосном фрагментированном состоянии. В этом температурном интервале при скоростях, где обнаружена область наибольших значений коэффициента диссипации (η = 45±5 %), а также при меньших скоростях деформации ($-1 < \lg\dot{\varepsilon} < 0$) на границах зерен и перлитных колоний размером от 0,7 до 10 мкм были обнаружены мелкодисперсные выделения (преципитаты) карбидов ванадия.



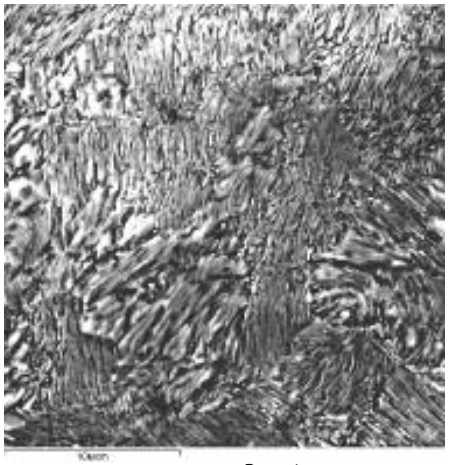
$\dot{\varepsilon}$ = 10 c^{-1}



$\dot{\varepsilon}$ = 1,0 c^{-1}



$\dot{\varepsilon} = 10^{-1}$ c^{-1}



$\dot{\varepsilon} = 10^{-3}$ c^{-1}

Рис. 4. Структура стали К76Ф после деформации при температурах 950-1050 ^{o}C с указанными скоростями.

Последующее снижение скорости деформации до 10^{-3} c^{-1} сопровождалось «хаотизацией» морфологии феррито-перлитного строения

с возникновением протяженных (до 15 мкм) и узких (менее 3 мкм) колоний со следами микропластической деформации в виде гладкого «бесструктурного» микрорельефа, типичного при локализации сдвигов и потере механической устойчивости металла.

Согласно примененной методологии, в области $lg\dot{\varepsilon}>0$ малые значения коэффициентов диссипации $0<\eta<25\%$ следует объяснить процессами упрочнения и фрагментации, благодаря которым и были созданы энергетические условия для структурно-фазового превращения с выпадением преципитатов. Ссылаясь на [19], можно добавить, что высокоскоростной режим деформации позволяет накопить латентную энергию, достаточную для начала динамической рекристаллизации.

В области $T = 900 \div 1050$ ^{o}C при $lg\dot{\varepsilon}<-2,5$ снижение величин η обусловлено, надо полагать, коагуляцией мелкодисперсных частиц. Вследствие снижения скорости деформации и, тем самым, увеличения продолжительности высокотемпературного воздействия, укрупняющиеся выделения утрачивают упрочняющее качество. Поэтому можно ожидать лавинообразного нарастания пластической деформации с возможным проявлением локальной нестабильности, на что и указывает снижение η до нуля.

Выводы

1. По результатам механических испытаний, имитирующих условия реального производства с операциями горячей пластической деформации, оценить структурно-механическое состояние низколегированной рельсовой стали К76Ф можно с помощью реологической модели и технологической карты процесса в виде распределения коэффициентов эффективности диссипации в координатах параметров воздействия ($\dot{\varepsilon}$, T или $lg\dot{\varepsilon}$, T).
2. Карты (процессов), построенные на основе реологической модели, чувствительны к процессам структурообразования, вызывающим как упрочнение, так и разупрочнение металла.
3. Области параметров, где на картах процесса обнаруживаются максимальные значения коэффициентов диссипации, указывают на вероятность структурно-фазового перехода с образованием нового структурного состояния. Минимальные значения коэффициентов диссипации могут указывать на режимы горячего сжатия, при которых формируется неравновесная структура в виде фрагментированного (предельно упрочненного) или локального пластически нестабильного состояния.
4. В условиях сжатия в интервале температур 800-1100 ^{o}C со скоростями деформации $\dot{\varepsilon} > 1,0$ c^{-1} в стали К76Ф возможно достижение предельно фрагментированного (упрочненного) состояния. Предполагается, что карбиды ванадия, обнаруженные в структуре стали, тормозят процессы

динамической рекристаллизации. Поэтому при разработке и изготовлении рельсовой стали, выбор химического состава стали актуален.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сталинский Д.В., Рудюк А.С. Современное состояние производства и качества железнодорожных рельсов // Сталь.– 2011.– №5.– с.73 – 77.
2. Сравнение затрат жизненного цикла обычных и термоупрочненных рельсов // Железные дороги мира. – 2006. – №3. – с.71 – 74.
3. Исследование металлургических основ износа рельсов// Железные дороги мира. – 2005. – №10.– с.76 – 78.
4. Счастливцев М.В. Перлит в углеродистых сталях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 312 с.
5. Счастливцев В.М., Табатчикова Т.И., Яковлева И.Л. и др. Влияние температуры распада аустенита на морфологию бейнита и свойства низкоуглеродистой стали после термомеханической обработки // Физика металлов и металловедение.– 2013. – т.114. – №5. – с.457.
6. Hutchinson C.R. The coexistence of multiple “pearlites” in isothermally treated multicomponent steels / 8 Sympos. On Bulk Metall. Glasses, San Diego, Calif., Febr.27–March 3, 2011. // Met. and Mater. Trans. A., 2012. v.43,№8. c.2567–2570.
7. Kumar P., Gurao N.P., Haldar A., Suwas S. Texture and microstructural evoluition in pearlitic steel during triaxial compression. // Met. and Mater. Trans. A, 2012. v.43,№6. c.2043–2055.
8. Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Диаграммы высокотемпературной деформации. Структура и свойства термомеханически упрочненных сталей // Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справ.,т.3. М.: Интермет Инжиниринг. – 2007. – с.404–621.
9. Колбасников Н.Г. Структура. Энтропия. Фазовые превращения. – СПб.: Наука, 2006. – 363 с.
10. 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.
11. Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Карты структурных состояний для оптимизации режимов горячей деформации сталей // Физика металлов и металловедение. – 2001. – Т.91 – №1. – с.79 – 89.
12. Колбасников Н.Г. Теория обработки металлов давлением. – СПб.: Изд-во СПб ГПУ, 2000. – 314 с.

13. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с
14. Hot Working Guide A Compendium of Processing Maps Edited by Y.V.R.K. Prasad, S. Sasidhara. Department of Metallurgy Indian Institute of Science: Bangalore, 2004. – 560 p.
15. Орыщенко А.С., Малышевский В.А., Барахтин Б.К., Варгасов Н.Р., Немец А.М. Методология проведения пластометрических испытаний конструкционных металлов и сплавов. Справ.-метод. рук-во по применению уник. оборудов. ЦКП ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» «Состав, структура и свойства функц. и конструкц. материалов».- СПб.: Изд-во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2010. – 86 с.
16. 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
17. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: Справ. / Б.К. Барахтин, А.М. Немец; Под. ред. Б.К. Барахтина — СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 490 с.
18. Барахтин Б.К., Чашников В.Ф. Программа ЭВМ для мультифрактального анализа изображений структур металлов и сплавов // Вопросы материаловедения. – 2001. – N4(28). – с.5 – 8.
19. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.

N.R.Vargasov[1], B.K. Barakhtin[2]

NEW APPROACH TO ESTIMATION OF SRUCTURAL CONDITION RAIL STEEL AT HOT DEFORMATION

[1]St.Petersburg State Polytechnical University, Russia
[2]St.Petersburg State Marine Technical University, Russia

Abstract

The description a process map forming based on the results mechanical testing rail steel K76F probes at temperatures 800-1100 ^{o}C and stain velocities 10-10^{-3} c^{-1} is done. With process maps and structural investigations results the pressing regime for the fragment strong condition structure steel attaining has defined.

Key words: rail steel, hot plastic deform, structure, properties.

REFERENCES

[1] Stalinski D.V., Rudjuk A.S. Sovremennoe sostoyanie proizvodstva i kachestva zheleznodorozhnyh rel''sov // Stal''.– 2011.– №5.–p.73–77. (rus.)

[2] Sravnenie zatrat zhiznennogo cikla obychnyh i termouprochnyonnyx rel''sov //Zheleznye dorogi mira. – 2006. – №3. – p.71 – 74. (rus.)

[3] Issledovanie metallurgicheskih osnov iznosa rel''sov //Zheleznye dorogi mira. – 2005. – №10.– p.76 – 78. (rus.)

[4] Schastlivcev M.V. Perlit v uglerodistyh staljax. – Ekaterenburg: UrO RAN, 2006. – 312 p. (rus.)

[5] Schastlivcev M.V., Tabachnikova T,I,, Jakovleva I.L. Vlijanie temperatury raspada austenita na morfologiju beinita i svoistva nizkouglerodistoi stali posle termomehanicheskoi obrabotki // Fizika metallov i metallovedenie – 2013. – т.114. – №5. – p.457. (rus,)

[6] Hutchinson C.R. The coexistence of multiple “pearlites” in isothermally treated multicomponent steels / 8 Sympos. On Bulk Metall. Glasses, San Diego, Calif., Febr.27–March 3, 2011. // Met. and Mater. Trans. A., 2012. v.43,№8. p.2567–2570.

[7] Kumar P., Gurao N.P., Haldar A., Suwas S. Texture and microstructural evoluition in pearlitic steel during triaxial compression. // Met. and Mater. Trans. A, 2012. v.43,№6. p.2043–2055.

[8] Dobatkin C.V. Kaputkina L.M. Prokoxkin S.D. Diagrammy vysokotemperaturnoi deformacii. Struktura i svoistva uprochnyonnyh stalei // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka stali i chuguna: Sprav., t.3. M.: Intermet Inzheniiring. – 2007. – p.404–621. (rus.)

[9] Kolbasnikov N. G. Struktura. Jentropija. Fazovye prevrashhenija. – SPb.: Nauka, 2006. – 363 p. (rus.)

[10] Vargasov N.R. Rybin V.V. Optimizacija temperaturno-skorostnyh rezhimov plasticheskoi deformacii po kriteriju dissipacii mehanicheskoi jenergii // Metallovedenie i termicheskaju obrabotka metallov. – 1999. – №9. – p. 52 – 56. (rus.)

[11] Dobatkin C.V. Kaputkina L.M. Karty strukturnyh sostojunii dlju optimizacii rezhimov gorjuchei defopmacii stalei // Fizika metallov i metallovedtnie. – 2001. – T.91 – №1. – p.79 – 89. (rus.)

[12] Kolbasnikov N. G. Teoriju obrabotki metallov davltniem. – SPb.: Izdatel''stvo SPbGPU, 2000. – 314 p. (rus.)

[13] Rybin Ju.I, Rudskoi A.I., Zolotov A.M. Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tehnologicheskih processov odrabotki metallov davleniem. – SPb.: Nauka, 2004. – 644 p. (rus.)

[14] Hot Working Guide A Compendium of Processing Maps Edited by Y.V.R.K. Prasad, S. Sasidhara. Department of Metallurgy Indian Institute of Science: Bangalore, 2004. – 560 p.
[15] Orishhenko A.S., Malishevski V.A., Barahtin B.K., Vargasov N.R., Nemec A.M. Metodologiju provedeniju plastometricheskih ispytanii konstrukcionnyh metallov i splavov. – SPb.: Izd-vo FGUP CNII KM Prometei, 2010. – 86 p.
[16] Barachtin B.K., Vargasov N.R., Lebedeva N.V., Rybin V.V. Strukturnye izmeneniju v zheleze v uslovijuh gorjuchei deformacii szhatiem // Deformaciju i razrushenie materialov. – 2006. – N7. – p. 9–15.
[17] Metally i splavy. Analiz i issledovanie. Fiziko-analiticheskie metody issledovaniju metallov i splavov. Nemetallicheskie vkljuchenija: Sprav. / B.K. Barahtin, A.M. Nemec.Б.К. Pod. Red. B.K. Barahtina – SPb.: NPO «Professional», 2006. – 490 p. (rus.)
[18] Barahtin B.K., Chashnikov V.F. Programma dlja mul''tifraktal''nogo analiza izobrazhenii struktur metallov i splavov // Voprosy materialovedenija. – 2001. – N4(28). – p. 5 – 8. (rus.)
[19] Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. Rekristalizacija metallov splavov. 3-e izd. – M . MISIS, 2005. – 432 p. (rus.)

УДК [532. 525/2 : 534] +621.78

Г.А Воробьева[1], Е.Е.Складнова[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

[1]Галина Анатольевна Воробьева, к.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова
E-mail: Vorobijova_Galina@mail.ru

[2]Елена Евгеньевна Складнова, к.т.н., профессор
Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет « Военмех» им. Д.Ф. Устинова
E-mail: Skladnovae@mail.ru

Аннотация

В статье приведены результаты исследования структур стали Р6М5, подвергнутых стандартной термической обработке и дополнительной аэротермоакустической обработке (АТАО); выявлены различия их структурных параметров. Прослежена связь между изменением структуры и механических свойств инструментальных сталей. Показаны преимущества технологии АТАО, обеспечивающей повышение износостойкости инструмента в 1,5-3раза.

Ключевые слова: аэротермоакустическая обработка, термическая обработка, быстрорежущие стали, механические свойства, диффузия , микроструктура.

Развитие технологии машиностроения в значительной степени зависит от технического уровня инструментального производства. Срок службы инструмента, число промежуточных перезаточек существенно влияет на стоимость готовых изделий. Условием производства высококачественного и долговечного инструмента является выбор инструментального материала, соответствующего назначению и нагрузкам, возникающим при его работе. При этом следует учитывать структурные, металлургические, эксплуатационные и технологические факторы, определяющие поведение материала в процессе эксплуатации. Материал изделия целесообразно рассматривать как интегральное понятие, объединяющее в себе вещество, технологию его получения, конструкцию, технологию её изготовления и обработки. Долговечность инструмента зависит не только от свойств мате-

риала, определяемых технологией изготовления и объёмного упрочнения, но и в значительной степени от свойств поверхности. Для достижения более высоких эксплуатационных свойств применяются как хорошо известные методы, так и вновь создаваемые, как правило, использующие комбинированные средства воздействия[1,2]. Современная теория связывает свойства металла с его структурой. При этом формирование структуры обусловлено изменениями термодинамического состояния системы, происходящими под воздействием как внешних факторов (тепловые потоки, пластическая деформация, физические поля и т.д.), так и внутренних, наведенных внешним воздействием и стремящихся вернуть систему в равновесное состояние (при этом в материале протекают процессы самоорганизации). Пороговые значения этих факторов зависят от текущего состояния и определяют кинетические особенности процессов структурообразования металлов.

Создание новых наукоемких технологий невозможно без привлечения результатов современных исследований газодинамики струйных течений, аэроакустики, термодинамики, физики твердого тела. Перспективным является использование возможности управлять характеристиками металлов и сплавов (твердостью, износостойкостью, вязкостью и др.) с помощью их структурных и фазовых изменений, которые осуществляются в металлах под воздействием мощных акустических полей[3].

Для создания акустических полей необходимы технологические установки, способные с малыми энергозатратами обеспечить требуемые амплитудно-частотные и мощностные характеристики акустических полей. Накопленный опыт и имеющиеся результаты по газоструйным генераторам звука позволяют проводить не только исследования по аэроакустическому воздействию, но и обработку материалов в промышленных масштабах [4,5].

Аэротермоакустическая обработка (АТАО) материалов относится к числу комбинированных средств воздействия на материалы. При ее проведении осуществляется воздействие температурных и акустических полей с целью формирования свойств материалов в желаемом направлении как во всём объёме (глубина упрочнённого слоя определяется прокаливаемостью стали), так
и в поверхностном слое благодаря образованию поверхностных оксидных структур или применению АТАО после одного из видов химико-термической обработки.АТАО как упрочняющая обработка представляют собой организованную определенным образом термообработку в мощном акустическом поле звукового диапазона частот, при одновременном воздействии потока газа в диапазоне скоростей от десятка до сотен метров в секунду. При этом охлаждение металла может проводиться до отрицательных температур в расширяющемся потоке газа, т.е. дополнительно реализуется криогенная обработка.

Специальное технологическое оборудование для АТАО включает газоструйный генератор звука (ГГЗ), в резонаторе которого происходит охлаждение деталей.Основными операциями в технологии АТАО являются нагрев деталей (заготовок) до определённых температур и последующее охлаждение, включая криогенное воздействие, в мощном акустическом поле звукового диапазона дискретных частот с уровнем звукового давления 150-170 дБ в потоке газа [3].

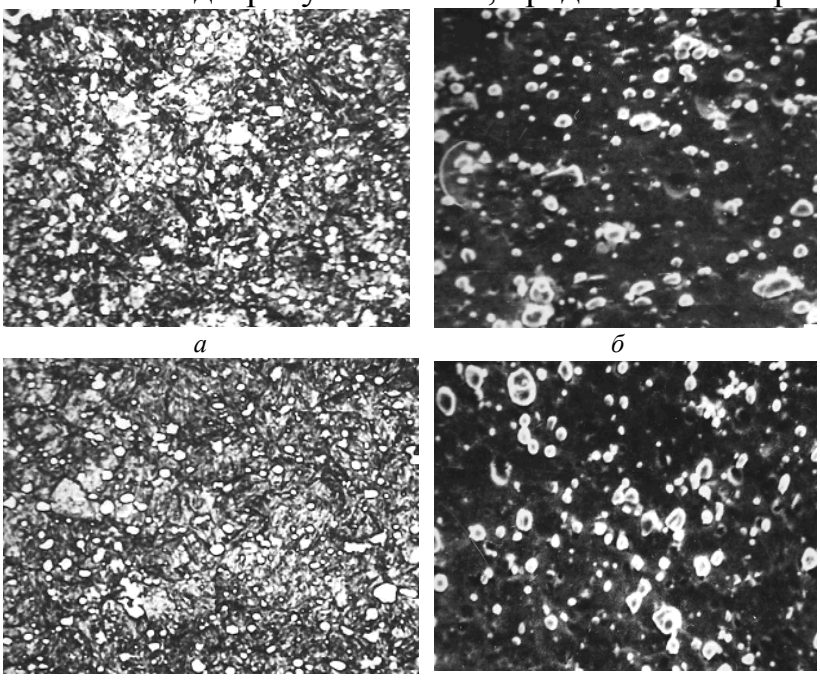
При АТАО металлических материалов происходит изменение микроструктуры, субструктуры и дислокационной структуры сталей и сплавов[6]. Основным структурным изменением в стали является измельчение зерна и структурных составляющих, в том числе и карбидов. Все это требует всестороннего анализа как структурообразования при АТАО, так и его влияния на механические, технологические и эксплуатационные свойства материалов. Анализ влияния АТАО на структуру осуществлялся параллельно с оценкой структуры материалов, прошедших обработку по стандартным режимам, сравнение которых со структурами после АТАО позволяет оценить эффективность последней. Разработка режимов АТАО в каждом случае носит индивидуальный характер и не может быть механически перенесена от одного материала к другому. Технология СТО определяет структуру сплава, обладающую определенным комплексом физико-механических свойств. Каждый режим АТАО приводит к формированию своей, отличающейся от других структуры и от структуры, полученной после стандартной термической обработки (СТО).

Одним из основных эффектов любого оптимального режима АТАО является измельчение структурных составляющих сталей и сплавов, что обусловлено несколькими факторами: многоциклическим комплексным воздействием акустического поля с частотой 0,4-2,0 кГц (уровень звукового давления 160-185 дБ), нестационарного низкоскоростного потока газа с одновременным воздействием напряжений, возникающих в процессе охлаждения до $T \leq (250\text{-}320°К)$ материала, нагретого перед началом обработки, а при наличии фазовых превращений – напряжений, возникающих при переходе через точку превращения (фазовый наклеп).

В настоящей работе оценивалось влияние АТАО на структуру инструментальных сталей для режущего инструмента. К числу наиболее широко распространенных инструментальных материалов относятся быстрорежущие стали. В состав быстрорежущих сталей входят ряд дорогостоящих легирующих элементов. Повышение качества быстрорежущих сталей на основе устранения или сведения к минимуму сегрегации карбидов, оказывающей негативное влияние на важные эксплуатационные свойства, особенно в изделиях больших размеров и мелкоразмерного инструмента, является целью производителей инструментальных материалов. Увеличению механических и функциональных свойств сталей препятствует карбидная неоднородность и наличие крупных карбидов. Существует зависимость

между размером зерна и прочностью при изгибе, а также стойкостью режущего инструмента при наличии динамических нагрузок, эти характеристики ухудшаются с увеличением размера зерен. Прочность при изгибе является принятой мерой вязкости и способности выдерживать нагрузку быстрорежущей инструментальной стали.

Исследовалось влияния АТАО, осуществляемой в качестве дополнительной обработки на структуру и свойства стали Р6М5, предварительно подвергнутой полному циклу СТО. Микроструктура стали Р6М5 в исходном состоянии после СТО : закалка с температуры 1220°С в масло, трехкратный отпуск при температуре 550°С, с выдержкой 1 ч – отпущенный мелкокристаллический мартенсит и карбиды, представлена на рис.1.а,б. После СТО структура характеризуется наличием крупных карбидов, в ряде случаев имеющих острогранную форму (рис.1а) , и неравномерным распределением карбидной фазы. По данным рентгеновского фазового анализа карбиды идентифицируются как Fe_3W_3C и Fe_2W_2C. Микроструктура стали, дополнительно подвергнутой АТАО, представлена на рис. 1 в, г.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5: *а, б* – стандартная термическая обработка; *в, г* – аэротермоакустическая обработка (АТАО) *а, в* – х1000; *б, г* – микроструктура стали во вторичных электронах

В противоположность структуре сталей после СТО, имеющих сегрегацию карбидов, АТАО уменьшает размер карбидов, увеличивается количество мелких карбидов, в значительной степени устраняется неравномерность в их распределении, изменяет морфологию карбидной фазы: карбиды преимущественно имеют глобулярную форму. После АТАО частично протравливаются границы зерен, декорированные дисперсными карбидами и имеющие в ряде случаев зубчатую форму.

Микроструктура сверл, изготовленных из стали Р6М5, подвергнутых СТО и СТО + АТАО изучалась после эксплуатации. Структура стали в поверхностном слое и в центре, после дополнительной АТАО, характеризуется более тонкой дисперсностью карбидов, измельчением зерна, что подтверждается количественными характеристиками структуры стали приведенными в (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики микроструктуры стали Р6М5

Режим обработки	Область исследования	Размер, мкм		Микротвердость, H_{100},		
		зерна	Карбидов мелких / крупных	Min	Max	Средн.
СТО	поверхность	6,4	2,73/ 7,6	642	724	680
АТАО		5,8	2.33/ 7,1	642	724	680
СТО	середина	6,53	2,6/ 7,6	572	828	700
АТАО		5,6	1,87/ 7,27	643	1097	870

После АТАО происходит уменьшение размера зерна как на поверхности так и в центре, измельчение крупных и мелких карбидов (размер последних уменьшается более существенно), размер крупных карбидов в поверхностном слое меньше чем в центре. Термические и структурные напряжения, возникающие при проведении АТАО, взаимодействуют с полем напряжений дислокаций, что определяет повышение дисперсности кристаллов α – фазы, общую структурную фрагментацию и измельчение карбидной фазы, приводит к повышению твердости.

Исследовалась микроструктура и определялась микротвердость от поверхности к центру структуры 2х партий сверл из стали Р6АМ5 диаметром 3,6мм, подвергнутых испытаниям на износостойкость (28 отверстий после СТО и 192 отверстия после АТАО). После АТАО микроструктура в поверхностном слое и центре характеризуется более дисперсной и равномерно распределенной карбидной фазой, большей травимостью. Результаты изменения микротвердости после указанных выше технологий обработки представлены на (рис.2). Как видно из приведенных результатов микротвердость в поверхностном слое (~100мкм) после АТАО несколько ниже, чем после СТО. При удалении от поверхности характер изменения микротвердости одинаков ~ до 300мкм, ближе к середине микротвердость образца после АТАО выше, чем исходного. Более низкие значения твердости в поверхностном слое, очевидно, определяется тем, что сверло после АТАО проработало значительно больше, чем после СТО; следовательно, поверхность подвергалась воздействию большего количества теплосмен. Это способствовало увеличению диффузионной подвижности углерода, выделению дисперсных карбидов из мартенсита, уменьшению степени пе-

ресыщенности твердого раствора, коагуляции карбидной фазы, что и привело к снижению твердости (рис. 2). Распределение карбидов в стали по размерам полученное по результатам статистической обработки снимков микроструктуры стали во вторичных электронах, представлено на диаграмме (рис. 3). После АТАО средний размер карбидов уменьшается с 1,5 до 0,8-1 мкм, практически отсутствуют крупные карбиды размером более 2мкм, существенно возрастает количество карбидов менее 0,5мкм.

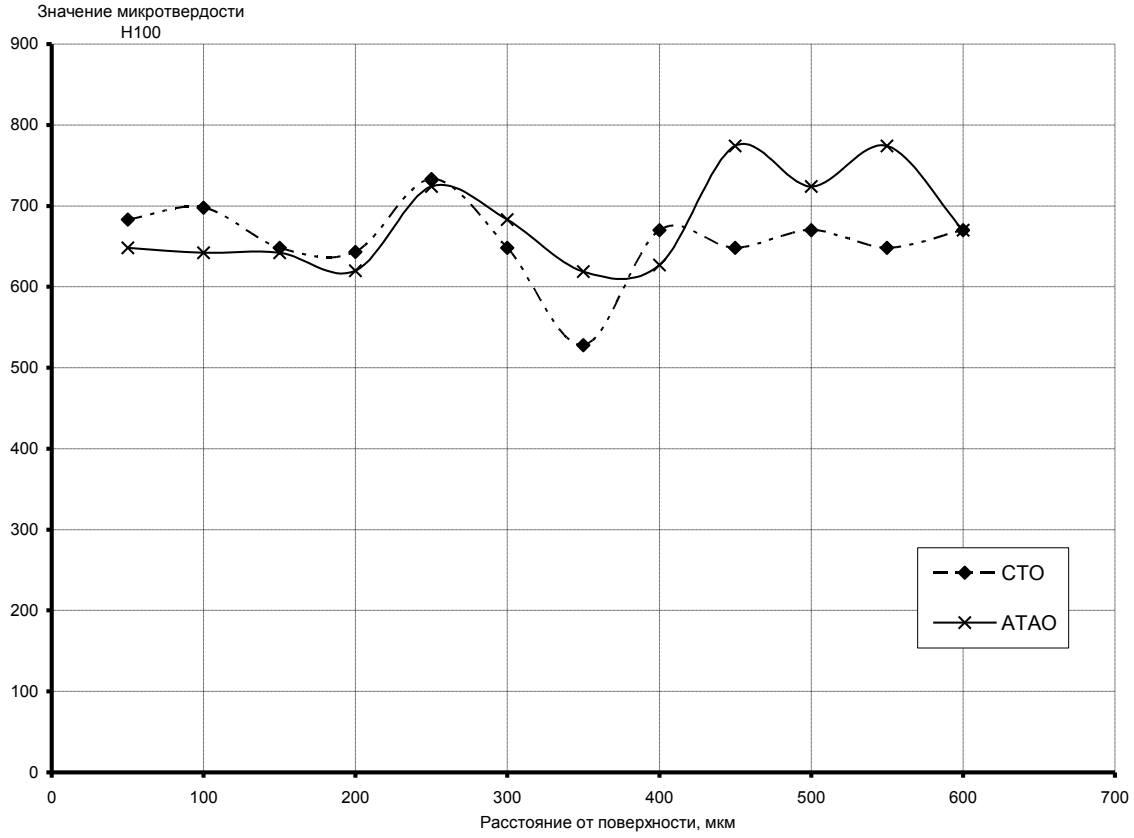


Рис. 2. Изменение микротвердости стали Р6М5 по сечению материала сверла.

Высокая плотность дислокаций в кристаллах мартенсита создает условия для развития процессов полигонизации при проведении АТАО. Что и подтверждается данными рентгеноструктурного анализа, которые свидетельствуют об увеличении упругих[искажений второго рода в кристаллической решетке $(\Delta a/a)10^{-3}$ на 4 и измельчении блоков (D) на 140нм после проведения АТАО. Увеличение микроискажений $(\Delta a/a)$эквивалентно повышению плотности дефектов кристаллического строения (дислокаций) с упрочнением до 200МПа. Дополнительное упрочнение вносит уменьшение неоднородности в распределении карбидной фазы и ее измельчение. Процессы изменения микроструктуры при АТАО связаны с протеканием микропластической деформации, в результате которой происходит измельчение карбидов, т.е. АТАО оказывает действие аналогичное теплой

деформации при $T<A_1$ в процессе которой путем полигонизации образуются субграницы , способствующие делению карбидов; карбиды делятся не только благодаря их ускоренному растворению у выходов субграниц, но и в местах повышенной плотности дислокаций.[7]. Образование новых мелких карбидов происходит на дислокациях, дефектах упаковки, границах зерен т.е. в тех зонах, где состав матричной фазы содержит меньшее количество этих элементов, чем на границе раздела α- твердый раствор-карбид; образующиеся мелкие частицы сфероидизируются.

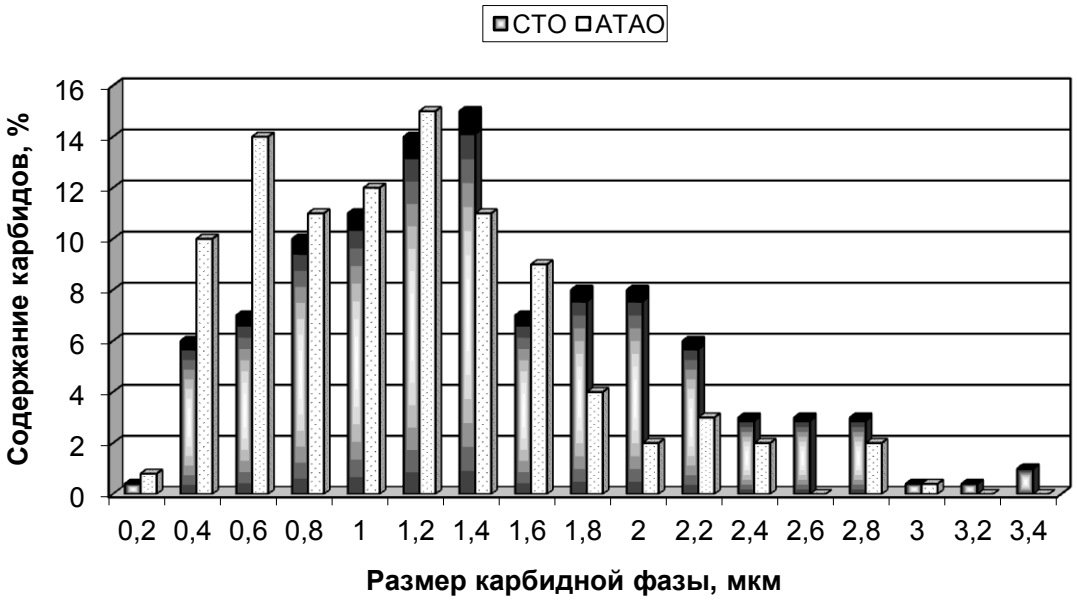


Рис. 3. Влияние технологии обработки на размер и количество карбидов в стали Р6АМ5.

Около краев и вершин с малым радиусом кривизны концентрация углерода в матрице повышена , выравнивание состава внутри матрицы приводит к повышению его концентрации на участках с большим радиусом кривизны, где из пересыщенного раствора выделяется карбид. В работе [8] показана возможность растворения специальных карбидов в сталях и при холодной пластической деформации, при этом перенос элементов внедрения (углерода) из карбида в матрицу, очевидно, происходит путем образования углеродных атмосфер на дислокациях и их перемещения вместе с дислокациями. Диффузия углерода в сталях может происходить и при отрицательных температурах (230К). Для выбора оптимального варианта АТАО проводился неразрущающий контроль эффективности новой технологии путем замера микротвердости по режущей ленточке с конца к хвостовику на четырех витках режущей кромки сверл. Общее число ~ 100 сверл Предварительно оценивалась микротвердость после СТО. Усредненные результаты замеров микротвердости приведены в табл.2.

Из данных приведенных в табл.2 очевидно, что при использовании АТАО по всем приведенным режимам имеет место повышение средних и

минимальных значений твердости, и только при использовании режима АТАО 2 максимальные значения твердости не возрастают. Наиболее значительное повышение твердости наблюдается при использовании режима АТАО 4, являющегося оптимальным. Так как температура обработки не превышает температур фазовых превращений, то структурные изменения связаны с протеканием процессов, вызывающих образование дефектов кристаллической структуры. В процессе обработки возникает градиент напряжений на границе раздела карбиды – твердый раствор, так как структурные составляющие имеют разные физические свойства(теплопроводность, коэффициент термического расширения), что способствует интенсификации диффузионных процессов в большей степени, чем градиент концентраций[9,10,11]. Изменение состояния зерен α – твердого раствора (увеличение микроискажений и дисперсности его блоков) приводит к повышению твердости стали.

Таблица 2

Значения микротвердости H_{100} сверл из стали Р6М5 после СТО и АТАО

Режим обработки	Микротвердость, H_{100}			ΔH_{100}*	ΔH_{100}	ΔH_{100}
	Min	Max	Средн.	Min	Max	Средн.
СТО	572	1097	820	258	191	280
АТАО 1	830	1288	1100			
СТО	642	1288	804	182	-	228
АТАО 2	824	1288	1032			
СТО	642	1097	892	304	191	216
АТАО 3	946	1288	1108			
СТО	572	1097	794	374	435	436
АТАО 4	946	1532	1230			

* ΔH_{100}- различие в значениях (увеличение) твердости после АТАО по сравнению со стандартной обработкой. Режимы обработки отличаются температурой предварительного нагрева.

Диспергирование и гомогенизация структуры при АТАО является результатом мультипликативного образования субзерен и зерен, что ведет к увеличению удельной поверхности субграниц и границ зерен, оказывающих барьерное действие при движении дислокаций. Большинство этих барьеров оказывается « полупроницаемыми» (мало и среднеугловые границы, когерентные карбиды в α – фазе), что способствует релаксации пиковых напряжений, возникающих у барьера путем эстафетной передачи деформации в соседние микрообъемы и уменьшению опасности образования хрупкой трещины. Кроме того, фрагментация структуры после АТАО уменьшает количество дислокаций, преходящих к препятствию и образующих локальные скопления, что также снижает опасность возникновения хрупкого разрушения. Совокупность структурных изменений при воздействии АТАО определяет возможность полезного использования ее для

достижения эффектов не только повышенной прочности по сравнению с обычной обработкой, но и одновременного уменьшения склонности к хрупкому разрушению [3].

Структура стали в продольном и поперечном направлении практически не отличается. АТАО приводит к гомогенизации структуры и субструктуры стали, измельчению карбидной фазы, за счет диспергирования, что и обеспечивает более высокие механические свойства(табл.3). АТАО обеспечивает повышение как механических так и эксплуатационных свойств сталей типа Р6М5. При обработке резанием имеет место преимущественно адгезионный износ, в этих условиях сталь с более дисперсными и однородно распределенными карбидами более износоустойчива. Стойкость инструмента (сверла, режущий и штамповый инструмент) из стали Р6М5после АТАО повышается в 1,5-3 раза, что аналогично в ряде случаев стойкости порошковых быстрорежущих сталей.

Таблица 3

Механические свойства сталей Р6М5после СТОи АТАО

Режим обработки			Механические свойства			
Предварительный		Окончательный $t_н$, ºС	Твёрдость HRC	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{0,2сж.}$	КС, МДж/м²
$t_н$, ºС	Среда охл.			МПа		
1125-1235	Масло	Отпуск, трёхкратный по 1ч при 550-560	59-62	-	-	0,3
		-" + АТАО	63-64	3400	-	0,4
Справочные данные			63	3350	-	0,35

АТАО обеспечивает повышение как механических так и эксплуатационных свойств сталей типа Р6М5. При обработке резанием имеет место преимущественно адгезионный износ. В этих условиях сталь с более дисперсными и однородно распределенными карбидами более износоустойчива. Стойкость инструмента (сверла, режущий и штамповый инструмент) из стали Р6М5после АТАО повышается в 1,5-3 раза, что аналогично в ряде случаев стойкости порошковых быстрорежущих сталей.

Заключение. Установлено влияние АТАО на размер и характер распределения карбидов в быстрорежущей стали Р6М5, размер зерна. По сравнению со структурой стали после СТО, характерной особенностью микроструктуры стали после АТАО, в качестве дополнительной обработки, является более мелкий размер карбидной фазы и основного зерна. На основе преимуществ АТАО разработаны технологические процессы, позволяющие существенно повысить механические и эксплуатационные свойства быстрорежущих сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н.Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. М.: Машиностроение,1987.-.251 с.
2. Смагоринский М.Е., Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин Л.: Машиностроение. 1989.-255 с.
3. Инструментальные материалы. Учеб.пособие /Воробьева Г.А.[и др.];- СПб.: Из-во Политехника, 2005. -258 с.
4. Ерофеев В.К., Воробьёва Г.А., Генкин П.Г. Аэротермоакустическая обработка металлов и сплавов // Металлообработка.- 2001. - №6.- С.18-22.
5. Пат. № 2100456 Российская Федерация C21D9/22,C21D6/04. Способ упрочнения изделий из углеродистых, легированных, высоколегированных, быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов» В.К.Ерофеев, В.В. Григорьев, Г.А. Воробьева; заявитель и патентообладатель Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. опубл. 27.12.1997.- Бюл. № 36.
6. Воробьёва Г,А., ЕрофеевВ.К. Концептуальная модель влияния аэротермоакустической обработки на свойства металлических материалов// Металлообработка.-2009. -№3.- С.32-37
7. Новиков И.И.Теория термической обработки стали. М.: Металлургия,1986. С. 480.
8. Сагарадзе В.В.Диффузионные превращения в стали при холодной деформации //Металловедение и термическая обработка.-2008.-№2.- С.46-51
9. Воробьева Г.А., Усков В.Н. Аэротермоакустическая обработка сталей и сплавов: учеб. Пособие.-СПб.:Изд.-во БГТУ. «ВОЕНМЕХ», 2012.-130 с.
10. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Устинова А.А.Конструкционные стали и сплавы- СПб: Из-во Политехника. 2013. – 458 с.
11. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е. Влияние аэротермоакустической обработки на процессы графитизации в ковких и серых чугунах. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.

G. Vorobijova, E. Skladnova

RESEARCH OF INFLUENCE OF AERO-TERMO-ACOUSTIC TREATMENT ON THE STRUCTURE OF TOOL AND PROPERTIES OF HIGHSPEED

Abstract

The article represents the resultat of research of microstructure subjected to standart thermal treatment and additional airthermoacoustic treatment(ATAT).It is discovered that structural parameters differ. The research reveals the connectionbetween structural changes of tool materials and their mechanical and operational characteristics. It is shown that ATAT technologies have advantages. As a result of carbides crushing and grain size reduction the increase of tool wear- resistance becomes 1,5-4,0 times as much.

Key words: - air-thermo-acoustic treatment, mechanical properties, diffusion, treatment thermic, microstructure.

REFERENCES

[1] Bernshteyn M.L., Pustovoyt V.N.Termicheskaya obrabotka stalnyih izdeliy v magnitnom pole.M.: Mashinostroenie,1987.- 251 p. (rus.)
[2] Smagorinskiy M.E., Fedyukin V.K. Termotsiklicheskaya obrabotka me-tallov i detaley mashin L.: Mashinostroenie. 1989.-255 p. (rus.)
[3] Instrumentalnyie materialyi.Ucheb.posobie /Vorobeva G.A.[i dr.];- SPb.: Iz-vo Politehnika, 2005. -258 p. (rus.)
[4] Erofeev V.K., VorobYova G.A.,Genkin P.G.Aerotermoakusticheskaya obrabotka metallov i splavov // Metalloobrabotka.- 2001. - №6.- p.18-22.
[5] Pat. № 2100456 Rossiyskaya Federatsiya S21D9/22,C21D6/04. Sposob uprochneniya izdeliy iz uglerodistyih, legirovannyih, vyisokolegiro-vannyih, byistrorezhuschih staley i tvYordyih splavov» V.K.Erofeev, V.V. Grigorev, G.A. Vorobeva; zayavitel i patentoobladatelBaltiyskiy gosudarstvennyiy tehnicheskiy universitet «VOENMEH» im. D.F. Ustinova.opubl.. 27.12.1997.- Byul. № 36. (rus.)
[6] VorobYova G,A.,ErofeevV.K.Kontseptualnaya model vliyaniya aerotermoakusticheskoy obrabotki na svoystva metallicheskih materialov// Metalloobrabotka.-2009. -№3.- p.32-37 (rus.)
[7] Novikov I.I.Teoriya termicheskoy obrabotki stali. M.: Metallur-giya, 1986. p. 480. (rus.)

[8] Sagaradze V.V.Diffuzionnyie prevrascheniya v stali pri holodnoy deformatsii //Metallovedenie i termicheskaya obrabotka.-2008.-№2.-p.46-51 (rus.)
[9] Vorobeva G.A., Uskov V.N. Aerotermoakusticheskaya obrabotka staley i splavov. : ucheb. Posobie.-SPb.:Izd.-vo BGTU. «VOENMEH», 2012.-130 p. (rus.)
[10] Vorobeva G.A., Skladnova E.E., Ustinova A.A.Konstruktsionnyie stali i splavyi- SPb: Iz-vo Politehnika. 2013. – 458 p. (rus.)
[11] Vorobeva G.A., Skladnova E.E.Vliyanie aerotermoakusticheskoy obrabotki na protsessyi grafitizatsii v kovkih i seryih chugunah. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialyi Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. (rus.)

УДК 621.9.048

Н.Н. Горобей[1], А.С. Лукьяненко[2]

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ЛЕГИРОВАНИЕМ

[1]Наталья Николаевна Горобей, доктор физ-мат.наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. (812)4445253, 89215876335, E-mail: n.gorobey@mail.ru

[2]Александр Сергеевич Лукьяненко, доктор физ-мат.наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия
Тел. (812)5527790, 9993264, E-mail: alex.lukyan@ramler.ru

Аннотация

Технология обработки поверхности металлических деталей играет большую роль в сфере передовых видов производств: в электронной промышленности, ракетостроении, в ядерной энергетике и т.д. Поэтому необходимо повышать уровень знания о структуре, составе и физических свойствах поверхностного слоя. Это необходимо для того, чтобы контролировать свойства поверхности и задавать необходимые параметры. Более того, поверхность является «слабым звеном» при механических испытаниях образцов. Поэтому возникает задача упрочнения поверхности. В нашей работе предлагается достаточно экономичный способ упрочнения поверхностного слоя. Он реализуется путем диффузии с открытой границы деталей атомов легирующих элементов. Проникновение примесных атомов приводит к увеличению концентрации точечных препятствий движению дислокаций, а тем самым и к их блокировке.

*Ключевые слова***:** упрочнение, поверхностный слой металла, легирование, диффузия, примесные атомы внедрения, движение дислокаций.

Актуальности поставленной задачи. Темпы роста научно-технического прогресса во многом определяются успехами материаловедения, одной из центральных научных проблем которого в настоящее время является проблема влияния физико-химических свойств поверхности (в

ряде случаев – определяющего) на функциональные характеристики электронных приборов, оптических устройств и деталей машин. Поэтому уровень наших знаний о структуре, составе и физических свойствах свободных поверхностей и поверхностей раздела, о процессах и явлениях, протекающих на этих поверхностях, обуславливает возможность успешного развития прикладных исследований по разработке новых материалов, созданию новых приборов, машин, механизмов и важнейших технологических процессов. Это, в свою очередь, решающим образом сказывается на развитии техники и цивилизации в целом. Практически любое воздействие исследователя, а также внешней среды на материал при его получении и обработке передается через свободную поверхность. Поэтому поверхностные слои во многих случаях определяют поведение и свойства всего объема материала, его эксплуатационные характеристики.

В последнее время исследования поверхности выделены в самостоятельное направление физики твердого тела и приобретают все большую актуальность. Это обусловлено также той ролью, которую играет поверхность в различных физико-химических и механических процессах, таких как трение, адсорбция и десорбция, эпитаксия, катализ и т.д. С развитием микроэлектроники, и прогрессирующей миниатюризацией электронных приборов, свойства поверхности являются по существу определяющими, поскольку существенные в этих случаях процессы протекают на поверхности полупроводниковых кристаллов, или в переходных слоях гетероструктур. В связи с этим, большое значение имеют не только электрические, или оптико-электрические свойства поверхности, но также ее механические и прочностные свойства. Мы здесь делаем акцент на этом механическом аспекте проблемы физики поверхности, который является существенным с точки зрения устойчивости работы электронных приборов и оптических систем, особенно в различных экстремальных условиях.

Свойства поверхности, в том числе физико-механические, важные сами по себе, в ряде случаев определяют соответствующие свойства образца в целом. Это очевидно в случае малых частиц и тонких пленок, когда такие важные физические характеристики, как, скажем, теплоемкость, и температура плавления зависят от геометрических размеров образца. Оказывается, что даже такой сугубо макроскопический параметр, как механическая прочность массивных образцов, зависит от состояния их поверхности.

Начиная с работ А.А. Гриффитца [1] и А.Ф. Иоффе [2] стало очевидным, что поверхность твердых тел играет существенную роль в их механическом разрушении. Сначала это влияние поверхности объяснялось целиком ее повышенной дефектностью, наличием на ней большой концентрации трещин, пустот и дислокационных скоплений в основном технологического происхождения, изначально существующих на поверхности в силу ее наибольшей подверженности внешним воздействиям. Эти несовершенства рассматривались как концентраторы механических напряжений. С по-

явлением кинетической, термофлуктуационной концепции разрушения [3], основанной на учете теплового движения атомов, появилась возможность другой трактовки поверхностного эффекта в прочности.

Общий вывод, который можно сделать на основании многочисленных экспериментальных данных, таков – поверхностные слои твердого тела в целом являются менее прочными по сравнению с объемными слоями [4]. И то, в какой степени это так, влияет прочностные свойства материала в целом, в частности, на его долговечность под нагрузкой. Процесс дефектообразования на поверхности нагруженного твердого тела протекает со скоростью, на много порядков превышающей скорость этого процесса в объеме. Поэтому следует ожидать, что плотность концентраторов напряжений и вероятность зарождения очага разрушения на поверхности выше. Особые свойства поверхности необходимо учитывать при различных типах обработки деталей: например, при художественной обработки материалов [5], при чистовой обработке турбинных лопаток [6] при электролитно-плазменном полировании [7] и т.д.

Однако в равной степени на поверхности имеются все условия и для процессов, обратных деструкции – восстановлению структуры, залечиванию образующихся дефектов, и даже формированию новых структур при тех же самых внешних воздействиях. Процессы трансформации механически нагруженной поверхности и зарождения разрушения экспериментально изучались для полупроводников Ge и Si, а также металлического сплава $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ в работах $[8-10]$, а также в [11].

Целью данной работы являет достижение упрочнения поверхностного слоя металлических образцов легированием в результате диффузии примесных атомов с поверхности образцов в объем. Этот метод упрочнения является более эффективным, чем, например, наклеп, шлифовка или механическая полировка поверхности.

Диффузия легирующего элемента в объем образца. В первую очередь решим задачу диффузии легирующего элемента в объем металлического образца. Распределение концентрации n легирующей добавки со временем τ в образце можно найти из уравнения диффузии. Решение этой задачи относится к решению краевой задачи для дифференциального уравнения эллиптического типа [12]:

$$\frac{\partial n}{\partial \tau} = D\Delta n, \qquad (1)$$

где D - коэффициент диффузии $\text{м}^2/\text{с}$, Δ - оператор Лапласа.

Решим поставленную задачу следующим образом. Пусть заготовка – это однородная среда, ограниченная плоскостью $x = 0$. В начальный момент времени $\tau = 0$ концентрация легирующего элемента в заготовке одинакова и равна n_o. Концентрация же на поверхности все время поддержи-

вается постоянной и равна $n_1 > n_o$. Таким образом, в начальный момент на границе среды концентрация испытывает скачок. Требуется найти распределение концентрации $n(x,\tau)$ в заготовке во все последующие моменты времени. Эта задача была поставлена и решена В. Томсоном (лордом Кельвином).

Направим ось x внутрь среды (заготовки) перпендикулярно границе. Решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$n = A\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}} \exp\left(-\xi^2\right)d\xi + B. \qquad (2)$$

Остается найти постоянные интегрирования A и B. Полагая $x = 0$, $\tau \neq 0$, получаем $n = B$. Таким образом, постоянная B дает концентрацию легирования поверхности заготовки во все моменты времени $\tau \neq 0$. Но в рассматриваемой задачи положим ее постоянной и равной n_1. Для определения постоянной A воспользуемся начальным условием: $n = n_o$ при $\tau = 0$. Это дает $n_o = A\int_0^{\infty} \exp\left(-\xi^2\right)d\xi + n_1$. В интегральном исчислении доказывается, что входящий сюда интеграл равен $\frac{1}{2}\sqrt{\pi}$. Таким образом, $n_o = \frac{A}{2}\sqrt{\pi} + n_1$. Окончательное решение задачи имеет вид

$$n = 2\frac{n_o - n_1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}} \exp\left(-\xi^2\right)d\xi + n_1. \qquad (3)$$

Из (3) дифференцированием по x получаем значение градиента концентрации

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{n_o - n_1}{\sqrt{\pi D\tau}}\exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right). \qquad (4)$$

В частности, на поверхности, т.е. при $x = 0$ $\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{n_o - n_1}{\sqrt{\pi\alpha\tau}}$.

Из формул (3) и (4) видно, что проникновение легирующих элементов в объем образца с поверхности определяется коэффициентом диффузии D Известно[13], что D в кристаллических твердых тела равен

$$D = D_o \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right), \qquad (5)$$

где D_o - предэкспоненциальный множитель,

$$D_o = \chi \cdot n_c a^2 \omega_o . \qquad (6)$$

Здесь ε - энергия активации диффузии атома легирующего элемента эВ, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана, T - температура К, $\chi \approx 1$- геометрический фактор, зависящий от кристаллической структуры металлического образца, n_c - «координационное» число (число ближайших мест, в которые атом может диффундировать), a - параметр решетки, ω_o - частота тепловых колебаний рад/с.

Оценим, например, коэффициент диффузии алюминия Al при $400^o C$. Примем, что энергия активации диффузии совпадает с энергией активации самодиффузии. Для Al при следующих значениях

$\varepsilon = 1{,}4$ эВ, $n_c = 12$, $\omega_o \approx 10^{12}$ рад/с, $a \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м, $kT \approx 6 \cdot 10^{-2}$ эВ

получим $D \approx 10^{-15}$ м^2/с. Предположим, что на поверхность нагретого до $400^o C$ алюминия Al нанесен легирующий элемент, который диффундирует в объем образца по типу замещения собственных атомов в узлах кристаллической структуры. Найдем, на какую глубину примесные атомы продиффундируют за ε один час: $\tau = 3600$ с. Из (4) получим, что за время τ атомы легирующего элемента проникают на глубину $x \approx \sqrt{D \cdot \tau}$ и в нашем случае $x \approx 0{,}6$ мкм.

Выше рассмотрен случай легирования поверхностного слоя металлического образца химическими элементами, размеры атомов которых по объему близки с основными атомами. Такие примесные атомы могут располагаться только в узлах кристаллической структуры, вытесняя оттуда основные атомы и создавая атомы замещения. Примесные атомы замещения диффундируют по вакансионному типу. Для их диффузии необходимо наличие вакансии в тех кристаллических узлах, куда будут диффундировать примесные атомы замещения. Это и является причиной большого значения энергии активации ε и низкого значения коэффициента диффузии D.

Рассмотрим случай легирования металлического образца внедренными примесными атомами. Такие атомы могут занимать в кристаллической структуре три различных положения: в междоузлии, гантельное и краудионное. Для них не требуется наличие вакансий в кристаллических узлах. Подвижность внедренных атомов значительно выше подвижности примесных атомов замещения. Это следует из того, что междоузельная и гантельная конфигурации близки друг к другу по расположению атомов и энергии, и поэтому наиболее легкий путь перемещения внедренного атома есть последовательное изменение конфигурации: междоузельная $\rightarrow$ гантельная

$\rightarrow$ междоузельная и т. д. Энергии ε_i активации диффузии внедренных атомов примерно в 2 раза меньше, чем в случае замещения. Это означает, что, как показывает оценка по (5) и (6), коэффициент диффузии внедренных примесных атомов примерно в 10^5 раз больше, чем в случае примеси замещения, т. е. $D_i \approx 10^{-10}\ \text{м}^2/\text{с}$. Следовательно, время τ диффузии внедренных атомов легирующих элементов сокращается примерно в 10^5 раз.

Упрочнение поверхностного слоя. Прочностные и пластические свойства кристаллов можно хорошо объяснить, зная свойства дислокаций: ее вектор Бюргерса $\vec{b}$, плотность подвижных дислокаций ρ_m, а также скорость $V_\perp$ перемещения дислокаций и зависимость ее от внешнего напряжения σ. Определив эти три характеристики дислокаций, можно найти скорость деформации кристалла

$$\dot{\varepsilon} = \rho_m b V_\perp(\sigma). \qquad (7)$$

Деформационная прочность кристаллов в значительной степени определяется препятствиями движению дислокаций. Эти препятствия очень многочисленны и разнообразны, поэтому их можно классифицировать несколькими способами. Удобно делить их, например, на собственные (которые сохраняются, даже если кристалл является совершенным) и несобственные (обусловленные дефектами кристаллической решетки). Возможно деление на термические (т. е. обусловленные короткодействующими взаимодействиями, легко преодолеваемыми за счет термических флуктуаций) и атермическиме (связанные с дальнодействующими взаимодействиями, слабо зависящими от термической активации). Существует деление по видам и форме препятствий (точечные, линейные, объемные и т. д.). Приведем классификацию основных видов препятствий движению дислокаций.

1. Собственные препятствия: потенциал Пайерлса, обусловленный самой кристаллическолй решеткой. Это препятствие преодолевает дислокация с помощью термических флуктуаций.

2. Несобственные препятствия: точечные препятствия (атомы твердого раствора, точечные дефекты кристаллической решетки). Эти препятствия дислокация преодолевает с помощью термических флуктуаций, поэтому они являются термическими; закрепленные или фиксированные препятствия (диспергированные частицы, выделения примесей), а также дальнодействующие поля напряжений других дислокаций. Последние два типа препятствий относятся к атермическим, и термоактивированным путем они не могут быть преодолены.

Рассмотрим движение дислокаций в поле точечных препятствий. Известно, что атомы различных примесей, распределенных в металлических кристаллах, создают поля препятствий движению дислокаций, в результате чего внешняя нагрузка, требуемая для такого движения, значительно воз-

растает по сравнению с аналогичной величиной для чистых металлов. В чистых кристаллах основным препятствием является рельеф Пайерлса. Это явление называется упрочнением (или эффектом упрочнения) твердого тела. Большинство экспериментальных исследований проводилось для слаболегированных ГЦК-структур. В этих материалах скорость дислокаций определяется по формуле

$$V_{\perp} = A_s b \omega_o \exp\left(-\frac{\varepsilon_{\perp}}{kT}\right), \tag{8}$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_s - \gamma_s b^3 \sigma. \tag{9}$$

Здесь A_s - коэффициент, зависящий от пути, проходимом дислокационным сегментом после отрыва от точечного препятствия (стопора); ε_s - величина энергии, необходимой для отрыва от стопора при отсутствии внешней нагрузки; γ_s - коэффициент перенапряжения, который зависит от среднего расстояния между термическими препятствиями (примесными атомами).

Подробное теоретическое исследование движения дислокаций через нестационарную атмосферу примесных атомов внедрения (атмосферу Снука) проводилось в работах $[14,15]$.

Скорость пластической деформации, определяемая по формуле (7), зависит от двух процессов: упрочнения и возврата (процесса, происходящего при отжиге). Наша задача состоит в упрочнении поверхностного слоя. Это можно сделать двумя способами. Во-первых, увеличить плотность дислокаций ρ наклепом, шлифованием или механическим полированием, что приведет к торможению дислокаций друг другом через дальнодействующее упругое поле. В результате плотность ρ_m подвижных дислокаций существенно снизится. Однако при таком способе упрочнения повышается доля атермических препятствий, а следовательно, и хрупкость поверхностного слоя, что крайне нежелательно. В данной работе предлагается снизить пластичность поверхностного слоя металлических образцов легирование с открытой поверхности. Это приводит к уменьшению коэффициента перенапряжения γ_s в (9), а следовательно, к уменьшению скорости дислокаций $V_{\perp}$ согласно (8).

Заключение. В данной работе предлагается экономичный способ упрочнения поверхностного слоя металлических образцов путем легирования различными химическими элементами с открытой поверхности детали. Анализируются случаи диффузии примесных атомов по типу замещения, а также внедрения. Показано, что процесс упрочнения примесными атомами внедрения оказывается более быстрым, а значит более эффективным. В этом случае за короткое время происходит блокировка подвижных дислокаций в поверхностном слое образцов, а значит и упрочнение поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids// Thyl. Trans.Roy. Soc. – 1921. – V.221. – A. – P.163-170.
2. Иоффе А.Ф. Физика кристаллов. – М.: Л.: ОГИЗ, 1929. 250 с.
3. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
4. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М.: Наука, 1983. – 206 с.
5. Радкевич М.М. Материаловедение и технология художественной обработки материалов. – Ч.1.: учеб пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. университета, 2008. – 220 с.
6. Ушомирская Л.А., Фоломкин А.И., Новиков В.И. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток // Металлообработка: научно-производственный журнал. – 2008. – № 4 (46). – С.19-21.
7. Ушомирская Л.А., Новиков В.И. Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении // Металлообработка. – 2008. № 1 (43). – С.22-24.
8. Трансформация механически нагруженной поверхности $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$ / Корсуков В.Е.[и др.]// Письма в ЖЭТФ. – 1992. Т.55. – №10. – С.595-597.
9. Зарождение разрушения в поверхностных слоях Ge и Si/ Корсуков В.Е.[и др.]// Физика твердого тела. – 1996. – Т.38. – №1. – С.113-121.
10. Горобей Н.Н., Корсуков В.Е., Лукьяненко А.С. Энергетический критерий формирования рельефа деформируемой поверхности // Физика твердого тела. – 2005. – Т.47. – № 6. – С.974-978.
11. Орлов С.В., Чулкин С.Г. Исследование микроструктуры металла штемпеля в поверхностном слое // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й Междунар. науч.– практ. конференции. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012. – 846 с.
12. Маделунг Э. Математический аппарат физики. М.: Наука. – 1968. 618 с.
13. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З. Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. – М.: Металлургия, 1974. 280 с.
14. Владимиров В.И., Горобей Н.Н., Саралидзе З.К. Движение дислокаций через нестационарную атмосферу Снука // Физика твердого тела. – 1978. – Т.20. – № 10. – С.3128-3130.
15. Владимиров В.И., Горобей Н.Н Влияние нестационарности атмосферы Снука на пластичность твердого раствора внедрения альфа-железа // В сб. «Физика и электроника твердого тела».Ижевск: Изд-во УГУ, 1979. – С.46-52.

Natalia N. Gorobey, Alexander S. Lukyanenko

St. Petersburg State Polytechnic University St.Petersburg, Russia

Abstract

Metallic surface treatment technology plays leading role in sphere of advanced industry: in electronic industry, in space-rocket industry, in nuclear power engineering and so on. It is necessary to do a high standard education about surface structure, composition and physical properties. As a result we can to control surface properties and to require essential parameters. So much the more surface is the «weak leak» under the action mechanical stress. It is necessary to decide the surface resisting problem of metallic crystals. In this paper we propose the economical method of the surface resisting by diffusion adsorbed atoms from solid surface into metallic volume. As a result the point defect (interstitials) concentration increase and dislocation motion blockades.

*Key words***:** surface resisting, metallic surface, adsorbed atom, diffusion, interstitials, dislocation motion

REFERENCES

[1] Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids// Thyl. Trans. Roy. Soc. – 1921. – V.221. – A. – P.163-170.
[2] Ioffe A.f. Crystal physics. – M.: L.: OGIZ, 1929. 250 p. (rus.)
[3] Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevkiy E.E. Kinetically nature of the solid state toughness. – M.: Nauka, 1974. – 560 p. (rus.)
[4] Alechin V.P. Physics of material surface toughness and plastic. – M.: Nauka, 1983. – 206 p. (rus.)
[5] Radkevich M.M. Material-leading and technology of art material treatment. P.1.: textbook. – St.Petersburg.: Publ. Polytech. Univ., 2008. – 220 p. (rus.)
[6] Ushomirskyay L.A.., Pholomkin A.I., Novirov V.I. The particularly of clean turbine shovel treatment // Metalloobrabotka: nauchno-proizvodstvenniy zhurnal. – 2008. – № 4 (46). – P.19-21. (rus.)
[7] Ushomirskyay L.A.., Novirov V.I. Steel polishing in nonpoisonous electrolyte at high tension. // Metalloobrabotka: nauchno-proizvodstvenniy. – 2008. № 1 (43). – P.22-24. (rus.)
[8] Transformation of mechanical stress surface $Fe_{70}Cr_{15}B_{15}$/ Korsukov V.E. [and other]// Pis”ma v ZhETF. – 1992. – V.55. – №10. – P.595-597. (rus.)
[9] Beginning fracture on surface in Ge and Si/ Korsukov V.E. [and other]// Fizika tverdogo tela. – 1996. – V.38. – №1. – P.113-121. (rus.)

[10] Gorobey N.N., Korsukov V.E., Lukyanenko A.S. Energy criterion of surface relief formation under mechanical stress // Fizika tverdogo tela. 2005. – V.47. – № 6. – P.974-978. (rus.)
[11] Orlov S.V., Chulkin S.G. Metallic microstructure investigation on the detail // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: Mater. of International scientific-practic. conf. – St.Petersburg.: Publ. Polytech.Univ., 2012. – 846 p. (rus.)
[12] Madelung E. Mathematical apparatus of Physics. M.: Nauka. – 1968. 618 p. (rus.)
[13] Bokshtein B.S., Bokshtein S.Z., Zhuchovitskiy A.A. Thermodynamics and kinetics of solid state diffusion. – M.: Metallugaya, 1974.280 p. (rus.)
[14] Vladimirov V.I., Gorobey N.N., Saralidze Z.K. Dislocation motion through instability Snuke atmoshere // Fizika tverdogo tela. – 1978. V.20. – № 10. – P.3128-3130. (rus.)
[15] Vladimirov V.I., Gorobey N.N. Instability Snuke atmoshere influence on plastic of α- iron solid solution // V sb. «Fizika i elektronika tverdogo tela».Izhevsk: Publ.UGU, 1979. – P.46-52. (rus.)

УДК 669.295

Ю.Б. Егорова[1], Л.В. Давыденко[2], И.М.Мамонов[3],
Е.Н.Егоров[4], М.Г.Бурлакова[5]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОВАНЫХ ПРУТКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЯ

[1]Юлия Борисовна Егорова, д.т.н., профессор, Ступинский филиал ФГБОУ ВПО «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»
г. Ступино, Московская область, Россия
Тел.: 9175568258, E-mail: egorova_mati@mail.ru.

[2]Людмила Васильевна Давыденко, к.т.н., доцент
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
г. Москва, Россия
Тел.: 9261167666, E-mail: mami-davidenko@mail.ru.

[3]Мамонов Игорь Михайлович, к.т.н., доцент
Ступинский филиал ФГБОУ ВПО «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»
Тел.: 94969442868, E-mail: mamonovim@mail.ru.

Евгений Николаевич Егоров, к.т.н., доцент
Ступинский филиал ФГБОУ ВПО «МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского»
Тел.: 9175568258, E-mail: aravir_ene@mail.ru.

Бурлакова Мария Геннадиевна, студентка 4 курса
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
г. Москва, Россия
Тел.: 9167840274, E-mail: milajm@mail.ru.

Аннотация

На основе статистических исследований показана принципиальная возможность прогнозирования механических свойств деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов на основе данных промышленного контроля с ошибками, определяемыми современным уровнем развития про-

изводства.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, слитки, деформированные полуфабрикаты, химический состав, механические свойства, прогнозирование свойств.

В настоящее время трудно представить развитие и дальнейшее совершенствование современного авиа- и машиностроения без широкого применения титановых сплавов. К 2020 г. предполагается не только двукратное увеличение объемов потребления титана в авиации (с 4200 т в 2007 г. до 9800 т в 2020 г.), но и активный рост спроса титановых полуфабрикатов в других отраслях промышленности, таких как судостроение, медицина, атомная и химическая промышленность, автомобилестроение, производство товаров народного потребления и др. [1-5].

К настоящему времени разработано несколько сотен опытных композиций и более сотни промышленных сплавов различного назначения [1-6]. Изучению их структуры и свойств посвящены многочисленные исследования (например, [7-14]) в которых неоднократно предпринимались попытки установить количественную связь между разнообразными механическими свойствами, химическим составом и структурой сплавов, но они не дали однозначных результатов. Это, несомненно, связано не только с трудностями поиска таких закономерностей, но и со сложностью оценки типичных механических свойств конкретных титановых сплавов из-за высокой их чувствительности к типу и параметрам структуры, а также к колебаниям содержания легирующих элементов и примесей в пределах технических условий.

В ранее проведенных нами исследованиях [15-18] в качестве исходных данных были использованы различные литературные источники. На основе статистического анализа были установлены соотношения, позволяющие прогнозировать средние типичные значения механических свойств при растяжении, ударной вязкости и характеристик обрабатываемости резанием титановых сплавов в зависимости от среднего (по нормативной документации) содержания легирующих элементов.

Для разработки достоверных методов экспресс-оценки и прогнозирования механических и технологических свойств различных полуфабрикатов необходимо, прежде всего, знать реальное содержание легирующих элементов и примесей, а также реальные значения механических свойств. Кроме этого необходимо оценить диапазон изменения и однородность этих характеристик для слитков и деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов.

На предприятиях, выпускающих полуфабрикаты и изделия из титановых сплавов, к настоящему времени накоплено много данных входного и выходного контроля по химическому составу и механическим свойствам. Это позволяет применить статистический подход к разработке методов про-

гнозирования механических свойств и оптимизации технологических процессов производства различных полуфабрикатов из титановых сплавов.

Основная цель настоящей работы состояла в установлении общих статистических закономерностей, выявляющих зависимости механических свойств кованых прутков из титановых сплавов от их химического состава. Объектами исследования послужили полуфабрикаты, изготовленные на различных предприятиях с 1970 по 2011 гг.: слитки и кованые прутки сечением 14х14 мм из сплавов ВТ1-00, ВТ1-0, Grade 2, Grade 4, ВТ5, ВТ5-1, СТ6, 3М, ПТ-7М, ОТ4-1, ОТ4-1В, ОТ4-0, ОТ4, ВТ6, Grade 5, Grade 23, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ16, ВТ22, ВТ25У (3900 слитков, 5874 образцов для механических испытаний); кованые прутки диаметром 60-90 мм сплавов ВТ5-1, Grade 5, ВТ23 (100 образцов). Все исследованные полуфабрикаты были подвергнуты отжигу по стандартным режимам в соответствии с инструкцией ВИАМ №685-76. От каждого прутка испытывали 2-5 ударных и разрывных образцов. Механические испытания проводили в соответствии с ГОСТ 1497-61, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78, ASTM E 8. По результатам механических испытаний определяли: временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ, поперечное сужение ψ, ударную вязкость KCU. Для всех слитков и полуфабрикатов каждого сплава были рассчитаны структурные и прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену по формулам [1]:

$$[\mathrm{Al}]_{экв}^{стр} = \%\mathrm{Al} + \%\mathrm{Sn}/3 + \%\mathrm{Zr}/6 + 10[\%O + \%C + 2\%N],$$

$$[Mo]_{экв}^{стр} = \%\mathrm{Mo} + \%\mathrm{Nb}/3{,}3 + \%\mathrm{W}/2 + \%\mathrm{V}/1{,}4 + \%\mathrm{Cr}/0{,}6 + +\%\mathrm{Mn}/0{,}6 + \%\mathrm{Fe}/0{,}4 + \%\mathrm{Ni}/0{,}8;$$

$$[\mathrm{Al}]_{экв}^{пр} = \%Al + \%\mathrm{Sn}/2 + \%\mathrm{Zr}/3 + 3{,}3\%Si + 20\%O + 33\%N + 12\%C,$$

$$[Mo]_{экв}^{пр} = \%\mathrm{Mo} + \%\mathrm{V}/1{,}7 + \%\mathrm{Mn} + \%\mathrm{W} + \%\mathrm{Cr}/0{,}8 + \%\mathrm{Fe}/0{,}7 + \%\mathrm{Nb}/3{,}3 + \%\mathrm{Cu}/3{,}6 + \%\mathrm{Ni}/1{,}4.$$

Статистический анализ проводили с помощью пакета прикладных программ «Stadia 7». Особое внимание было уделено первичной статистической обработке химического состава и характеристик механических свойств, так как прогнозирование и оптимизация технологических процессов возможны только при условии, что процесс производства как слитков, так и деформированных полуфабрикатов, является стабильным и управляемым. Для каждого фактора был определен размах, выборочное среднее, доверительный интервал среднего с доверительной вероятностью 0,95, дисперсия, стандартное отклонение, ширина «трех-сигмового» интервала, коэффициент вариации. Были построены гистограммы, проведена проверка нормальности распределения. Для исследования зависимостей механических свойств титановых сплавов от различных факторов проводили корреляционно-регрессионный анализ. Для оценки силы статистической связи между исследуемыми факторами были рассчитаны коэффициенты парной и множественной (линейной и нелинейной) корреляции *R*. Проверку значи-

мости коэффициентов корреляции и регрессии, адекватности регрессионной модели осуществляли с надежностью 0,95 несколькими способами: с помощью коэффициента детерминации R^2, критериев Фишера и Стьюдента.

На основе проверки статистической гипотезы о равенстве средних было показано, что с 1970-х гг. по 2011 г. произошло значимое изменение содержания алюминия и примесей внедрения в слитках титановых сплавов, изготовленных без дополнительного микролегирования кислородом. Среднее содержание кислорода и азота уменьшилось почти в два раза: с 0,11 до 0,06 %м. и 0,02 до 0,01 % м. соответственно. Для слитков, выплавленных в 1970-х гг., среднее содержание примесей внедрения, эквивалентное алюминию, составляло $[Al]_{экв}^{стр}$ ~2,0% и $[Al]_{экв}^{пр}$ ~3,0%. В 2009-11 г. эти же характеристики равны $[Al]_{экв}^{стр}$ ~1,0 и $[Al]_{экв}^{пр}$ ~2,0%. Это в свою очередь привело к общему снижению структурных и прочностных эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию.

Прочностные и пластические характеристики кованых прутков могут изменяться в довольно широких пределах. В пределах партии прутков одного сплава разница между максимальным и минимальным значениями (размах) для предела прочности и условного предела текучести может достигать 200 МПа (табл. 1).

Таблица 1

Результаты корреляционного анализа зависимости предела прочности прутков с пластинчатой структурой от эквивалентов по алюминию и молибдену

Сплав	Количество образцов	$[Al]_{экв}^{пр}$, %	$[Mo]_{экв}^{пр}$, %	$\sigma_в$, МПА	Коэффициент множественной корреляции	Доля вариации, %
кованые прутки сечением 14х14 мм, 2010 г.						
Grade 2	276	3,2-5,0	0,1-0,3	423-656	0,49	24
ВТ5-1	53	8,2-10,4	0,05-0,1	670-825	0,68	46
ОТ4-1	16	4,1-5,2	1,4-2,1	591-734	0,67	45
ВТ20	81	8,7-11,3	2,4-3,6	933-1148	0,55	30
Grade 5	154	8,0-12,2	2,4-2,9	904-1095	0,62	37
кованые прутки диаметром 70-90 мм, 2010 г.						
ВТ5-1	24	8,3-9,5	0,1-0,3	751-865	0,56	31
Grade 5	32	8,9-11,0	2,4-3,0	922-1069	0,49	24

Более высокий разброс значений имеют пластические свойства. Для большинства сплавов минимальные значения относительного удлинения и поперечного сужения меньше максимального в 1,5-2 раза. Такой разброс может быть обусловлен, прежде всего, влиянием параметров структуры и колебаниями химического состава, особенно α-стабилизаторов (

$\Delta[Al]_{экв}^{стр} = 1{,}0 - 2{,}0\%$, $\Delta[Al]_{экв}^{пр} = 1{,}5 - 4{,}0\%$), в пределах марки сплава. Доля вариации предела прочности прутков с преимущественно пластинчатой структурой, обусловленная совместным влиянием и α-, и β-стабилизаторов, составляет приблизительно 25-45% (табл. 1).

Сравнение механических свойств кованых прутков, изготовленных из слитков без дополнительного легирования кислородом, показало, что в 2000-х гг. временное сопротивление разрыву уменьшилось на 40-100 МПа (в зависимости от марки сплава) по сравнению с 1970-ми гг., при этом значения относительного удлинения и ударной вязкости повысились (табл. 2). Это может быть обусловлено снижением содержания примесей в слитках титановых сплавов и снижения ее твердости и предела прочности. Так, было установлено, что средняя твердость губки марок ТГ100-ТГ130, из которой были выплавлены слитки в 1970-80-х годах, составляла 1135 МПа ($\sigma_в$=375 МПа), а в 1999-2011 годах - 945 МПа ($\sigma_в$=312 МПа).

Таблица 2

Химический состав и механические свойства кованых прутков 14х14 мм из технического титана и сплавов Ti-6Al-4V (в отожженном состоянии)

Сплав	Год	Кол-во образцов	Al, %	O, % масс.	N,% масс.	$[Al]_{экв}^{пр}$, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м^2
ВТ1-00	1970	28	0	0,05	0,035	2,5	390	36	73	1,8
	2010	26	0	0,04	0,007	1,5	340	39	-	-
ВТ1-0	1970	565	0,44	0,14	0,02	3,3	472	26	62	1,7
	2010	24	-	0,06	0,01	1,8	430	36	68	1,9
Grade2	2010*	276	-	0,17	0,012	4,0	575	22	59	-
Grade4	2010*	20	-	0,34	0,035	8,0	811	23	46	-
ВТ6	1970	201	6,16	0,11	0,02	10,0	1050	12	42	0,54
	2010	30	6,38	0,06	0,01	8,4	954	14	43	0,91
Grade5	2000*	90	6,42	0,15	0,01	10,2	1033	13	42	0,67
	2010*	10	6,32	0,20	0,01	11,6	1095	11	39	0,45

Примечание: * - с дошихтовкой рутилом.

В последние годы кислород стали считать не вредной примесью, а полезной легирующей добавкой, повышающей прочность сплавов, поэтому для ряда сплавов были регламентированы значения содержаний кислорода. В настоящее время на предприятиях отрасли около 50% всех выплавляемых слитков легируется кислородом. Для полуфабрикатов, изготовленных в 1999-2011 гг. и легированных кислородом, значения предела прочности сопоставимы с данными 1970-80-х гг. (табл. 2).

В работе был проведен корреляционно-регрессионный анализ зависимости механических свойств кованых и прессованных прутков диаметром 14-90 мм от содержания легирующих элементов и примесей, эквивалентов по алюминию и молибдену для частных и обобщенных выборок полуфабрикатов из технического титана и различных титановых сплавов. В табл. 3

для примера представлена корреляционная матрица для обобщенной партии кованых прутков 14х14 мм в 1970-75 и 1999-2003 гг. Полученные данные показывают, что между всеми факторами наблюдаются сильные корреляционные связи: коэффициенты корреляции (по модулю) равны 0,52-0,99. Необходимо отметить, данные 1970-х и 2000-х гг. практически совпадают. С увеличением структурных и прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену наблюдается повышение временного сопротивления разрыву и условного предела текучести, при этом пластические характеристики снижаются.

Таблица 3

Корреляционная матрица*

Факторы	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$**	δ	ψ	KCU
$\sigma_в$	1				
$\sigma_{0,2}$	0,99 -	1			
δ	-0,91 -0,92	-0,92	1		
ψ	-0,84 -0,83	-0,78	0,84 0,85	1	
KCU	-0,87 -0,88	-0,61	0,81 0,79	0,83 0,78	1
$[Al]_{экв}^{стр}$	0,93 0,92	0,96	-0,90 -0,83	-0,81 -0,78	-0,81 -0,77
$[Mo]_{экв}^{стр}$	0,78 0,82	0,84	-0,67 -0,65	-0,52 -0,61	-0,54 -0,58
$[Al]_{экв}^{пр}$	0,95 0,95	0,98	-0,93 -0,88	-0,84 -0,79	-0,89 -0,91
$[Mo]_{экв}^{пр}$	0,79 0,83	0,88	-0,73 -0,71	-0,58 -0,66	-0,56 -0,62

Примечание: * в числителе – 1999-2003 гг., в знаменателе - 1970-75 гг.; ** - данных за 1970-75 гг. нет.

В работе было проведено сравнение различных линейных и нелинейных регрессионных моделей, полученных для исследованных статистических массивов. Регрессионные зависимости механических свойств от содержания легирующих элементов и примесей для разных статистических массивов отличаются друг от друга. Это может быть связано с недостаточным представительством выборки для получения значимых коэффициентов регрессии в случае линейных и, тем более, нелинейных моделей. Если учитывать влияние каждого элемента (10-15 легирующих компонентов и примесей) и их парные линейные и нелинейные взаимодействия, необходимо найти $\sim 10^3$-10^4 коэффициентов, что осуществить довольно сложно, а для практических задач нецелесообразно.

Вместе с тем при сравнении моделей, содержащих эквиваленты по

алюминию и молибдену и полученных для различных статистических групп, было обнаружено, что эти интегральные характеристики обладают большей статистической устойчивостью, при этом корреляционная связь механических свойств с прочностными эквивалентами более сильная по сравнению со структурными эквивалентами. Коэффициенты регрессии, характеризующие влияние эквивалентов по алюминию и молибдену, для различных массивов приблизительно равны, при этом было обнаружено, что α-стабилизаторы сильнее влияют на все исследованные свойства, чем β-стабилизаторы. На основе исследования и обобщения промышленных массивов статистических данных были уточнены коэффициенты упрочнения для прочностных эквивалентов по алюминию (60±5 МПа/% м.) и молибдену (50±5 МПа/% м), а также подтверждена их достоверность и надежность:

$$\sigma_B^{расч} = \sigma_0 + (60 \pm 5)[\mathrm{Al}]_{экв}^{пр} + (50 \pm 5)[\mathrm{Mo}]_{экв}^{пр}. \quad (1)$$

Полученная модель имеет очень высокие статистические характеристики: коэффициент корреляции 0,97, коэффициент детерминации 0,94. Статистическая ошибка составляет S=40 МПа.

Свободный член σ_0 для предела прочности различных промышленных полуфабрикатов лежит в интервале 300-400 МПа и зависит от большого числа факторов (содержания неучтенных примесей, количества легирующих элементов в сплаве и их взаимодействия между собой, параметров структуры, конкретного фазового состава и т.п.) и может быть определен на основе данных статистического контроля. Аналогичным образом можно определить свободные члены и для других механических свойств (k_δ, k_ψ, k_{KCU}).

Увеличение прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену на 1% приводит к повышению прочности прутков α-, псевдо α-, α+β-сплавов в среднем на 55-65 МПа и на 45-55 МПа в соответствии с (1). При этом относительное удлинение снижается на 1,0-2,0 % и 0,5-1,0 %, поперечное сужение – на 2,0-3,0 % и 0,3-0,7 %, ударная вязкость – на 0,09-0,12 и 0,08-0,11 МДж/м^2:

$$\delta^{расч} = k_\delta \cdot 50 - (1{,}5 \pm 0{,}5)[\mathrm{Al}]_{экв}^{пр} - (0{,}75 \pm 0{,}25)[\mathrm{Mo}]_{экв}^{пр}, S = 3{,}0\%,$$

$$\psi^{расч} = k_\psi \cdot 80 - (2{,}5 \pm 0{,}5)[\mathrm{Al}]_{экв}^{пр} + (0{,}5 \pm 0{,}2)[\mathrm{Mo}]_{экв}^{пр}, S = 6{,}0\%,$$

$$KCU^{расч} = k_{KCU} \cdot 2{,}0 - (0{,}10 \pm 0{,}02)[\mathrm{Al}]_{экв}^{пр} - (0{,}09 \pm 0{,}02)[\mathrm{Mo}]_{экв}^{пр}, S = 0{,}2 МДж/м^2.$$

Статистические ошибки прогнозирования связаны, прежде всего, с разбросом механических свойств конкретных полуфабрикатов, которые, в свою очередь, могут быть обусловлены колебаниями химического состава в объеме каждого слитка (или деформированного полуфабриката) и в пределах марки сплава; фазовым составом и структурой, сформировавшимися в процессе обработки давлением и термической обработки; конкретными методиками и ошибками химического анализа и механических испытаний, а

также другими случайными факторами, которые сложно учесть.

Таким образом, на основе проведенных исследований показана принципиальная возможность прогнозирования вероятностных значений механических свойств деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов на основе данных промышленного контроля с ошибками, определяемыми современным уровнем развития производства.

Результаты работы можно использовать для моделирования и оптимизации технологических процессов производства, при разработке новых титановых сплавов; для обоснования возможности замены дорогих или токсичных легирующих элементов эквивалентными количествами более дешевых или нетоксичных элементов в традиционных титановых сплавах и сплавах медицинского назначения; при обосновании выбора сплавов для конкретного назначения и сплавов-дублеров для ремонта изделий; для прогнозирования вероятностных значений расчетных характеристик механических свойств при проектировании новых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
2. Титан и титановые сплавы в автомобилестроении / Егорова Ю.Б. [и др.] //Автомобильная промышленность. - 2010. - № 10. - С. 41-43.
3. А. С. Кудрявцев, Э. А. Карасев, Н. Ф. Молчанова. Титановые сплавы для гражданского судостроения // ТЛС – 2010. - №1. – С. 85-91.
4. Применение материалов на основе титана для изготовления медицинских имплантатов / Ильин А.А. [и др.] // Металлы. – 2003. - №3. - С.97-104.
5. Титановые сплавы для автомобилестроения / Егорова Ю.Б. [и др.] // Материалы 3-й Международной научно-практ. конференции «Современное машиностроение. Наука и образование», 20-21.06.2013 – СПб: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. - С.1137-1146.
6. Различные виды классификации отечественных титановых сплавов / Егорова Ю.Б. [и др.] // Титан. - 2012. - №2 (36). - С.11-18.
7. Брун М.Я. Разработка принципов управления структурой и механическими свойствами жаропрочных $\alpha+\beta$ – титановых сплавов и повышение на этой основе характеристик работоспособности полуфабрикатов для авиационных двигателей. Автореферат диссертации на соискание уч.ст. д.т.н. – Москва.: ВИЛС, 1990. - 51 с.
8. Лех Г.И. Исследование влияния режимов деформации и термической обработки на структуру, фазовый состав и комплекс механических свойств нового жаропрочного титанового сплава ВТ18УОП и разработка металловедческих основ производства штамповок дисков из

этого сплава для новых авиационных двигателей. Автореферат диссертации на соискание уч.ст. к.т.н. – Москва.: ВИЛС, 1992. - 25 с.
9. An Integrated Approach to the Calculation of Materials Properties for Ti-alloys / N. Saunders // Titanium′ 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium, 13-18 July 2003. - Hamburg, Germany. - V. 1-5. - Pp. 3027-3032.
10. Глазунов С.Г., Матвеенко А.Ф., Должанский Ю.М. Исследование статистических закономерностей влияния легирования на механические свойства титановых сплавов критического состава Ti-Al-Mo-V / Производство титановых сплавов. - М.: ВИЛС, 1975. - вып.7- 58-64 с.
11. Рынденков Д.В. Сопоставление титановых сплавов по эквивалентам по алюминию и молибдену и некоторые возможности его применения. Автореферат диссертации на соискание уч.ст. к.т.н. – Москва.: «МАТИ»-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2004 - 25 с.
12. Воздвиженский В.М., Воздвиженская М.В., Ильина Е.Е. Использование метода приведенных концентраций для расчета характеристик и свойств титановых сплавов//Известия вузов. Цветная металлургия. -1999.- №1. - С. 56-59.
13. Высокая чистота основы титановых сплавов – залог продления срока службы изделий их них в ядерной энергетике и стабильности свойств в медицинской технике / Коцарь М.Л. [и др.] // Титан, 2012. - № 3 (37). - С. 10-16.
14. Onodera H., Ohno K., Yamagata T. Effect of β-stabilizer content on tensile properties of α+β Titanium Alloys.// Transactions of Nat. Research Institute for metals, 1988. - V.30. - №2. - P. 1-8.
15. Ю.Б. Егорова, Р.А. Давыденко, Л.А. Давыденко. Корреляция относительного удлинения титановых сплавов с их химическим составом // Материаловедение. - 2012. - № 9. - С. 26-31.
16. О связи обрабатываемости резанием титановых сплавов с их химическим и фазовым составом / Колачев Б.А. [и др.] // Металлы (РАН), 2002. - №3. - С. 91-96.
17. Исследование статистических связей механических свойств с химическим составом прутков и листов из титановых сплавов / Егорова Ю.Б. [и др.] // Известия МГТУ «МАМИ», 2013. - 15 (1). - Т.2 - С.35-38.
18. Ю.Б. Егорова, Е.Н. Егоров, Р.А. Давыденко. Связь физико-механических свойств и обрабатываемости резанием отечественных титановых сплавов с их химическим составом // Автомобильная промышленность. – 2011. - № 12. - С. 30-33.

MECHANICAL PROPERTIES FORECASTING OF FORGED RODS FROM TITANIUM ALLOYS ON INDUSTRIAL CONTROL BASIS

Abstract

Possibility of deformed half-finished product from titanium alloys mechanical properties forecasting based on statistical research of industrial control data is demonstrated with mistakes, determined by modern level of manufacture development.

Key words: titanium, titanium alloys, ingot, deformed half-finished product, chemical structure, mechanical properties, forecasting of properties.

REFERENCES

[1] Ilin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanovyie splavyi. Sostav, struktura, svoystva. - M.: VILS-MATI, 2009. - 520 p. (rus.)

[2] Titan i titanovyie splavyi v avtomobilestroenii / Egorova Yu.B. [i dr.] //Avtomobilnaya promyishlennost. - 2010. - № 10. - p. 41-43. (rus.)

[3] A. S. Kudryavtsev, E. A. Karasev, N. F. Molchanova. Titanovyie splavyi dlya grazhdanskogo sudostroeniya // TLS – 2010. - №1. – p. 85-91. (rus.)

[4] Primenenie materialov na osnove titana dlya izgotovleniya meditsinskih implantatov / Ilin A.A. [i dr.] // Metallyi. – 2003. - №3. - p.97-104. (rus.)

[5] Titanovyie splavyi dlya avtomobilestroeniya / Egorova Yu.B. [i dr.] // Materialyi 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konferentsii «Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie», 20-21.06.2013 – SPb: Izd-vo Politehn.un-ta, 2013. - p.1137-1146. (rus.)

[6] Razlichnyie vidyi klassifikatsii otechestvennyih titanovyih splavov / Egorova Yu.B. [i dr.] // Titan. - 2012. - №2 (36). - p.11-18. (rus.)

[7] Brun M.Ya. Razrabotka principov upravleniya strukturoy i mehanicheskimi svoystvami zharoprochnyh α+β – titanovyh splavov i povyshenie na etoy osnove harakteristik rabotosposobnosti polufabrikatov dlya aviacionnyh dvigateley. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uch.st. d.t.n. – Moskva.: VILS, 1990. - 51 p. (rus.)

[8] Leh G.I. Issledovanie vliyaniya rezhimov deformacii i termicheskoy obrabotki na strukturu, fazovyy sostav i kompleks mehanicheskih svoystv novogo zharoprochnogo titanovogo splava VT18UOP i razrabotka metallovedcheskih osnov proizvodstva shtampovok diskov iz etogo splava dlya novyh aviacionnyh dvigateley. Avtoreferat

dissertacii na soiskanie uch.st. k.t.n. – Moskva.: VILS, 1992. - 25 p. (rus.)
[9] An Integrated Approach to the Calculation of Materials Properties for Ti-alloys / N. Saunders // Titanium 2003. Sci. and Technol. Proc. 10th World Conf. on Titanium, 13-18 July 2003. - Hamburg, Germany. - V. 1-5. - Pp. 3027-3032.
[10] Glazunov S.G., Matveenko A.F., Dolzhanskiy U.M. Issledovanie statisticheskih zakonomernostey vliyaniya legirovaniya na mehanicheskie svoystva titanovyh splavov kriticheskogo sostava Ti-Al-Mo-V / Proizvodstvo titanovyh splavov. - M.: VILS, 1975. - vyp.7- 58-64 p. (rus.)
[11] Ryndenkov D.V. Sopostavlenie titanovyh splavov po ekvivalentam po aluminiu i molibdenu i nekotorye vozmozhnosti ego primeneniya. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uch.st. k.t.n. – Moskva.: «MATI»-RGTU im. K. E. Ciolkovskogo, 2004 - 25 p. (rus.)
[12] Vozdvizhenskiy V.M., Vozdvizhenskaya M.V., Ilina E.E. Ispolzovanie metoda privedennyh koncentraciy dlya rascheta harakteristik i svoystv titanovyh splavov//Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya. -1999.- №1. - p. 56-59. (rus.)
[13] Vysokaya chistota osnovy titanovyh splavov – zalog prodleniya sroka sluzhby izdeliy ih nih v yadernoy energetike i stabilnosti svoystv v medicinskoy tehnike / Kocar M.L. [i dr.] // Titan, 2012. - № 3 (37). - p. 10-16. (rus.)
[14] Onodera H., Ohno K., Yamagata T. Effect of β-stabilizer content on tensile properties of α+β Titanium Alloys.// Transactions of Nat. Research Institute for metals, 1988. - V.30. - №2. - R. 1-8.
[15] U.B. Egorova, R.A. Davydenko, L.A. Davydenko. Korrelyaciya otnosi-telnogo udlineniya titanovyh splavov s ih himicheskim sostavom // Materialovedenie. - 2012. - № 9. - p. 26-31. (rus.)
[16] O svyazi obrabatyvaemosti rezaniem titanovyh splavov s ih himicheskim i fazovym sostavom / Kolachev B.A. [i dr.] // Metally (RAN), 2002. - №3. - p. 91-96. (rus.)
[17] Issledovanie statisticheskih svyazey mehanicheskih svoystv s himicheskim sostavom prutkov i listov iz titanovyh splavov / Egorova U.B. [i dr.] // Izvestiya MGTU «MAMI», 2013. - 15 (1). - T.2 - p.35-38. (rus.)
[18] U.B. Egorova, E.N. Egorov, R.A. Davydenko. Svyaz fiziko-mehanicheskih svoystv i obrabatyvaemosti rezaniem otechestvennyh titanovyh splavov s ih himicheskim sostavom // Avtomobilnaya promyshlennost. – 2011. - № 12. - p. 30-33. (rus.)

УДК 67.05

М.Т. Коротких

КОНСТРУКЦИОННОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ПРЕРЫВИСТОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Михаил Тимофеевич Коротких, д.т.н., профессор кафедры Технологии конструкционных материалов и материаловедения, Института металлургии машиностроения и транспорта СПбГПУ, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: kmt46@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены результаты экспериментального и теоретического определения динамических нагрузок на режущее лезвие инструмента при его врезании в материал заготовки. Определены возможности конструкционного демпфирования ударных нагрузок и создания высокоэффективных режущих инструментов на этой основе.

Ключевые слова: режущий инструмент, лезвие, динамические нагрузки, конструкционное демпфирование.

Специфика нагружения режущих зубьев инструмента при прерывистом резании затрудняет применение наиболее твердых и износостойких, но хрупких инструментальных материалов. Особенности износа и разрушения режущих лезвий инструмента объясняются обычно высокими динамическими нагрузками, односторонним их действием на лезвие в процессе врезания и выхода из контакта с заготовкой, термическими напряжениями, возникающими при быстром нагреве и охлаждении поверхностей лезвия. Все эти факторы действуют одновременно, однако наличие высоких динамических ударных нагрузок является не самоочевидным.

Проведенные ранее исследования [1,2] показывали, что при врезании лезвия какие либо нагрузки, превышающие статическую силу резания, отсутствуют. Это было связано с методикой регистрации сил, действующих на лезвие, которая была основана на применении наклеиваемых проволочных тензометров, низкочастотной регистрирующей аппаратуре. Так как динамические ударные нагрузки определяются волновыми процессами распространения деформаций в лезвии и самом инструменте, их регистрация возможна только высокочастотной аппаратурой при расположении измерительного преобразователя непосредственно в зоне удара или вблизи от нее, причем преобразователь должен иметь размеры значительно меньшие, чем основные габариты лезвия, чтобы регистрировать именно фронт прохождения волны деформации.

Вывод о высоких динамических нагрузках на лезвие инструмента при прерывистом резании ставит вопрос о возможности их снижения за счет рациональной конструкции инструмента. Показано, что такое снижение ударных нагрузок действительно возможно за счет конструкционного демпфирования на поверхностях трения, при создании специальных режущих инструментов с зависимой от смещения силой трения.

Если рассматривать динамические силы при врезании лезвия как результат ограниченной скорости распространения волны упругой деформации в инструменте и заготовке, то наибольшую сложность вызывает вопрос регистрации данных быстропротекающих деформационных процессов. Предложенный измерительный преобразователь (рис. 1) состоит из пластинки 1, выполненной из закаленной стали (HRC 60), в кармане которой расположен пьезоэлектрический кристалл 2 размером 2x2x0,3 мм, одна из металлизированных сторон которого соединена с корпусом инструмента, а вторая соединена с входом усилителя заряда 3. С целью уменьшения потерь сигнала и электромагнитных наводок усилитель устанавливался на самом режущем инструменте 4, оснащенном токосъемными кольцами 5. При врезании лезвия инструмента в заготовку регистрируется прохождение фронта волны сжатия, сменяющегося волной растяжения при сложном характере распространения упругих волн в корпусе инструмента.

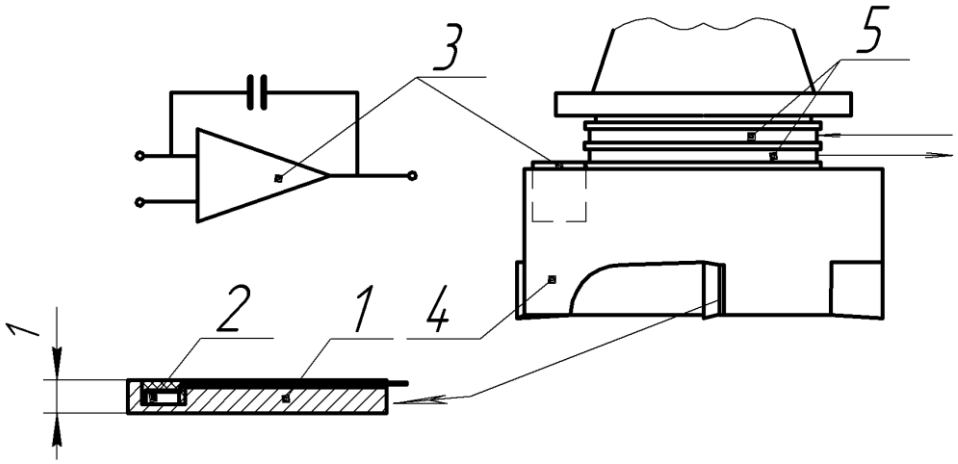


Рис. 1. Измерительный преобразователь для регистрации волновых процессов в инструменте

Для определения волнового характера развития деформаций в корпусе инструмента при быстропротекающем процессе врезания лезвия эксперименты проводились при свободном падении длинного (>200мм) индентора 1 (рис. 2, а), имитирующего центральный удар со скоростями характерными для обычно реализуемых процессов резания (1…4 м/с) [3].

На инденторе закреплялась пластинка 2 из металлокерамического твердого сплава, непосредственно под которой устанавливался измерительный преобразователь 3. При ударе индентора о массивную плиту,

имитирующую заготовку регистрировались характерные затухающие пики волн сжатия и растяжения, связанные с многократным отражением волн от концов линейного индентора (рис. 2, б). Причем оказалось, что максимальная величина деформации в первой волне сжатия при ударе пропорциональна скорости контакта индентора с заготовкой, что позволило сделать вывод о применимости методики для регистрации волновых деформационных процессов в инструменте.

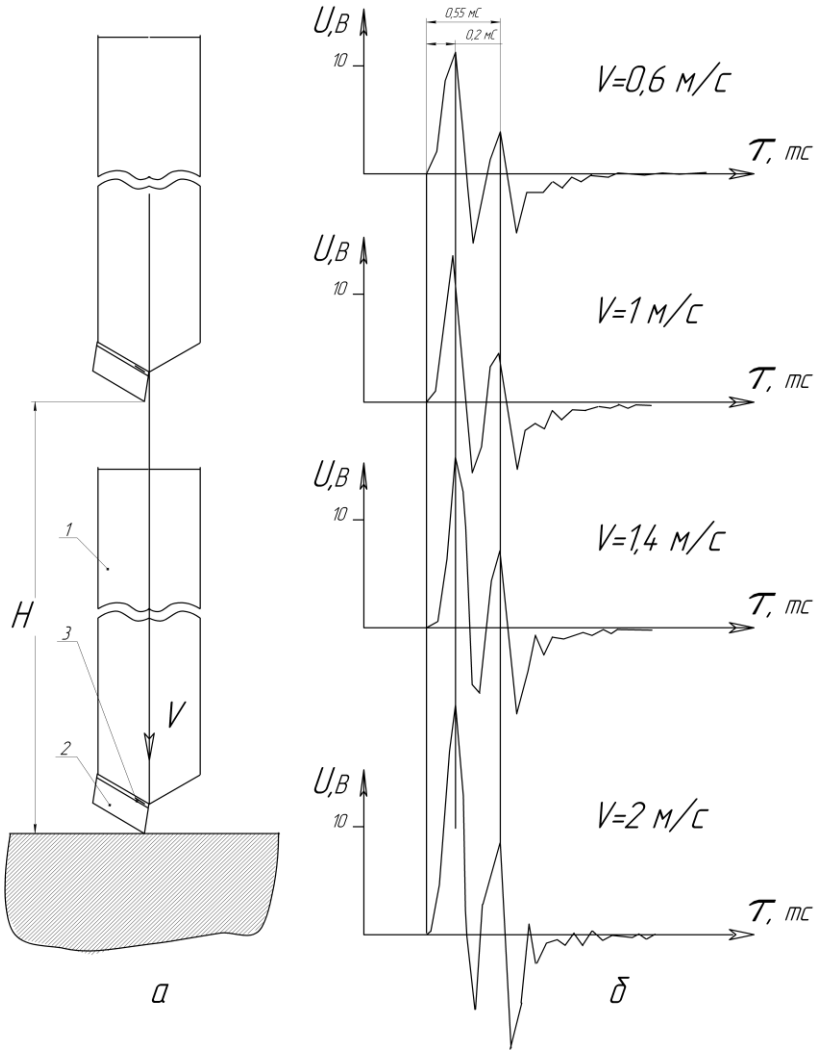


Рис. 2. Экспериментальный индентор и осциллограммы волн деформации при ударном внедрении

Важным установленным фактором является наличие высоких упругих деформаций растяжения после прохождения волны сжатия, что может приводить к разрушению хрупких инструментальных материалов, обладающих высокой прочностью на сжатие, но малой прочностью на растяжение. Было установлено также, что динамические напряжения возрастают при увеличении массы инструмента, а время удара не зависит от скорости сближения тел, а определяется их массой, формой и характерными размерами.

Распространение упругих волн в технологической системе будет носить более сложный характер, зависящий от формы множества тел входящих в систему, их материала, характера стыков и это распространение будет приводить к возникновению колебательных процессов в системе , обычно неблагоприятно сказывающихся на протекании процесса обработки резанием. Поэтому возникает проблема демпфирования волновых процессов на раннем этапе их распространения, т.е. в инструменте. Известно, что энергия волн деформации может интенсивно поглощаться диссипативными границами, в качестве которых можно использовать поверхности контакта элементов конструкции, обеспечив на них условия развития процессов трения [4,5]. Также во многих работах посвященных обработке материалов резанием отмечается, что повышение диссипативности технологической системы позволяет снизить ударное нагружение режущей кромки, что благоприятно сказывается на прочности режущего инструмента.

В работах автора, посвященных обработке материалов с нагревом срезаемого слоя [6,7,8] было показано, что при врезании режущего лезвия в твердые обрабатываемые материалы происходит разрушение хрупких инструментальных материалов, а модификация поверхностного слоя за счет фазово-структурных изменений, приводящая к резкому снижению твердости тонкого поверхностного слоя заготовки позволяет применять даже очень хрупкие , но твердые инструментальные материалы.

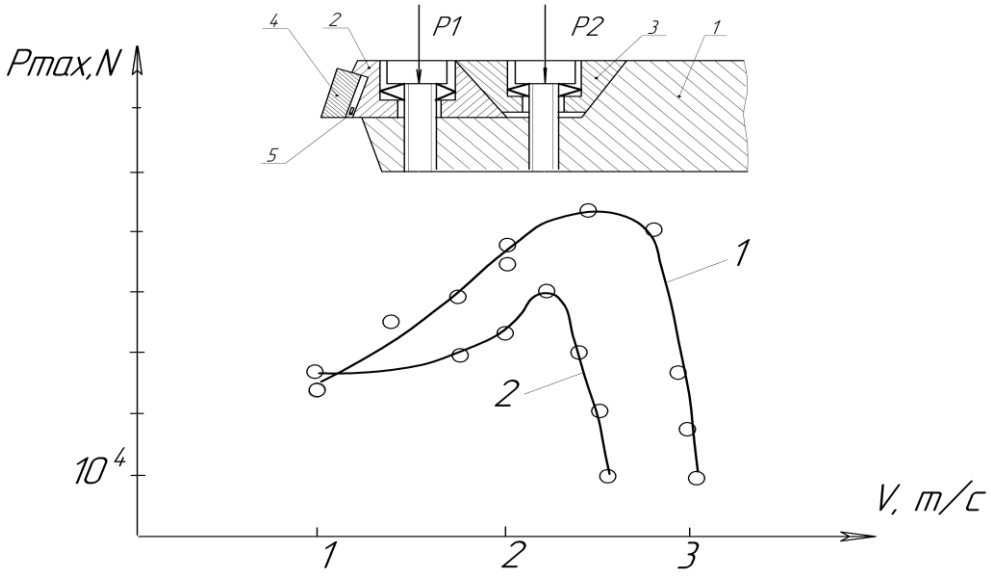


Рис. 3. Индентор с конструкционным демпфированием и максимальная сила удара при различных скоростях соударения

Для экспериментального определения возможности конструкционного демпфирования ударных волновых процессов в режущем инструменте применялся специальный составной индентор (рис. 3) Состоящий из массивного линейно протяженного корпуса 1, на котором закреплялся ползун

2, с возможностью регулирования силы его прижима к корпусу Р1 и клина 3, прижимаемого к корпусу и ползуну с регулируемой упругой силой Р2. Такая система позволяла регулировать силу трения между частями индентора и обеспечивала зависимость силы трения между ползуном и корпусом индентора от смещения ползуна. На конце ползуна устанавливалась металлокерамическая пластинка 4, с установленным под ней измерительным преобразователем 5.

При свободном ударе составного индентора в поверхность массивной заготовки и некотором внедрении режущего лезвия в ее поверхность с образованием риски, имитирующей начало пластического контакта при врезании лезвия сила врезания (максимальная деформация волны сжатия), фиксируемая пьезоэлектрическим датчиком пропорциональна скорости соударения, если отсутствует проскальзывание ползуна относительно корпуса индентора. При уменьшении силы прижима ползуна к корпусу, в случае его проскальзывания по поверхности корпуса величина напряжений сжатия в зоне измерительного преобразователя резко уменьшается.

При закреплении ползуна клином с определенной упругой силой прижима сила трения на поверхности между ползуном и корпусом может быть отрегулирована в широких пределах и зависит от смещения ползуна, увеличиваясь пропорционально его смещению, что позволяет более полно поглощать энергию упругой волны деформации.

Было установлено, что при постоянной силе трения на контактных поверхностях демпфирование может проявляться только при превышении напряжений сдвига над силами трения. Ограничение сдвига по контактным поверхностям за счет более прочного соединения снижает или полностью устраняет эффект демпфирования волна упругих деформаций распространяется в корпус инструмента, что приводит к повышению величины напряжений сжатия-растяжения в зоне лезвия инструмента.

Уменьшение же силы трения приведет к снижению поглощаемой на поверхности энергии и значительному снижению жесткости конструкции. Поэтому представляется рациональным выполнять инструмент с начально малыми силами трения связи его частей и с зависимостью их от величины смещения, т.е. отслеживающими интенсивность динамических процессов с максимально возможным поглощением энергии распространяющейся волны упругой деформации.

Проведенное тарирование датчика составного индентора позволило регистрирвать силу врезания Р, действующую непосредственно на лезвие индентора в момент врезания. Экспериментально было установлено, что эта сила при практических скоростях резания (1…4м/с) может от 3 до 10 раз превышать статическую силу вдавливания индентора при образовании риски равной глубины, что подтвердило вывод о высоких контактных импульсных нагрузках на лезвие в момент его врезания в заготовку. При превышении же интенсиввности волны деформаций над силами трения в

смещаемых элементах инструмента сила удара значительно снижается (рис. 3).

Расчетный анализ волновых процессов в системе с демпфированием на протяженных поверхностях трения был произведен для одномерной задачи при моделировании конструкции инструмента состоящей из двух тел 1 и 2 (рис.4), связанных друг с другом через поверхность трения 3. При моделировании варьировались массы тел, условия на контактной поверхности. При этом сила трения могла быть задана как постоянной, так и зависящей по определенному закону от величины смещения друг относительно друга связанных трением элементов.

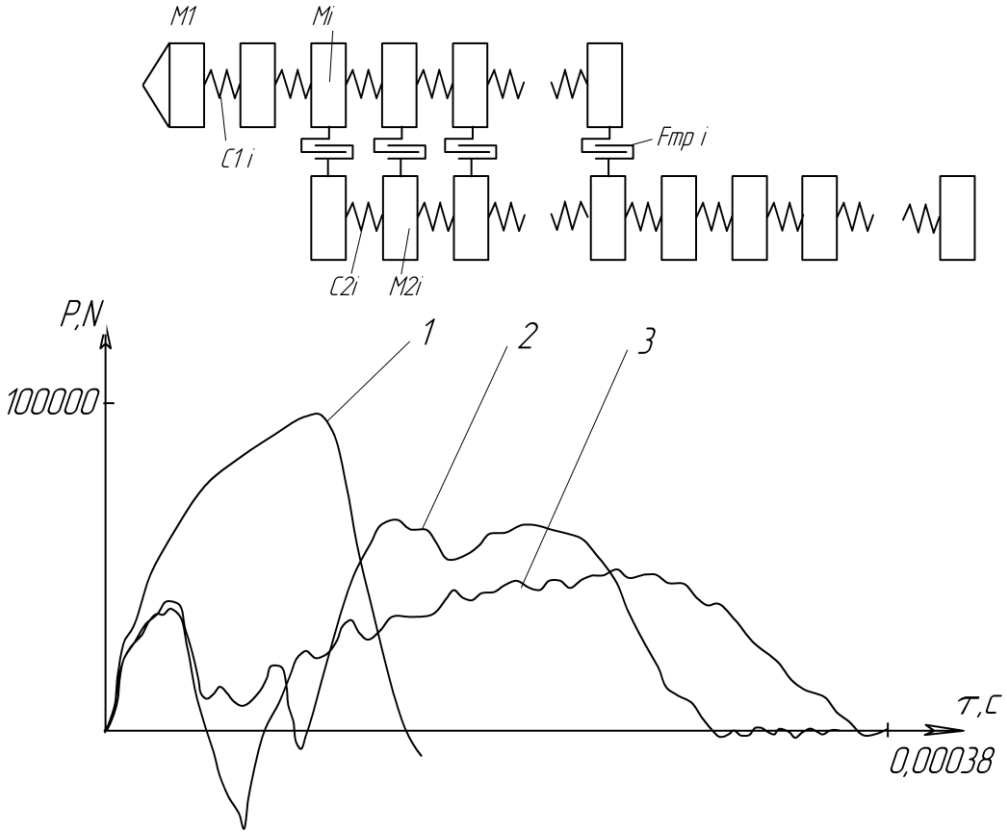


Рис. 4. Расчетная схематизация индентора с конструкционным демпфированием и изменение силы удара без демпфирования -1, с демпфированием: 2- при врезании индентора в стальную плиту, 3- в плиту из алюминиевого сплава (V=3 м/с)

Расчетные эксперименты показали (рис. 4) что изменяя параметры трения можно значительно снижать силу удара при врезании режущего лезвия в заготовку. Было установлено, что наибольшая эффективность демпфирования ударных нагрузок достигается при создании между элементами конструкции связей с силой трения, зависящей от величины смещения между соприкасающимися телами при минимально возможной массе элемента конструкции, на котором закрепляется режущий элемент.

Полученные на основе экспериментов и моделироваия выводы позволили разработать ряд инструментов с конструкционным демпфированием (9,10,11) (рис. 5) обладающих высокими эксплуатационными характеристиками.

Так при установке режущих элементов 1 на опорные элементы 2, имеющие возможность микропроскальзывания цилиндрической поверхности в гнездах корпуса (рис.5,а) , достигается зависимость силы трения от смещения на поверхности трения, так как при провороте оорного элемента увеличивается прижимающая сила со стороны клина 3, за счет упругой деформации клина и винта крепления. Измеренная величина проскальзывания не превышает 0,02мм, что не сказывается на качестве обработанной поверхности, в то же время данная конструкция обеспечивает значительное снижение динамических нагрузок при цилиндрическом фрезеровании высокопрочных сталей. Это позволяет эффективно использовать такие изностойкие , но хрупкие инструментальные материалы как КНТ-16, ТН-20 и т.п.

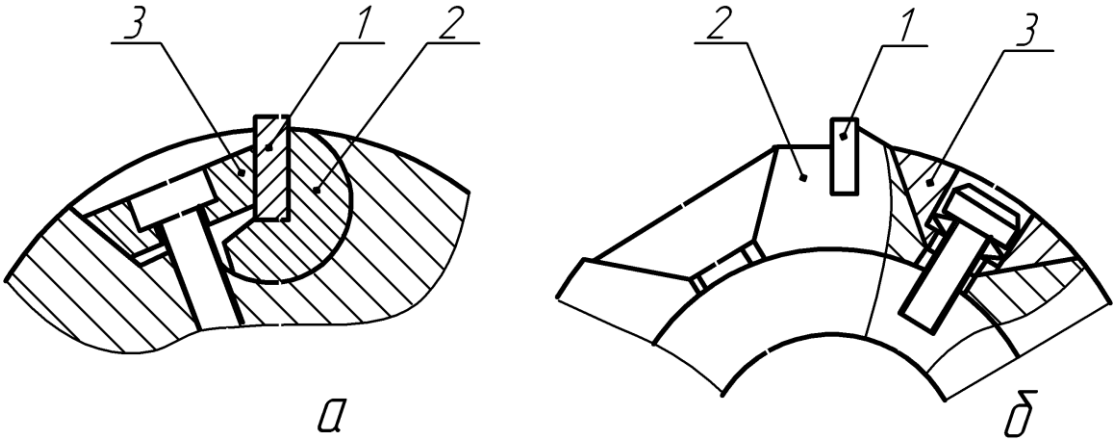


Рис. 5. Конструкции фрез с конструкционным демпфированием

При установке режущих элементов на клиновые опорные основания (рис. 5, б) также можно получить незначительную массу смещаемого по поверхностям трения элемента 2, на котором закреплена режущая пластинка 1 при зависимости силы трения от смещения элемента за счет прижима смещаемого элемента упругим клином 3, что также обеспечивает высокую демпфирующую способность конструкции.

Как показали экспериментальные исследования, фрезы с конструкционным демпфированием позволяют применять режущие элементы из хрупких инструментальных материалов, а износостойкость режущих лезвий фрез при этом, по сравнению с фрезами с неподвижно закрепленными режущими элементами, повышается более чем в два раза.

Это объясняется демпфированием переходных колебательных процессов после динамического воздействия при врезании зубьев фрезы и

демпфированием автоколебаний, возникающих в зоне резания при установившемся процессе резания, что предотвращает расшатывание зерен в структуре композиционных инструментальных материалов и уменьшает усталостное разрушение поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Г.С. Андреев Удар при прерывистом резании металлов.//Вестник машиностроения.-1971.-№3.- с. 65-67.
2. Г.С. Андреев Повышение работоспособности режущего инструмента при периодическом резании.//Станки и инструмент.-1979.-№11.-с.31-33.
3. А.Н. Тимофеев, А.Н. Попов, М.Н. Полищук Ударный стенд свободного падения. Материалы международной научно-практической конференции « Современное машиностроение. Наука и образование. СПб, 2013.
4. Я.Г. Пановко Основы прикладной теории колебаний и удара.-Л.: Политехника, 1990.-272 с.
5. Конструкционное демпфирование в неподвижных соединениях. / Н.Г.Калинин [и др].–РИГА.: Изд-во академии наук Латвийской ССР, 1960.-169 с.
6. М.Т.Коротких , М.А Шатерин, В.Б. Штерин Фрезы для плазменно-механического фрезерования.//Машиностроитель. -1984.-№8. С.15-16.
7. М.Т.Коротких , М.А Шатерин, Г.Б.Лаевский Плазменно-механическое фрезерование труднообрабатываемых материалов..-Л.: ЛДНТП.1988.-24 с.
8. М.Т.Коротких , М.И.Иванов, М.А Шатерин Наборы фрез для обработки кромок под сварку. //Машиностроитель.-1988.-№6. с. 27-28.
9. А.с. СССР №1590203 , кл.В23В 27/00 Режущий инструмент. М.Т. Коротких, Бюл.№33 07.09.90
10. А.с. СССР №1763106 , кл.В23С 5/00 Фреза. М.Т.Коротких, М.А. Волков, Бюл.№35 23.09.92
11. А.с. СССР №1763105 , кл.В23С 5/00 Фреза. М.Т.Коротких , Бюл.№35 23.09.92

M.T.Korotkich

CUTTING TOOL`S STRUCTURAL DAMPING BY INTERRUPTED CUTTING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The results of expirements and theoretical analysis of dynamic loads on the cutting edge by cutting. The possibility of the impact load`s structural damping and development of the high efficiency cutting tools.

Key words: Cutting tools, cutting edge, dynamic load, structural damping

REFERENCES

[1] G.S.Andreev Udar pri prerywistom resanii metallow. //Westnik mashinostroenia .-1971.-№3.-p.65-67. (rus.)
[2] G.S.Andreev Powyshenie rabotosposobnosti regushego instrumenta pri periodicheskom resanii.//Stanki I instrument.-1979.-№11.-p.31-33. (rus.)
[3] A.N. Timofeev, A.N.Popov, M.N. Polishuk, Udarniy stend swobodnogo padenia. Materialy megdunarodnoy nauhcno-praktihceskoy konferenzii « Sowremennoe mashinostroenie. Nauka i obrasowanie». СПб, 2013. (rus.)
[4] Ia.G.Panowko Osnowy prikladnoy teorii kolebaniy I udara. – L.: Politehnika , 1990.-272 p. (rus.)
[5] Konstrukzionnoe dempfirowanie w nepodwijnih soedineniiah / N.G.Kalinin [I dr].–RIGA.: Isd-wo akademii nauk Latwiyskoy SSR, 1960.-169 p. (rus.)
[6] M.T.Korotkich, M.A Shaterin, V.B. Shterin Fresy dlia plasmenno-mehanihceskogo freserowania //Mashinostroitel. -1984.-№8. P.15-16. (rus.)
[7] M.T.Korotkich , M.A Shaterin,, G.B.Laewskiy Plasmenno-mehanihceskoe freserowanie tpudnoobrabatywaemich materialow..-L.: LDNTP.1988.-24 p. (rus.)
[8] M.T.Korotkich , M.I.Ivanov, M.A Shaterin Nabory fres dlia obrabotki kromok pod swarku . // Mashinostroitel.-1988.-№6.p.27-28. (rus.)
[9] A.c. USSR №1590203 , B23B 27/00 Regushiy instrument. M.T. Korotkich, I.B.№33 07.09.90 (rus.)
[10] A.c. USSR №1763106 , B23C 5/00 Fresa. M.T.Korotkich, M.A. Volkov, I.B.№35 23.09.92 (rus.)
[11] A.c. USSR №1763105, B23C 5/00 Fresa. M.T.Korotkich, I.B.№35 23.09.92 (rus.)

621.074.02.01

Р.В.Кузнецов[1], К.В.Мартынов[2]

ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОРГАНИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ

[1]Руслан Валерьевич Кузнецов, старший преподаватель
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)296-25-41, E-mail: Spaun1605@rambler.ru.

[2]Константин Викторович Мартынов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)542-71-22, E-mail: martunov@inbox.ru.

Аннотация

Статья посвящена описанию перспективной технологии применения водных растворов кремнезоля в качестве связующего для противопригарных покрытий. Приводятся значения физических и технологических параметров огнеупорных суспензий.

Ключевые слова: Литье в кокиль, противопригарные покрытия, водные растворы кремнезоля.

В современных условиях подъёма отечественной промышленности и государственного субсидирования предприятий тяжелого машиностроения все больше внимания уделяется вопросу реконструкции существующих заводов. Как показывает практика, 90% модернизации литейно-заготовительных цехов касается в первую очередь вопроса замены морально и физически устаревшего оборудования. Многие руководители с большой осторожностью относятся к внедрению новых материалов в производство, аргументируя это «отработанным технологическим процессом» и «специфическими требованиями к производимой продукции» [1,2]. Между тем, роль используемых шихтовых и вспомогательных материалов в производстве трудно переоценить, современные темпы развития научной отрасли дают возможность производить качественные конкурентоспособные отливки с нужными свойствами, не прибегая к кардинальным изменениям технологии. В отдельных случаях при мелкосерийном производстве отливок

ответственного назначения смена материалов является наиболее рациональным и чуть ли не единственным возможным способом повышения процента годного литья [3]. Подобная ситуация часто складывается на предприятиях военно-промышленного комплекса в силу узкой специфики производства.

На протяжении долгих лет на предприятии ОАО «Красный Октябрь» производятся отливки ответственного назначения для деталей военной и гражданской авиационной промышленности, в частности, втулки и оси из сплава БрО10С10. В последние годы работа конструкторов по модернизации узлов и агрегатов привела к возросшим требованиям к качеству выпускаемых заготовок. В силу выше описанных причин смена технологии производства не представлялась возможной. Было принято решение обратиться к опыту НИР СПб Политехнического Университета.

С помощью опытной краски были получены малогабаритные отливки из оловянистой бронзы БрО10С10 для детали «Ось», используемой в трансмиссии вертолётного редуктора «ВР-80». Серийно кокильные заготовки для ответственных вспомогательных агрегатов трансмиссий получают в шести секционных чугунных кокилях.

По серийной технологии предприятия используется краска состава ацетон-канифоль, которая имеет ряд недостатков, а именно: маленькую живучесть, неоднородность по составу и как следствие неоднородное выгорание. Это является причиной остаточных газов в форме и неметаллических включений на границе отливка-форма (рис. 1). Анализ этих дефектов позволил сделать вывод о возможности внедрения принципиально новой кокильной краски на органическом водном связующем.

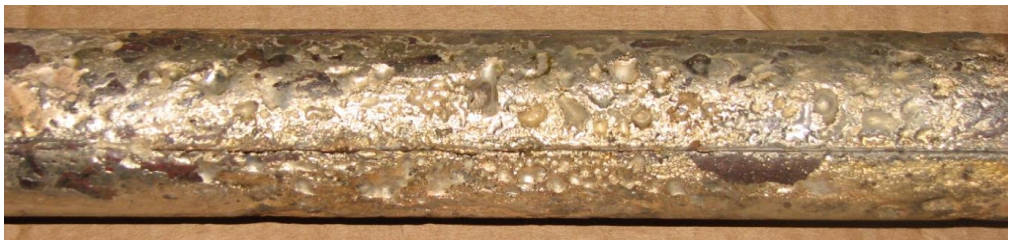


Рис. 1. Газовые раковины и неметаллические включения на поверхности серийной отливки.

Краску готовили вручную непосредственно на участке заливки металла, в качестве наполнителя использовался плавленый кварц с размером зерен 0,315-0,4 мм (выбор наполнителя продиктован экономическими соображениями и не является критичным). Кварц добавлялся в связующее при постоянном помешивании. Массовая доля наполнителя около 30%. Перед нанесением краску выдерживали до выявления осадка (около 10 минут). Нанесение проводилось так же

вручную, кистью, для исключения подтёков краски.

Весьма существенным остается вопрос сушки. По серийному технологическому процессу кокиля прогревают на заливочном плацу открытым пламенем в течении 10-12 минут до Т≈180-200˚С. Данная технология не позволяет добиться равномерной температуры формы, что в свою очередь приводит к образованию газовых раковин экзогенного происхождения. Применение опытного покрытия позволяет визуально оценить прогрев формы – при достижении оптимальной температуры связующее огеливается и меняет цвет (данные выводы были сделаны после анализа серии опытных плавок).

Сплав БрО10С10 раскислялся фосфористой медью, для рафинирования сплава использовался «Пробат Флюс Экстра». Заливку производили при температуре 1110^{+10}_{-20}˚С.

Визуальный осмотр опытной плавки показал, положительную динамику по качеству поверхности заготовок. В частности, в сравнении с серийными заготовками практически полностью удалось уйти от пригаров и пористости.

По одной заготовке от плавки были отданы на исследования в ЦЗЛ (центральную заводскую лабораторию) – на химический анализ и механический цех – для получения заключения по механической обработке.

Анализ показал, что химический состав всех образцов соответствует Н28ТУ117. Сравнительный анализ механических свойств приведен в таблице 1.

Таблица 1

№ образца	$\sigma_в$, кг/мм^2	δ, %	НВ в центре прутка	НВ на ½ радиуса прутка
1 (серийный)	26,8	5,0	84,9	
2 (серийный)	26,2	5,0		
3 (опытный)	24,5	24,0	84,9	95÷101
4 (опытный)	26,0	27,2		
По 79МТУ-57	≥20,0	≥5,0	≥55	

Микроисследование поперечных сечений прутка (микрошлифов) показал, наличие во всех образца включений свинца. Опытные образцы имеют включения крупного характера, местами в виде скоплений, с удалением от центра, вблизи поверхности включения свинца становятся мелкими, равномерно распределёнными. В серийных образцах распределение свинца имеет неравномерный характер по всему сечению прутка.

В ходе выполнения контроля обработанных деталей определили, что

детали опытной партии отливок имеют единичные раковины Ø ≈ 0,8 мм и глубиной ≈ 0,5 мм на внутренних и наружных поверхностях. Детали из серийной партии имеют следующие дефекты: на 7 деталях единичные раковины Ø ≈ 1,0 мм и глубиной до ≈ 0,5 мм на внутренних и наружных поверхностях, а 8 деталей на поверхностях имеют множественные раковины Ø ≈ 2-2,5 мм и глубиной до ≈ 0,5-1,0 мм.

Изготовление деталей происходило на токарных станках порошковым твердосплавным резцом. Обработка проходила на скорости 250-300 м/мин с подачей 0,15…0,2 мм/об. В процессе обработки опытной партии удалось практически полностью исключить явление «наростообразования», т.е. налипания стружки на режущую кромку, что позволило добиться чистоты поверхности Rz = 2,4 уже на предварительных токарных операциях.

Положительные результаты первых опытных плавок показали существенное снижение брака по газовым раковинам и дали дополнительные перспективы применения противопригарного покрытия на основе органического водного связующего. Проведенные анализы химического состава и механической обработки опытных заготовок позволили сделать выводы о возможности использования данных красок для влияния на структуру отливки и ее механические свойства. В связи с этим следующим этапом работы являлся выбор оптимальной композиции «наполнитель-связующее»

Для выбора связующего на кафедре «МТиОЛП» ИММиТ был проведен ряд работ по систематизации и сравнению свойств материалов некоторых отечественных и зарубежных производителей, в частности, были рассмотрены такие производители как: «Армосил» (Россия), «ЛЮДЕКС-SKF» (США), «GS-30» (Китай) [4,5,6]. Сравнительный анализ помог сделать выбор в пользу китайского производителя.

Кремнезоль «GS-30» представляет собой стабильный водный коллоидный раствор без технологических добавок. Особенность связующего – PH=7. Этот показатель считается критичным, так как основная масса поставляемых кремнезолей имеет щелочную реакцию.

Это связано с процессом стабилизации методом натриевой щелочной подушки. Остаточный натрий образует легкоплавкий силикат натрия, который в нашем случае может оказать негативное влияние на поверхность отливки.

Стабилизированный водный раствор кремнезоля «GS-30» требует введения технологических добавок для улучшения смачивания и седиментационной устойчивости огнеупорного покрытия [7].

Последнее представляется для нас важным, поскольку в силу особенностей производства после окраски форма переворачивается, что приводит к неравномерному распределению противопригарного покрытия. В качестве универсальной добавки использовали бутилстирол [8,9].

В конечном виде рассматривали противопригарные покрытия на

основе «GS-30» с добавкой бутилстирола; используемые наполнители: кварцевый песок, плавленый кварц, электрокорунд.

Выбор огнеупорных наполнителей был сделан исходя из возможностей конкретного литейно-заготовительного производства.

В работе определяли следующие физические и технологические параметры: условная вязкость, статический краевой угол смачивания, поверхностное натяжение, динамическая вязкость огнеупорного покрытия.

Условную вязкость огнеупорной суспензии оценивали по воронке ВЗ-4. Для композиции «связующее «GS-30» – наполнитель «маршалит»» условная вязкость возрастает с 14 до 295 секунд при увеличении количества введенного наполнителя от 1,0 до 2,1 кг на 1 $дм^3$ связующего [10,11].

Условная вязкость для наполнителя «плавленый кварц» и связующего «GS-30» минимально составляет 16 с, а 300 с – при максимальной массе введенного наполнителя 1,5 кг на 1 $дм^3$ связующего. При большем количестве наполнителя происходит засорение воронки из-за низкой седиментационной устойчивости суспензии [10,11].

Условная вязкость для электрокорунда составляет 15 с при 1,3 кг на 1 $дм^3$ связующего «GS-30» и 300 с - при 2,4 кг, что является лучшим результатом с учетом плохой седиментации краски состава «кремнезоль – плавленый кварц».

Проведенные измерения условной вязкости показывают, что состав органического полимера, вводимого в связующее в качестве упрочняющей добавки, существенно влияет на вязкость противопригарного покрытия.

Краевой угол смачивания противопригарного покрытия на материале чугунного кокиля измеряли теневым методом. Для связующего «GS-30» и наполнителя «маршалит» краевой угол составляет 40^0 при 1,1 кг наполнителя на 1 литр связующего. При количестве наполнителя 2 кг на 1 литр краевой угол смачивания составляет 45^0.

Применение плавленого кварца в качестве наполнителя со связующим «GS-30» дает возрастание краевого угла с 30^0 (при 0,8 кг наполнителя на 1 литр связующего) до 45^0 (при 1,5 кг). Электрокорунд в качестве наполнителя показывает возрастание угла смачивании с 35^0 до 45^0 при 2,4 кг.

Огнеупорные краски характеризуются, прежде всего, способностью сохранять сцепление с защищаемой поверхностью. При нагреве возникают напряжения, приводящие к локальному разрушению покрытия. По этой причине предпочтение всегда отдавалось проникающим краскам.

Тут имеет место явление капиллярности: вследствие повышенной активности ПАВ, входящего в состав связующего, происходит заполнение капилляров, образованных разностью фракций огнеупорного наполнителя.

При этом, чем мельче фракция, тем тоньше капилляр и выше капиллярное давление. В результате пограничная область «краска –

форма» объединяется связующим и происходит разделение слоев.

Для проверки капиллярности нами было смоделировано явление повышенного капиллярного давления на образцах из песчаной стержневой смеси. Моделирование позволило установить, что данный процесс не является случайным.

Причиной служит именно органическая добавка, а не свойства исходного кремнезоля.

Покрытие, выполненное на стандартном кремнезоле (рис. 2), имеет достаточное сцепление с поверхностью песчаной формы при количестве введенного наполнителя 1,5 кг на 1 дм^3 связующего. Толщина защитного слоя - 0,5…1 мм. Покрытие не имеет подтеков. Глубина проникновения в форму (рис. 3) не превышает 0,5 мм.

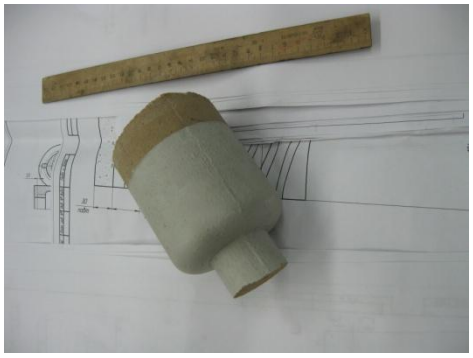


Рис. 2. Стержень, окрашенный водной противопригарной краской на основе кремнезоля «GS-30».

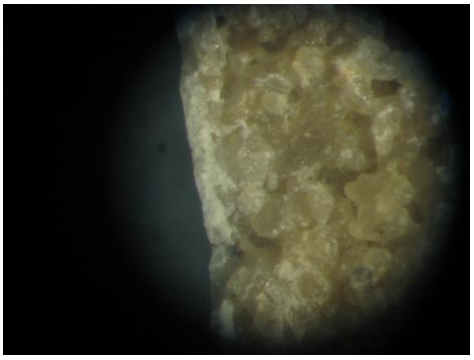


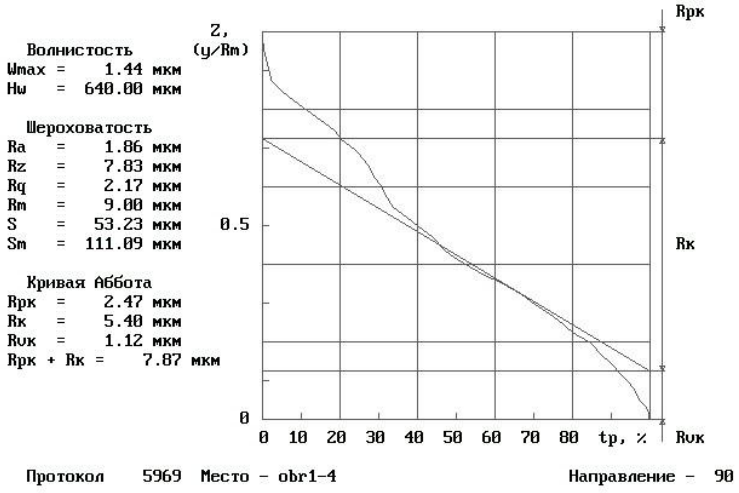
Рис. 3. Срез в зоне контакта противопригарного покрытия на основе кремнезоля.

Связующее с такими свойствами ограничено в применении, но является перспективным направлением в области литейных красок.

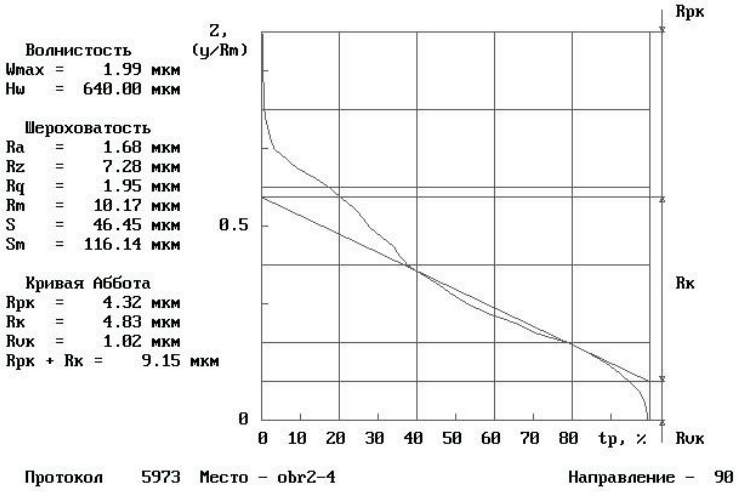
Предварительный осмотр залитых опытных заготовок, как и в предыдущий раз, в положительную сторону отличал их от серийных по качеству поверхности. Такая же динамика проявилась в уменьшении процента газовых раковин, выявленных в процессе механической обработки.

Образцы с опытной плавки были изучены на кафедре «Технологические машины и оборудование автоматизированных производств» СПб ГПУ. Исследования, проведенные на профилографе (Рис. 4) на опытных образцах, показали величину шероховатости (R_z) менее 10 мкм. Без использования этих противопригарных красок R_z составила 10-14 мкм. Идеальное соотношение наполнителя в краске: для маршалита - 1,9 кг/дм^3; плавленого кварца – 1,2 кг/дм^3; электрокорунда 2,2 кг/дм^3.

а)



б)



в)

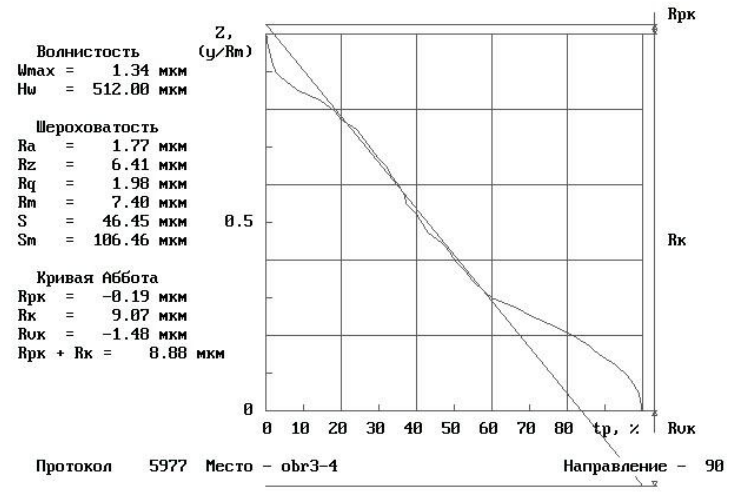


Рис. 4. Образцы опытных отливок, измеренных на профилографе:
а) состав краски: кремнезоль «GS-30» - наполнитель «маршалит»;
б) состав краски: кремнезоль «GS-30» - наполнитель «плавленый кварц»;
в) состав краски: кремнезоль «GS-30» - наполнитель «электрокорунд».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Особенности формирования структуры и поверхности контактного слоя керамических форм на основе ЭТС-40 и Сиалит-20С // Литейщик России. №2. 2006. С. 24-27.
2. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Бречко А.А. Прочность керамических форм для литья по выплавляемым моделям. Сборник трудов 9-госъезда литейщиков, Уфа, 21 – 23 апреля 2009 г.
3. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Пречесный М.А., Мутилов В.Н. Керамические формы для отливок повышенной точности из высоколеги-рованных сталей. Сборник трудов 7-й Международной научно-практической конференции “Исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности”. Т. 1. Санкт-Петербург, 28 –30 апреля 2009. С. 368-370.
4. Емельянов В.О. Формирование структуры и свойств керамических форм. Санкт-Петербург, РИО, Издание Санкт-Петербургского института машиностроения, 2010.
5. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Рагозин С.М., Пречесный М.А. Литейная керамика на кремнезольном связующем. Российский научнотехнический журнал “Инструмент и технологии”, Санкт-Петербург, 28-й выпуск 2010 г. С. 10-18.
6. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машиностроение, 1963.
7. Бречко А.А. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, 1982.
8. Родионова О.Е., Мартынов К.В., Емельянов В.О. Бинарное связующее для керамических форм. Материалы Всероссийской научно-технической конференции “Новые материалы и технологии”.Т. 1. М., 16 – 18 ноября 2010 г. С. 36.
9. Шуманская Я.В., Мартынов К.В., Емельянов В.О. Свойства керамических форм на основе кристаллического кварца и связующего JS-30 с добавкой бутилстирола. Материалы Всероссийской научно технической конференции “Новые материалы и технологии”. Т. 1. М., 16 – 18 ноября 2010 г. С. 42.
10. Шкленник Я.И. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984.
11. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Мутилов В.Н., Соколов А.В., Суханова В.П. Водный раствор кремнезоля как альтернатива готовым связующим в технологии ЛВМ // Литейное производство. 2012. № 4. С. 18 – 21.
12. Кузнецов Р.В., Емельянов В.О. Кокильные краски на водном связующем. Материалы «Недели науки СПб ГПУ 2012».
13. Кузнецов Р.В., Мартынов К.В. Изготовление кокильных заготовок из

оловянистых бронз ответственного назначения. Материалы «Недели науки СПб ГПУ 2013».

R.V.Kuznetsov, K.V.Martunov

EXPERIENCE OF INDUSTRIAL APPLICATION OF PROTIVOPRIGARNY COVERINGS ON THE ORGANIC BINDING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Article is devoted to the description of perspective technology of use of water solutions of silica-sol as binding for the protivoprigarnykh of coverings. Values of physical and technological parameters of flameproof suspensions are given.

Key words: Casting in the chill mold, protivoprigarny coverings, water solutions of silica-sol.

REFERENCES

[1] Yemelyanov V. O., Martynov K.V. Brechko A.A. Features of structure formation and surface of a contacting layer of ceramic forms on the basis of ETS-40 and Sialit-20C//the Founder of Russia. No. 2. 2006 . P.24-27. (rus.)
[2] Yemelyanov V. O., Martynov K.V. Brechko A.A. Prochnost of ceramic casting molds on melted models. Collection of works 9-gosjezda of founders, Ufa, on April 21 - 23, 2009. (rus.)
[3] Yemelyanov V. O., Martynov K.V. Prechesny M. A., Mutilov V. N. Ceramic forms for enhanced accuracy castings from high-alloy the staly. Collection of works of the 7th International scientific and practical conference "Researches, Development and Application of High Technologies in the Industry". T. 1 . St. Petersburg, on April 28 - 30, 2009 P. 368-370. (rus.)
[4] Yemelyanov V. O. Structure formation and properties of ceramic forms. St. Petersburg, RIO, Issuing of the St. Petersburg institute of mechanical engineering, 2010. (rus.)
[5] Yemelyanov V. O., Martynov K.V. Ragozin S. M., Prechesny M. A. foundry ceramics on kremnezolny binding. Russian nauchnotekhnichesky log "Tool and Technologies", St. Petersburg, 28th release of 2010 of Page 10-18. (rus.)
[6] Berg P.P. Forming materials. M.: Mechanical engineering, 1963. (rus.)

[7] Brechko A.A. Forming and rod compounds with the given properties. L.: Mechanical engineering, 1982. (rus.)
[8] Rodionova O. E. Martynov K.V. Yemelyanov V. O. Binarnoye binding for ceramic forms. Materials of the All-Russian scientific and technical conference "New Materials and Technologies". T. 1 . M, on November 16 - 18, 2010 P. 36. (rus.)
[9] Shumanskaya Ya.V. Martynov K.V. Yemelyanov V. O. Properties of ceramic forms on the basis of crystalline quartz and binding JS-30 with the component butilsterola. Materials of the All-Russian scientifically technical conference "New Materials and Technologies". T.1. M, on November 16 - 18, 2010 P. 42. (rus.)
[10] Shklennik Ya.I. Casting on melted models. M.: Mechanical engineering, 1984. (rus.)
[11] Yemelyanov V. O., Martynov K.V. Mutilov V. N., Sokolov A.V. Sukhanova V.P. Water solution kremnezolny as alternative ready binding in the LVM technology//Foundry production. 2012 . No. 4. P.18 – 21. (rus.)
[12] Kuznetsov R.V., Yemelyanov V. O. Kokilnye of color on the water binding. Materials "Weeks of Science of SPb of GPU 2012". (rus.)
[13] Kuznetsov R.V., Martynov K.V. Manufacture the kokilnykh of preparations from the olovyanistykh bronze responsible assignment. Materials "Weeks of Science of SPb of GPU 2013". (rus.)

УДК 621.01

В. И. Никифоров

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Валерий Иванович Никифоров, к. т. н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)534-75-19, E-mail: valerii.nikiforov@gmail.com.

Аннотация

Представлена разработка научной классификации технологических методов обработки, строящейся на признаках общности физико-химических процессов, протекающих в технологической системе. Показано, что учебная система знаний о технологических методах обработки, реализуемая при подготовке специалистов в области техники и технологий, не соответствует научной.

Ключевые слова: технологический метод обработки, технологическая система, классификация, физико-химические основы обработки.

Технологическим методом обработки согласно ГОСТ 3.1109–82 «Термины и определения основных понятий» называется совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении обработки безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделия. В указанном стандарте приводятся определения методов обработки, сложившихся и используемых в производстве на время его создания, но полная классификация методов, соответствующим образом оформленная, в нём отсутствует.

В научной и учебной литературе, относящейся к технологии получения изделий, даётся ряд классификаций технологических методов обработки заготовок [1–9]. Однако они существенно различаются между собою по признакам классификации, названиям и по степени полноты охвата существующих методов обработки. К тому же, при их рассмотрении часто не выделяется системообразующий признак классификации, а обоснования принимаемой структуры методов обработки не приводятся.

Очевидно, что отсутствие научно обоснованной классификации в этой области технологических знаний ставит сложные задачи перед технологами при выборе оптимального для заданных условий производства изделия метода обработки, не способствует развитию системы методов обработки и не позволяет исследователям на научных основах рассматривать пути

дальнейшего развития технологии обработки заготовок. Резко усложняется и задача подготовки в образовательных учреждениях технологов, обладающих способностью выбора оптимального метода обработки из всей существующей и перспективной гаммы методов. Изучение общей системы методов обработки трансформируется в подготовку специалистов по отдельным конкретным группам методов, что приводит к формированию технологов узкого профиля.

В данной работе ставится задача создания системной классификации технологических методов обработки заготовок, базирующейся на общности их физико-химических основ и охватывающей все способы получения изделий с заданными формами, размерами и свойствами материала.

Очевидно, что перечень правил, на основе которых реализуется тот или иной технологический метод обработки, определяется характеристиками технологической системы, в которой осуществляется обработка. На рис. 1 схематично представлена схема функционирования технологической системы, раскрывающая её структуру и состав материальных элементов системы на этапах превращения предмета труда (заготовки) в изделие (деталь).

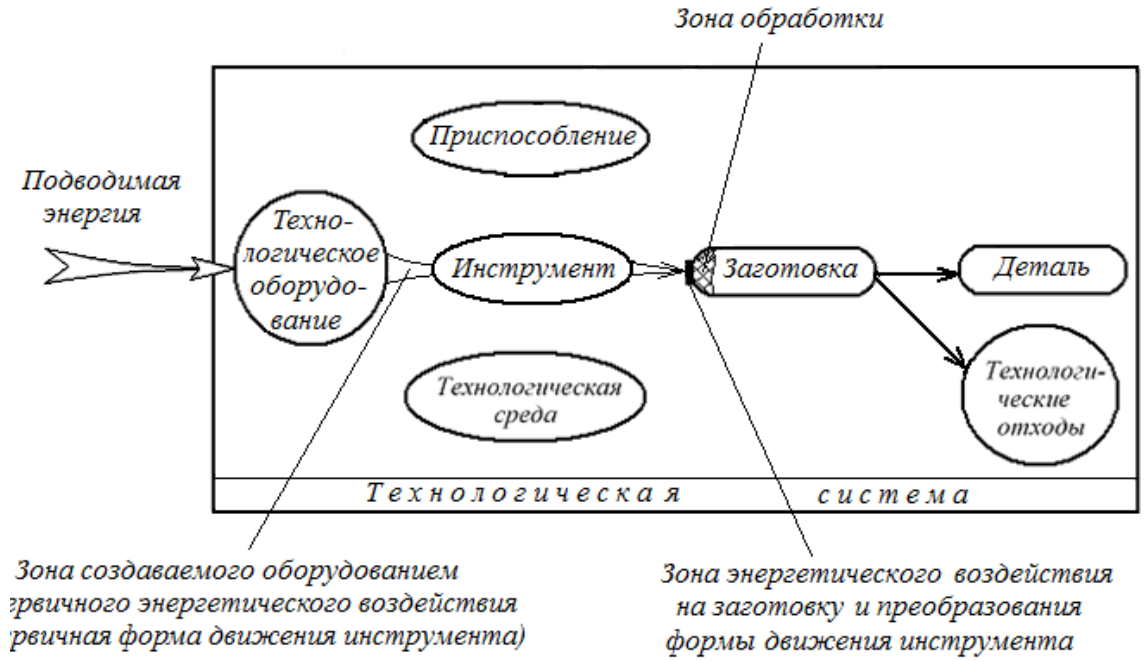


Рис. 1. Схема функционирования и элементы технологической системы

Первый элемент технологической системы, технологическое оборудование, используя подводимую к системе энергию, создаёт энергетическое воздействие на заготовку движущейся в определённой технологической среде материальной субстанцией (режущим инструментом, рабочим веществом, микрочастицами, полем и др.). Примем при дальнейшем рассмотрении для всех видов материальной субстанции, воздействующих на заго-

товку, единое понятие «инструмент», под которым в широком смысле этого слова понимается средство воздействия на объект, преобразования и создания объекта.

Энергетическое воздействие инструмента, выделенное на рисунке 1 вектором, названо первичным энергетическим воздействием, а вид движения инструмента — первичной формой его движения. К первичным видам движения инструмента относят механический, электрический, магнитный, тепловой, химический, световой и ядерный виды. Этими же терминами можно определять и создаваемые виды энергетического воздействия оборудования на заготовку. Возможно создание оборудованием комбинированного энергетического воздействия, обеспечиваемого подачей к заготовке одновременно двух и более из ранее указанных форм движения инструмента (инструментов).

В некоторых случаях непосредственно перед заготовкой или в ее тонком поверхностном слое тем или иным способом может происходить преобразование первичного энергетического воздействия в какой-либо другой вид воздействия. Чаще всего такими преобразуемыми видами являются электрическое, магнитное и световое воздействия. Таким образом, формируется вторичный вид энергетического воздействия на заготовку, которым может быть механический, химический или тепловой виды энергетического воздействия. Преобразования механической, термической и химической форм движения инструмента, создаваемых оборудованием как первичные виды энергетического воздействия, при обработке не происходят.

Первичное энергетическое воздействие или преобразованное (вторичное) энергетическое воздействие вызывает физико-химические процессы в заготовке, которые носят самый разнообразный характер и являются естественнонаучными основами изменения её формы, размеров, точности и свойств материала в зоне обработки.

Исходя из того, что технологический метод обработки реализуется в рамках технологической системы, можно утверждать, что содержание действий и последовательность обработки определяются характеристиками входящих в систему элементов, а также параметрами их функционирования. Многообразие элементов технологической системы, их характеристик и идущих в технологической системе физико-химических процессов указывает на то, что технологические методы обработки можно классифицировать по разным признакам.

Обычно в качестве основания деления в классификации выбирают существенный для изучаемых объектов признак. В этом случае классификация, называемая естественной, выявляет основные сходства и различия между предметами классификации. В данной работе ставится задача создания классификации методов обработки, позволяющей учесть многообразие классификационных признаков при условии создания их системы и ранжирования по степени общности. Наибольшей общностью обладает

признак классификации, характеризующий единство физико-химических основ протекающих в технологической системе процессов.

Далее предложена классификация технологических методов обработки, названная естественнонаучной классификацией. В основу ее положены физико-химические процессы, проходящие в технологической системе и приводящие к изменению ее характеристик. С нашей точки зрения, классификации, основанные на других признаках, носящих целевой и отраслевой характер, должны рассматриваться только на основе этой естественнонаучной классификации технологических методов обработки.

Как следует из рисунка 1, все физико-химические процессы в технологической системе протекают в виде трёх последовательных стадий:

— формирования технологическим оборудованием первичного энергетического воздействия в виде движения инструмента первичной формы;

— наличия или отсутствия непосредственно перед заготовкой преобразования первичного энергетического воздействия во вторичное;

— физико-химических процессов в зоне обработки заготовки, приводящих к её обработке.

Эти этапы, а также рассмотренная ранее возможность энергетического воздействия на заготовку одновременно несколькими видами движения инструмента и составляют первые уровни общей системной классификации методов обработки. Признаки естественнонаучной классификации применительно к каждому уровню представлены на рис. 2.

На этом же рисунке приведены в упрощенном виде и обобщенные сведения по возможным группам технологических методов, выделяемых на каждом уровне. Детализированный их анализ и схемы уровневых естественнонаучных классификаций в данной работе не приводятся. В то же время даже из приведенного сжатого материала становится очевидным, что суммарное количество признаков естественнонаучной классификации методов велико. Как подтверждение этому далее приведена классификация методов обработки на уровне второго признака (см. рис. 2) и то только с учетом разновидностей основного энергетического воздействия, реализуемого в рамках комбинированных методов обработки (рис. 3).

Многообразие физико-химических процессов, приводящих к непосредственной обработке заготовки, делает практически невозможной задачу создания единой развернутой естественнонаучной классификации даже для технологических методов, базирующихся на одном виде энергетического воздействия. В то же время, обращает внимание, что число реально используемых в машиностроении методов обработки не столь уж и значительно. Поэтому имеется возможность использовать проведенное детальное рассмотрение для группирования встречающихся в литературных источниках методов обработки на основе единства или близости выделенных (см. рис. 2) признаков классификации.

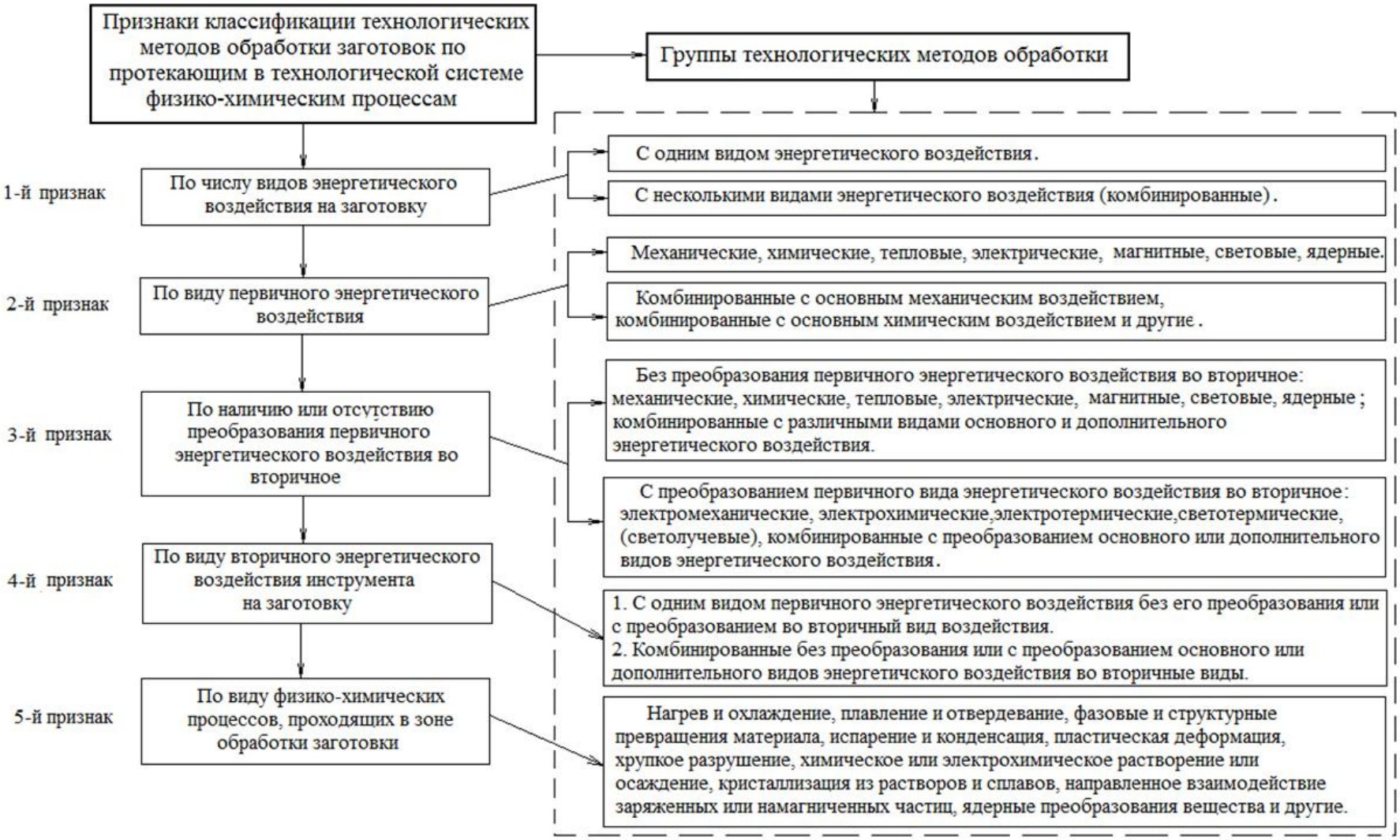


Рис. 2. Признаки и группы естественнонаучной классификации технологических методов обработки

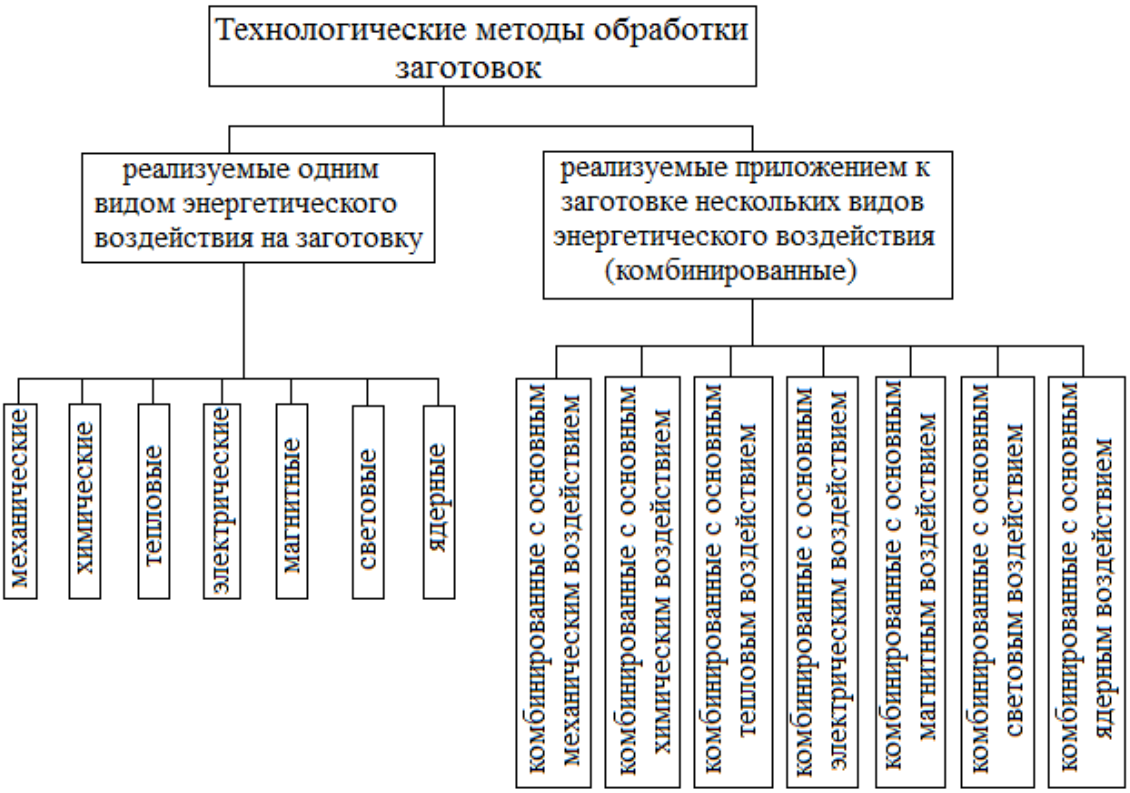


Рис. 3. Классификация методов обработки по виду первичного (основного - для комбинированных методов) энергетического воздействия

Детальное изучение работ [1-9] показывает, что в машиностроении используются технологические методы, которые классифицируются практически по всем признакам, выделенным для естественнонаучной классификации на рис. 2. Проведенная на основе этих признаков систематизация существующих технологических методов обработки в машиностроении представлена на рис. 4.

В классифицированных по физико-химическим признакам методах обработки выделяют две исторически сформировавшиеся в разные периоды подгруппы. Первую подгруппу оставляют механические, тепловые и химические методы обработки. Эта группа методов сформировалась задолго до появления методов второй подгруппы, а потому они названы классическими методами обработки заготовок в машиностроении. Все остальные методы в классификации методов обработки заготовок в машиностроении получили название «Электрофизические и электрохимические методы обработки» [1, 3, 5, 9 и др.]. Электрофизические и электрохимические методы, возникнув на стыке фундаментальных и прикладных наук, интенсивно развиваются, главным образом, в рамках изучения естественнонаучных дисциплин, носящих фундаментальный, а не прикладной характер. Именно поэтому перечень их не может быть строго очерчен.

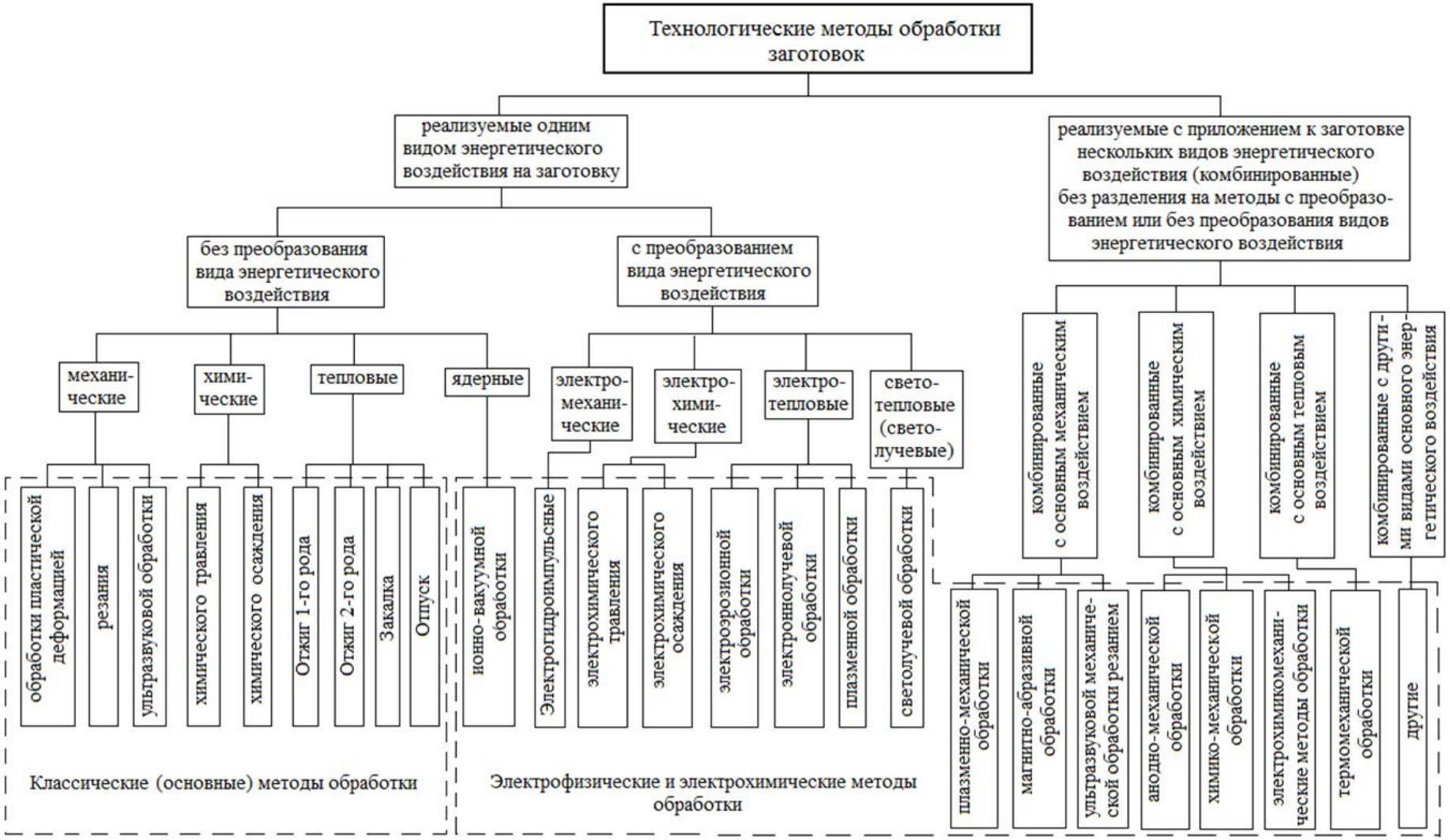


Рис.4. Классификация технологических методов обработки по физико-химическим процессам, протекающим в технологической системе

Представленная на рис. 4 естественнонаучная классификация используемых в настоящее время технологических методов обработки является научной основой создания соответствующей учебной системы знаний. Такое изучение методов обработки при подготовке студентов в области техники и технологий осуществляется в рамках общепрофессиональной учебной дисциплины «Технология конструкционных материалов» [10].

Обращает внимание, что принятая в указанном учебнике последовательность изучения всей совокупности технологических методов обработки не соответствует структуре представленной на рис. 4 научной классификации. В учебнике отсутствует и обоснование последовательности их изучения. Таким образом, можно констатировать, что научная система материала о технологических методах обработки заготовок и строящаяся на ее основе учебная система аналогичного по содержанию материала не совпадают. Это несовпадение требует особого педагогического анализа.

Вопрос о создании педагогически обоснованной структуры изучения технологических методов никем не рассматривался. В задачи данной работы он также не входит. Тем не менее, анализ соотнесения научной и учебной структур материала по методам обработки указывает на необходимость наличия следующей специфики в структурировании учебного материала:

— методы термической обработки в рамках учебного процесса следует, как это и делается в учебных планах, в силу их зависимости от характеристик конкретных материалов изучать в специальной общепрофессиональной дисциплине «Материаловедение»;

— технологические методы обработки микрочастицами, представленные в научной классификации в различных группах методов обработки, в силу близости областей использования и размеров используемого инструмента (микромир), целесообразно вводить особым разделом с названием «Технологические методы обработки заготовок потоками микрочастиц»;

— не требуется выделять в отдельный раздел комбинированные методы обработки; изучение их можно проводить в рамках классических методов или методов с преобразованием первичного энергетического воздействия.

Анализ федеральных государственных образовательных стандартов и учебников по дисциплинам «Технология конструкционных материалов» и «Материаловедение» показывает, что именно в этих направлениях и реализована структура и содержание научного материала о технологических методах обработки заготовок при трансформации его в учебный материал.

Очевидно, что в данной работе невозможно остановиться на всех аспектах классификации технологических методов обработки и основ их изучения. В то же время, уже созданная, пусть еще не полная естественнонаучная классификация дает возможность разработки научно обоснованных прикладных классификаций по каждой выделенной группе технологи-

ческих методов. Это создает основу для разработки компактных алгоритмизированных систем выбора оптимальных методов обработки применительно к конкретным технологическим задачам и оптимизации учебной системы изучения этих методов в образовательных учреждениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие / Под ред. В. П. Смоленцева. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. — М.: Высшая школа, 1983. — 247 с.
2. Коваленко В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. — Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1975. — 236 с.
3. Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Рогачев И. С., Сосненко А. Б. Электроимпульсная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1967. - 295 с.
4. Носенко В. А., Даниленко М. В. Физико-химические методы обработки материалов: учеб. пособие. — Старый Оскол: ТНТ, 2012. - 196 с.
5. Подураев В. Н. Технологии физико-химической обработки. — М.: Машиностроение, 1986.
6. Поляков З. И., Исаков В. М., Исаков Д. В., Шамин В. Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие. — Челябинск: ЮУрГУ, 2006. — 89 с.
7. Ракитов А. И. Курс лекций по логике науки. – М., 1971.
8. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др.; под общ. ред. В. А. Волосатова. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. — 719 с.
9. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении : учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузьменко, В. Н. Крылов и др., под общей ред. В. Ф. Безъязычного. 2-е изд., доп. — М.: Машиностроение, 2007. — 539 с.
10. Технология конструкционных материалов. Учебник для вузов / Под ред. Ю. М. Барона. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.

Valeriy I. Nikiforov

CLASSIFICATION OF TECHNOLOGICAL METHODS FOR MACHINING PREFORMS

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

Results of development scientific classification of technological methods for machining performs are offered. Classification are founded on the common

principles of physic-chemical processes in the technological system. Demonstrated that knowledge system about technological methods for machining preforms from educational point of view are not correspond to scientific system of knowledge. This is the matter for corrections to the content of educational disciplines.

*Key words:*Machining technological methods, technological system, classification, basics of physic-chemical processes

REFERENCES

[1] Artamonov D.A. , Volkov U.S., Drozhalova V.I. Elektrofizicheskie i elektrochimicheskie metodi obrabotki materialov: ucheb. posobie / pod red. V.P.Smolentseva. T. 1. Obrabotka materialov s primeneniem instriumenta. – M.: Visshaia shkola, 1983. – 247 p (rus)

[2] Kovalenko V.S. Elektrofizicheskie i elektrochimicheskie metodi obrabotki materialov. – Kiev: Izdateliskoe odiedinenie «Vischa shkola», 1975. -236 p. (rus)

[3] Livshits A.L., Kravets A.G., Rogachev I.S., Sosnenko A.B. Elektroimpulisnaia obrabotka metallov. M.: Mashinostroenie, 1967. – 295 p. (rus)

[4] Nosenko V.A., Danilenko M.V. Fiziko-chimicheskie metodi obrabotki materialov.: uchebnoe posobie. – Starij Oskol: TNT, 2012. – 196 p. (rus)

[5] Poduraev V.N. Technologii fiziko-chimicheskoj obrabotki. – M: Maschinostroenie, 1986 (rus)

[6] Poliakov Z.I., Isakov V.M., Isakov D.V., Shamin V.J. Elektrofizicheskie i elektrochimicheskie metodi obrabotki: uchebnoe posobie. – Cheliabinsk: IjUrGU, 2006. – 89 p. (rus)

[7] Rakitov A.I/ Kurs lektsij po logike nauki. – M.:1971. (rus)

[8] Spravoxhnik po elektrofizicheskim i elektrochimicheskim metodam obrabotki // G.L.Amitan, I.A. Bajsupov, Ij.M. Baron I dr.; pod obsheij red. V.A. Volosatova. – L.: Maschinostrornie. Leningr. Otdelenie, 1988. – 719 p. (rus)

[9] Technologicheskie protsessi mechanicheskoij I fiziko-chimicheskoij obrabotki v aviadvigatelestroenii: ucheb. posobie / V.F/ beziazichnij, M.L. kuzimenko, V.N. Krilov I dr. , pod obsheij red. V.F. beziazichnogo. 2-e izd., dop. – M.: Maschinostroenie, 2007. – 539 p. (rus)

[10] Technologiya konstruktsionnich materialov: uchebnik / Pod red. IJ.M. Barona. – SPb.: Piter, 2012. – 512 p. (rus)

УДК 621.923.9

В.И. Новиков[1] , А. И. Фоломкин[2]

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ДЕТАЛИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ

[1]Виталий Иванович Новиков, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: vitalynewage@gmail.com

[2]Андрей Игоревич Фоломкин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: folomkin_ai@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных поверхностей. Установлено, что у вогнутых поверхностей снижение уровня шероховатости при ЭПП меньше, чем у выпуклых и плоских. Определены значения неравномерности параметра *Ra* в зависимости от типа поверхности. Даны рекомендации по назначению режимов электролитно-плазменного полирования для различных типов поверхностей.

Ключевые слова: Электролитно-плазменное полирование, газовая анодная оболочка, шероховатость поверхности, производительность.

Одним из перспективных методов значительного снижения шероховатостей поверхностей, ответственных деталей машин является электролитно-плазменное полирование обеспечивающее шероховатость поверхности до *Ra* =0.032 мкм [1, 2]. Многолетние эксперименты на кафедре “Технология конструкционных материалов и материаловедения” СПбГПУ, показали возможность эффективного применения этого метода для полирования различных токопроводящих, промышленных сплавов, включая такие труднообрабатываемые, как нержавеющие и жаропрочные стали, титановые сплавы, мягкие медные сплавы и т.д. [3, 4, 5, 6]. Достаточно высокая производительность электролитно-плазменного полирования, которая может достигать 30 деталей в час, зависит от требований к детали, марки обраба-

тываемого материала, площади обрабатываемой поверхности и режимов. Одним из существенных преимуществ данного метода является полное отсутствие внешней силовой нагрузки на обрабатываемую деталь, что дает возможность эффективно обрабатывать нежесткие ответственные детали без применения дополнительной оснастки или использования ручного труда [7]. Некоторые характеристики метода электролитно-плазменного полирования в сравнении с другими способами финишной обработки представлены в таблице 1 [8, 9, 10, 11]. Приведенные особенности метода электролитно-плазменного полирования предоставляют возможность эффективно обработать сложные поверхности деталей авиационной, космической и судовой техники, гидравлической аппаратуры и т.д.

Таблица 1

Сравнение различных методов полирования

	Механическое полирование	Химическое полирование	Электрохимическое полирование	ЭПП
Производитель-ность	6-20 мин	5-20мин	3-5мин	3-12 мин
Удельное давление	0.1-2.0 МПа	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют
Затраты на материалы	Высокие	Высокие	Высокие	Низкие
Сроки амортизации оборудования	25	5	20	25
Занимаемая производственная площадь	Малая	Средняя	Средняя	Средняя
Энергопотребление	Среднее	Низкое	Высокое	Высокое
Квалификация рабочих	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя

Проведенные эксперименты по полированию различных деталей показали, что шероховатость поверхности на различных участках деталей не однородна и зависит от степени кривизны поверхности и существенно определяется ее исходной шероховатостью. В связи, с чем для нормирования, назначения режимов и проектирования оборудования электролитно-плазменного полирования становится существенным вопрос о влиянии формы поверхности на ее шероховатость после ЭПП.

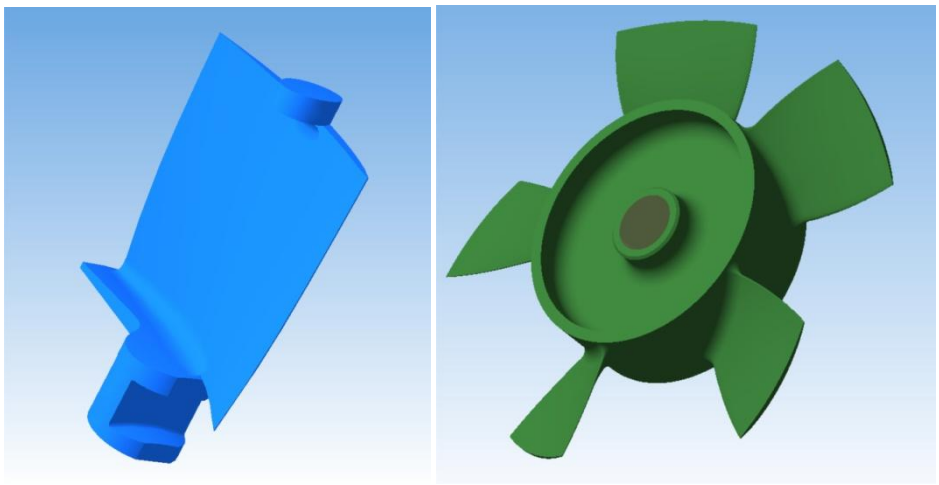
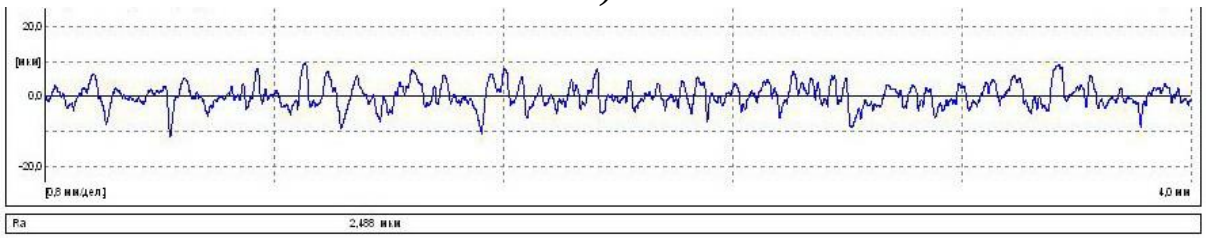


Рис. 1 Лопатка водомёта и рабочее колесо гребного винта

Влияние формы поверхности исследовалась на образцах из стали 15Х11МФ часто используемой для изготовления таких ответственных деталей как «лопатка водомёта» или «рабочее колесо» гребного винта (рис. 1). Сами образцы с выпуклыми и вогнутыми поверхностями, радиусом кривизны 10, 12, 70 мм имели различную исходную шероховатость поверхности от *Ra* = 0.5 до *Ra* = 3.2 мкм и выполнялись методом фрезерования на станке с ЧПУ. Электролитно-плазменное полирование всех образцов производилось в одном электролите представляющим собой водный раствор сернокислого натрия с концентрацией 0,2 моль/л и температурой 95°С. Необходимо отметить, что подогрев электролита до температур около 95°С необходим для формирования стабильной парогазовой оболочки вокруг детали, благодаря которой, возможно зажигание плазменной дуги между деталью и электролитом. Выбранные электрические режимы так же обеспечивали наиболее стабильное образование парогазовой оболочки и представляли собой следующие значения: рабочее напряжение 320 В, плотность тока 0,15 А/см^2. До и после полирования в течение 5 минут для каждого из образцов были записаны профилограммы (рис. 2) и определены основные параметры шероховатостей поверхностей с использованием прибора *MarSurf PS1*.

По полученным и обобщенным данным установлено, что у вогнутых поверхностей, при прочих равных условиях, снижение уровня шероховатости меньше, чем у выпуклых и плоских поверхностей (рис. 3). Кроме того установлено, что после электролитно-плазменного полирования различных поверхностей наблюдается разброс значений параметра *Ra*: для выпуклой поверхности разброс составляет от 0,01 до 0,02 мкм; для вогнутой поверхности от 0,02 до 0,03 мкм; для плоской поверхности от 0,01 до 0,02 мкм.

а)



б)

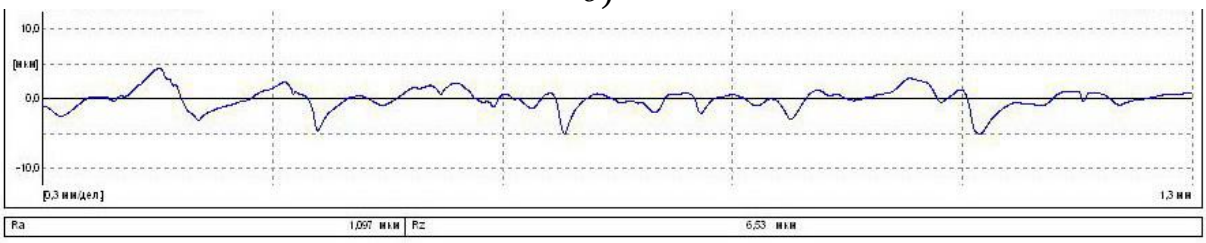
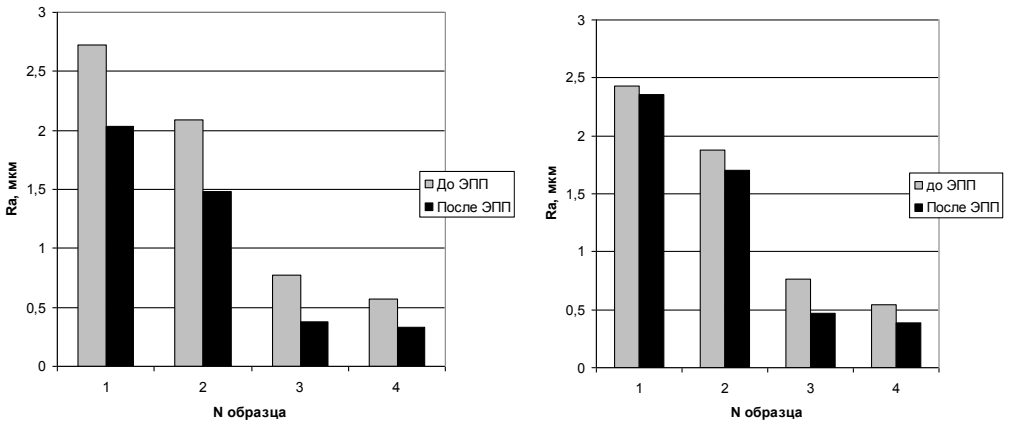


Рис. 2. Примеры профилограмм одного из образцов: *а*) до ЭПП; б) после ЭПП.



а) выпуклая поверхность *б*) вогнутая поверхность

Рис. 3. Значения параметра *Ra* для различных образцов

Неравномерность шероховатости поверхности в случае электролитно-плазменного полирования, можно объяснить неравномерностью толщины газовой анодной оболочки. Газовый анодный слой образовываться не одновременно по всей обрабатываемой поверхности, а вначале зарождается по краям, где напряженность электрического поля имеет наибольшее значение, и обработка происходит интенсивнее [12]. В дальнейшем газовая оболочка разрастается и охватывает всю обрабатываемую площадь, замыкая поверхность детали в газовый пузырь. В ходе экспериментов по ЭПП

поверхностей различной кривизны установлено, что образование газового слоя со стороны вогнутой поверхности не равномерно (рис. 4) из-за кавитационных явлений происходящих во время интенсивного теплообмена между газовой анодной оболочкой и электролитом.

а) *б*)

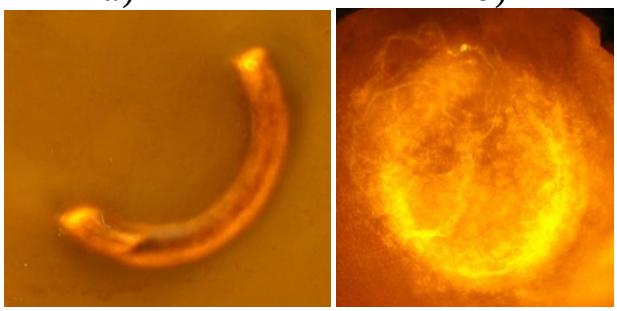


Рис. 4. Неравномерность газового анодного слоя на вогнутых поверхностях при различных силах тока.

При изменении плотности тока можно наблюдать аналогичную ситуацию, так при величине напряжения ниже критического уровня образование газовой анодной оболочки не происходи, а на детали идут процессы характерные для электрохимической обработки (рис. 5, *а*), при критическом значении напряжения на отдельных участках начинает зарождаться парогазовая оболочка (рис. 5, *б*), которая с увеличением напряжения начинает разрастаться (рис. 5, *в*, *г*, *д*) и при определенном значении напряжения (U = 320 В) равномерно распределяется по всей поверхности детали (рис. 5, *е*).

а) *б*) *в*) *г*) *д*) *е*)

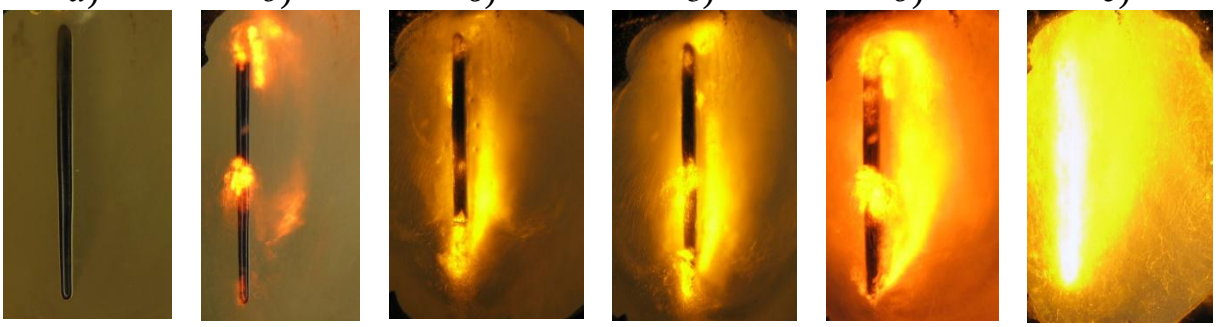


Рис. 5. Стадии образования газовой анодной оболочки (ГАО):
а) подача напряжения отсутствует; б)-д) рост и формирование газовой анодной оболочки; е) газовая анодная оболочка в стационарном режиме

Выводы.

– Уровень неравномерности шероховатости поверхностей деталей определяется равномерность и толщина газовой анодной оболочки.

– Равномерность газовой анодной оболочки зависит от того является ли поверхность выпуклой, вогнутой или плоской, определяется кривизной поверхности и силой тока при ЭПП.

– За 5 минут электролитно-плазменного полирования на выпуклой поверхности с радиусом кривизны R = 70мм шероховатость поверхности уменьшается на Ra = 0.5 мкм, вогнутой на Ra = 0.25 мкм.

– Для получения равномерной шероховатости поверхности по всей детали необходимо напряжение 320 В и более.

– Время на обработку вогнутых поверхностей должно быть 1.5…2 раза больше чем на полирование выпуклых и плоских поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский А.П., Кюбарсэп С.В., Ушомирская Л.А. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Металлообработка. – 2001. - № 4. – с. 29-31.
2. Саушкин, Б. П. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Б. П. Саушкин. М.: ООО «Дрофа». – 2002. – 655 с.
3. Ушомирская Л.А., Веселовский А.П., Головицкий А.П., Куминов С.Е. Особенности развития электрического разряда при электролитно-плазменном полировании // Металлообработка. – 2006. - № 4. – с. 13-15.
4. Ушомирская Л.А., Новиков В.И. Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении // Металлообработка : научно-производственный журнал. — СПб., 2008. — №1(43). — С. 22-24.
5. Ушомирская Л. А., Фоломкин А. И., Новиков В. И. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток // Металлообработка : научно-производственный журнал. — СПб., 2008 .— №4(46) .— С. 19-21.
6. Кириллов Н.Б., Васильков С.Д., Новиков В.И. Исследование влияния электролитно-плазменного полирования на качество поверхностного слоя изделий из легированных сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — СПб., 2010. — №2-2(100) : Наука и образование. — С.130-135.
7. Новиков В.И., Мурашкин С.Л., Фоломкин А.И. Технологические возможности чистовой обработки турбинных лопаток электролитно-плазменным методом // Научно-технические ведомости СПбГПУ .— СПб., 2012. — № 2-2 (147) : Наука и образование. — С. 105-108.
8. Попилов, Л.Я. Технология электрополирования металлов. М. – Л., Машгиз. – 1953. – 256 с.
9. Саушкин Б.П. Электрохимическая отделочная обработка материалов // Металлообработка. – 2001. - №1.

10. Амирханова Н.А., Хамзина А.Р. Элетрохимическое полирование жаропрочных никль-хромовых сплавов ХН45МВТЮБР и ХН50МВТЮБР. // Металлообработка. – 2006. - №5-6.
11. Амирханова Н.А., Ямилова А.Р., Серавкин В.Н., Филиппова М.А. Исследования высокоскоростного анодного растворения никель-хромового сплава ХН50ВМТЮБ для ЭХО сотовых уплотнений. // Металлообработка. – 2004. - №5.
12. Ушомирская Л.А., Новиков В.И., Фоломкин А.И. Формирование газовой анодной оболочки и ее влияние на возможности электролитно-плазменной обработки сложных поверхностей // Металлообработка : научно-производственный журнал. — СПб., 2012. — № 3 (69). — С. 11-14.

V.I. Novikov, A.I. Folomkin

INFLUENCE OF FORMS PART OF ITS SURFACE ROUGHNESS ON AFTER ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

We studied the problems of electrolytic-plasma polishing (EPP) complex surfaces. It was established that the concave surfaces with roughness reducing EPP less than convex and planar. Values were established unevenness parameter *Ra* depending on the type of surface. Recommendations intended modes of electrolytic-plasma polishing for different types of surfaces.

Keywords: electrolytic-plasma polishing, anode gas shell, the surface roughness performance.

REFERENCES

[1] Veselovski A.P., Kyubarsep S.V., Ushomirskaya L.A. Features electrolytic-plasma treatment of non-toxic metals in electrolytes // Metalloobrabotka. – 2001. – № 4. – p. 29-31. (rus.)
[2] Saushkin, B.P. Physicochemical treatment methods in the production of gas turbine engines / B.P. Saushkin. M.: OOO «Drofa». – 2002. – 655 p. (rus.)
[3] Ushomirskaya L.A., Veselovski A.P., Golovitski A.P., Kuminov S.E. Features of development of electric discharge in electrolytic-plasma polishing // Metalloobrabotka. – 2006. – № 4. – p. 13-15. (rus.)
[4] Ushomirskaya L.A., Novikov V.I. Polishing alloyed steels in non-toxic electrolyte at high voltage. // Metalloobrabotka : research and production journal. — СПб., 2008. — №1(43). — p. 22-24 : pic. —

(Electrophysical and electrochemical processing methods). — ISSN 1684-6702 .— Bibl.: p. 24 (5 titles.). (rus.)
[5] Ushomirskaya L.A., Folomkin A.I., Novikov V.I. Features finishing turbine blades // Metalloobrabotka : research and production journal. — SPb., 2008 .— №4(46) .— p. 19-21 : pic. — (Electrophysical and electrochemical processing methods) .— ISSN 1684-6702. — Bibl.: p. 21 (5 titles.). (rus.)
[6] Kirillov N.B., Vasilkov S.D., Novikov V.I. The influence of electrolytic-plasma polishing on the quality of the surface layer of products from alloy steels. // The St. Petersburg State Polytechnical University Journal. — SPb., 2010. — №2-2(100) : Science and Education. — p.130-135. — (Materials science. Processing of metals). — ISSN 1994-2354. (rus.)
[7] Novikov V.I., Murashkin S.L., Folomkin A.I. Technological capabilities finishing turbine blades electrolytic-plasma method // The St. Petersburg State Polytechnical University Journal.— SPb., 2012. — № 2-2 (147) : Science and Education. — p. 105-108 : pic. — (Engineering). — ISSN 1994-2354. — Bibl.: p. 108 (4 titles.). (rus.)
[8] Popilovв L.Y. Technology electropolishing metals. M. – L., Mashgiz. – 1953. – 256 p. (rus.)
[9] Saushkin B.P. The Electrochemical Finishing materials // Metalloobrabotka. – 2001. - №1. (rus.)
[10] Amirhanova N.A., Hamzina A.R. The Electrochemical polishing heatproof Nickle-chromium alloys HN45MVTYUBR and HN50MVTYUBR. // Metalloobrabotka. – 2006. – №5-6. (rus.)
[11] Amirhanova N.A., Yamilova A.R., Seravkin V.N., Filippova M.A. Studies of high anodic dissolution of nickel-chromium alloy HN50MVTYUBR for electro-chemical treatment of cellular seals. // Metalloobrabotka. – 2004. – №5. (rus.)
[12] Ushomirskaya L.A., Novikov V.I., Folomkin A.I. Formation of the anode gas shell and its effect on the ability of electrolytic plasma processing of complex surfaces // Metalloobrabotka : research and production journal. — SPb., 2012. — № 3 (69). — p. 11-14 : pic. — (Electrophysical and electrochemical processing methods) .— ISSN 1684-6702 .— Bibl.: p. 14. (rus.)

УДК 621.378

А. П. Петкова [1], О. Ю. Ганзуленко[2]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАРКИРОВКИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ

[1] Ани Петрова Петкова, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:+7-921-336-87-73, E-mail: apetkova@inbox.ru

[2]Ганзуленко Оксана Юрьевна, старший преподаватель
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:+7-921-398-33-67, E-mail: oxana_ganza@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена некоторым аспектам технологии лазерной маркировки деталей машиностроения. Рассматривается локальное воздействие зоны влияния импульса лазерного луча на поверхность металических материалов. Приведены результаты, описывающие влияние технологических параметров импульсного лазера на качество маркируемого изображения. Представлены примеры маркировки с использованием штрихкодов на нескольких материалахдля деталей машиностроения при подобранных режимах технологической установки.

Ключевые слова: штрихкод, лазерная маркировка, импульсный лазер, оксидный слой, технологические параметры, диаметр отпечатка.

Лазерная маркировка металлической продукции изделий машиностроения и автомобилестроения может применяться для хранения информации об изделии и его индентификации на протяжении всего его жизненного цикла [1]. Именно маркировка деталей впоследствии позволяет безошибочно определить, например, допустимость установки определенного узла в ту или иную систему.

Одним из способов маркировки деталей является применение штрихового кодирования. В настоящее время используется огромное количество символик. Наиболее распространенными из одномерных

считается EAN13 (рис. 1, а), из двумерных – UCC/EAN-128 и PDF417 (рис. 1, б, в).

а б в

Рис. 1. Основные типы штрих-кодов, используемые для маркировки продукции: линейный *EAN*-13 (а), двумерный *UCC/EAN-128* (б) иматричный *PDF*-417 (в)

Применяемые сейчас способы защиты и идентификации готовой продукции, такие как голограммы, штрих-коды, микронадписи и др. не позволяют кардинально решить данную проблему, т.к. они наносятся на промежуточные носители информации (бумага, пластик и др.), а не непосредственно на само изделие. Соответственно они могут быть относительно легко подделаны и утеряны при эксплуатации изделий. В тех же случаях, когда метки наносятся на само изделие, применяемые методы достаточно сильно деформируют поверхность деталей (метод «питов», метод «лазерной насечки») и, самое главное, не позволяют записать большой объем информации об изделии. Прямое, непосредственное штрих-кодирование, особенно металлических и полимерных изделий, как правило, не применяется.

Нанесение штрихкодов, в том числе и двухмерных высокоплотных штрих-кодов, с применением импульсного лазера непосредственно на поверхность изделия позволяет не только защищать последние от подделок, но и размещать на самом изделии нужную информацию с характеристикой условий его изготовления, хранения и эксплуатации. Такой способ маркировки практически не деформирует поверхность изделия и обеспечивает сохранность маркировки на протяжении всего срока службы, в том числе и при воздействии агрессивных сред и повышенных температур.

При воздействии лазерного луча на металлы и неметаллические материалы происходит нагрев с возможным оплавлением и (или) частичным испарением поверхности материала (рис. 2) [2, 3]. Это приводит к появлению следа (отпечатка) на участке воздействия лазерного луча. Таким образом, перемещая луч относительно поверхности образца, можно получить на поверхности то или иное видимое изображение в виде цифр, букв, знаков или рисунков.

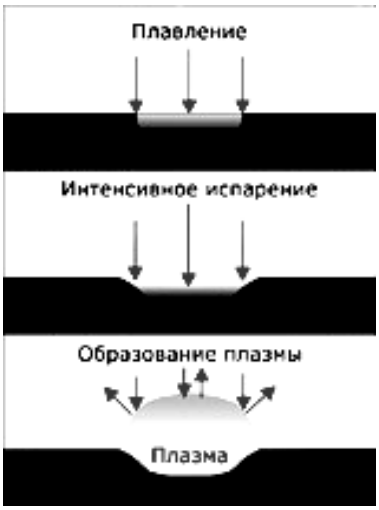


Рис. 2. Процессы, происходящие при взаимодействия лазерного излучения с веществом при лазерной маркировке

В случае маркировки металлических изделий импульсным волоконным лазером происходит только оплавление и интенсивный нагрев поверхности металла с последующим окислением. Это приводит к появлению следа (отпечатка) на участке воздействия лазерного луча. Специфика лазерного окисления заключается в том, что химическая реакция происходит под действием теплового источника переменной мощности (из-за зависимости поглощающей способности от толщины оксидной пленки, ее состава, температуры мишени) в неизотермических условиях [4-6].

Исследования проводились на прецизионном лазерном прецизионном маркировочном комплексе (ПЛМК) Д'Марк-06. Его основные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики ПЛМК Д'Марк-06на базе твердотельного лазера Nd:YAG с диодной накачкой

Общие характеристики	
Размер зоны обработки	100x100 мм
Скорость обработки	от 1 до 2500 мм/сек
Ширина линии с автоматическим заполнением	0…3 мм
Тип шрифта	TrueType, векторные
Тип выводимых изображений	векторные, растровые
Потребляемая мощность (~220 В, 50 Гц)	не более 1200 Вт
Параметры лазерного излучателя	
Тип лазера	Nd:YAG
Длительность импульсов излучения	40 нс
Частота повторения импульсов	0,1 - 100 кГц
Средняя мощность при частоте повторения импульсов излучения (10 кГц)	6 Вт (TEMoo)
Диаметр пучка излучения	80-100 мкм
Масса излучателя	2,4 кг

В качестве варьируемых технологических параметров лазерного комплекса использовались следующие:

- ток накачки диодной линейки I, диапазон изменения 7…18 А,
- частота следования импульсов F, диапазон изменения 0,3…90 кГц,
- скорость маркировки V, диапазон изменения $3*10^{-3}$…1 м/с.

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что отпечаток воздействия луча лазера имеет вид, представленный на рис. 3. Отпечаток лазерного импульса имеет овальную форму в виде оплавленного участка поверхности образца. Вокруг отпечатка виден некоторый ореол, который может рассматриваться как зона термического влияния.

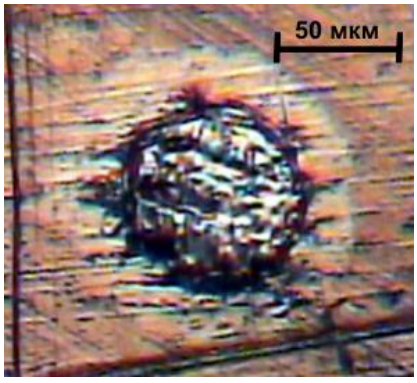


Рис. 3. Вид отпечатка лазерного импульса (сталь 08Х18Н10Т)

При изменении технологических параметров лазерной установки происходит изменение геометрических характеристик отпечатков, формируемых под воздействием излучения на металлической поверхности (рис. 4).

Формирование изображения на металлической поверхности лазерным излучением осуществляется следующим образом. Изображение разбивается управляющей ПЛМК программой на параллельные отрезки следования включенного лазерного луча. При перемещении от отрезка к отрезку лазер находится в выключенном состоянии. Таким образом, одна строка по габаритным размерам изображения может содержать несколько отрезков, на которых формируется оксидная пленка.

Перед включением излучения происходит позиционирование лазерного луча в начальные координаты формируемого отрезка. Затем производится непрерывное воздействие импульсами с заданной частотой и одновременным перемещением луча до окончания отрезка. Перед сменой позиционирования в начало следующего отрезка, лазерное излучение отключается. Таким образом, происходит постепенное заполнение обрабатываемой площади.

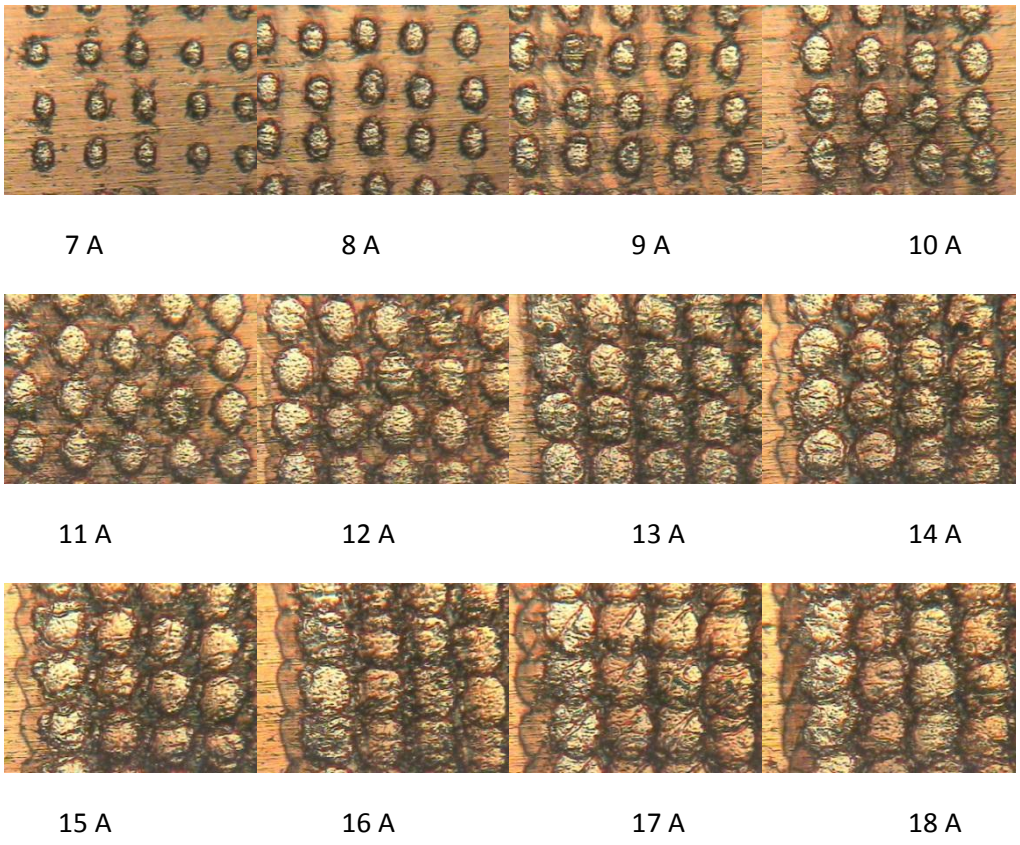


Рис. 4. Вид отпечатков импульсов при различных токах накачки (сталь 08Х18Н10Т)

Энергия первого импульса по данным разработчиков лазерного комплекса примерно в 1,5 раза превышает последующие импульсы, что отчетливо видно на фотографии, представленной на рисунке 5. Отпечаток первого импульса имеет площадь, существенно превышающую площади последующих отпечатков.

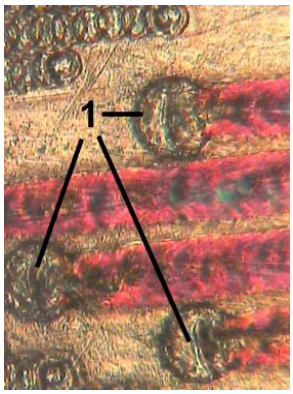


Рис. 5. Изображение начала формируемого отрезка изображения (1 – отпечаток первого импульса)

Наращивание оксидной структуры с заданными свойствами в значительной мере определяется расстоянием между импульсами. Эта технологическая характеристика позволяет регулировать избыточное тепло, возникающее в результате импульсного воздействия, что в конечном итоге и определяет характеристики образующихся оксидных систем [7].

В исследованиях [8] было экспериментально установлено, что для получения цвета, отличного от цвета металла и видимого глазом, минимальный размер строки должен составлять приблизительно два отпечатка луча лазера, т.е. размер пикселя по оси *x* должен быть не менее 2*D*, где *D* – диаметр отпечатка луча лазера. Это соотношение также обусловлено тем, что при формировании следующей строки другим цветом рядом с предыдущей, нагрев от первого импульса может привести к искажению цвета последнего импульса первой строки.

Разрешение в лазерном комплексе, таким образом, означает количество линий по вертикали, то есть линиатуру (величина *lpi*). Линиатура, определяющая количество строк в 1 мм изображения вдоль оси *y*, вычисляется из соотношения *lpi*=*R*/25,4, где *R* – разрешение компьютерного изображения. Например, для *R*=508 *lpi*=20, т.е. в одном миллиметре по вертикали будет сформировано 20 строк. От правильно выбранной линиатуры зависит как качество изображения, так и общее восприятие цвета. Очевидно, что линиатура зависит от диаметра отпечатка. На рис. 6 показано, как используется линиатура при различных параметрах настройки разрешения в лазерном комплексе. Для вывода изображения на металле лазерным комплексом пиксель изображения должен соответствовать как по оси x, так и по оси y двум диаметрам отпечатка, т. е. *dpi*=25,4/2*D*, *lpi*=1/2*D*.

Очевидно, что это условие диктует требования к техническим характеристикам лазерного комплекса, и в первую очередь к диаметру луча. Чем меньше диаметр луча, тем меньше диаметр его отпечатка на обрабатываемой поверхности и тем выше качество формируемого изображения.

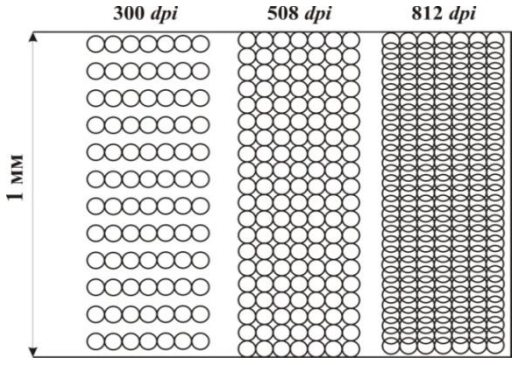


Рис. 6. Линиатура при различных параметрах настройки разрешения

Лазерный маркирующий комплекс, используемый в эксперименте, позволяет реализовать векторный (контурный) и растровый способы маркировки. Растровый режим маркировки позволяет построчно заполнять маркируемую область (изображение) точками - пикселями. Лазер воспринимает растровую графику в градации серого цвета, преобразуя цветную картинку в черно-белую с полутонами. Черные точки изображения гравируются на полной мощности, белые не гравируются, а серые – с тем большей мощностью, чем темнее точка. Растровый режим маркировки цветных логотипов предприятия может использоваться для металлических изделий, при этом количество цветов должно быть минимально необходимым для его полноцветного восприятия. Для гравировки силуэтных изображений логотипов можно использовать растровый черно-белый режим без наслоений одного цвета на другой как для металлических, так и полимерных материалов.

Диаметр отпечатка на металлической поверхности определялся в зависимости от тока накачки диодной линейки в соответствии с данными [8]. Исходя из размера диаметра отпечатка, рассчитывалось количество линий, необходимое для формирования на металлической поверхности линии, соответствующей ширине одного модуля (0,33 мм). Штрих шириной 1 мм состоит из трех таких модулей. Общее количество линий, приходящихся на 1 мм пикселя маркируемого штрих-кода, составит N_L, равное произведению количества модулей на количество линий в одном модуле. Таким образом, основываясь на значениях диаметра отпечатка, по таблице 2 выбиралось разрешение в dpi, с которым было подготовлено изображение наносимого штрих-кода.

Таблица 2

Размеры пикселя в зависимости от разрешения изображения

dpi	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
мкм	254	127	85	64	51	42	36	32	28	25	23	21

Для обеспечения уверенного считывания штрих-кода необходимо создавать штрихи, которые будут контрастировать с поверхностью металла по цвету, а если это невозможно, поле штрих-кода обрабатывается режимом, обеспечивающим контрастный цвет по отношению к цвету штрих-кода. Цветовые сочетания штрихкодов, считываемые и не считываемые сканером, приведены в таблице 3: цветовые сочетания, считываемые сканером; считываются при определенных условиях; не считываются при определенных условиях; цветовые сочетания, не считываемые сканером.

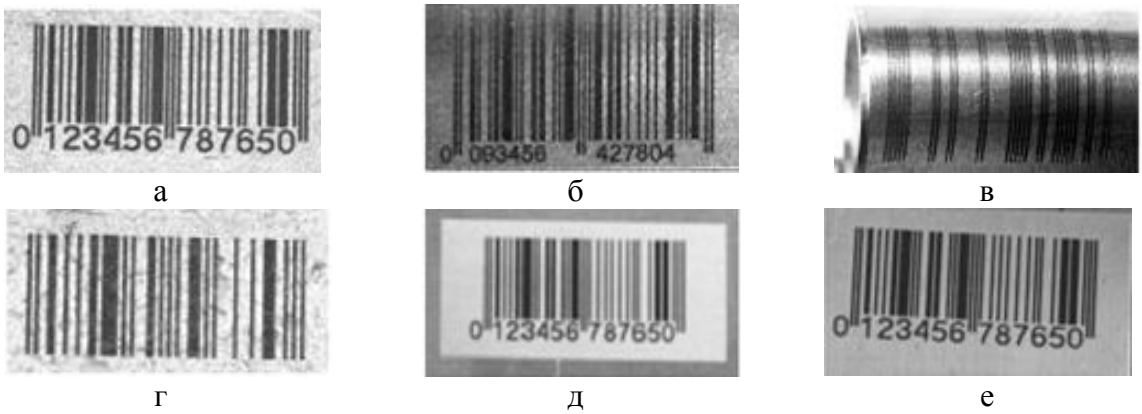
Результаты экспериментального формирования штрихкодов представлены на рис. 7. Следует отметить, что для полированных образцов (рис. 7, д) использовался дополнительный режим для создания контрастного фона. Этот режим заключается создании на поверхности

сплава участка светлой матовой основы в области нанесения собственно самого штрих-кода с целью увеличения контрастности. Возможные цветовые оттенки штрихкодов определяются свойствами оксидов, создаваемых лазерным излучением на поверхности обрабатываемых материалов [9]. Критерием качества нанесенного штрих-кода принято считать его считывание сканером с первого раза [10].

Таблица 3

Цветовые сочетания штриховых кодов

считываемые сканером	синий	коричневый	черный	зеленый
	на белом			
	на желтом			
	на оранжевом			
считываемые при определенных условиях	синий	коричневый	черный	зеленый
	на красном			
не считываемые при определенных условиях	черный на ярко-зеленом	черный на бледно-зеленом	черный на синем	черный на коричневом
не считываемые сканером	красный на ярко-зеленом	красный на синем	черный на золотом	оранжевый на золотом
	красный на золотом	красный на светло-коричневом	синий на бледно-зеленом	желтый на белом
	красный на белом	светло-коричневый на белом	золотой на белом	оранжевый на белом



а б в

г д е

Рис. 7. Изображения образцов со штрих-кодом: а – ВТ1-0; б – 08Х18Н10Т; в – цирконий; г - силумин; д – 12Х17; е - латунь Л63.

В результате исследования были подобраны специальные технологические режимы обработки металлических и полимерных материалов, с помощью которых были сформированы изображения штрих-кодов, нанесенные на поверхности образцов материалов, широко применяющихся в машиностроении. Используя вариации различных технологических параметров установки были отобраны режимы, позволяющие наносить штрихкоды на поверхности такого качества и контрастности, чтобы они считывались стандартным сканером с первого раза. Применение такого вида маркировки обепечивает сохранность необходимой информации о детали на протяжении всего срока ее эксплуатаци.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиулин А. Лазерная маркировка материалов / Валиулин А., Горный С., Гречко Ю., Патров М., Юдин К., Юревич В. // Фотоника. - 2007. – №3. – С. 16-22.
2. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И.; под ред. А.Г. Григорьянца – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 – 664 с.
3. Прибытков Д.М. Лазерно-термическое окисление тонких пленок титана / Прибытков Д.М., Ховив Д.А. // Рост монокристаллов и тепломассоперенос ICSC–2005: 6-я междунар. конф : сб.тр. – Обнинск, 2005. – Т.1. – С. 150–153.
4. Темлянцев Н.В. Исследование окисления среднеуглеродистых сталей при нагреве в воздушной атмосфере / Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В. // Металлургия: реорганизация, управление, инновации, качество: Труды Всероссийской научно-практической конференции / СибГИУ. – Новокузнецк, 2003. – С. 61–63.
5. Ларионова Е.В., Пряхин Е.И., Ганзуленко О.Ю. Особенности окисления некоторых металлических материалов при декорировании с применением лазерных технологий / Дизайн. Материалы. Технология.: СПбГУТД, 2011. Вып. 2(17), с. 67-70.
6. Войтович Р.Ф. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов: Справочник / Войтович Р.Ф., Головко Э.И.; под ред. Францевича И. Н. – Киев: Наукова думка, 1980. – 295 с.
7. Ларионова Е.В., Пряхин Е. И., Ганзуленко О.Ю. Физико-химические аспекты формирования цветовых оттенков под воздействием лазерного излучения при декорировании металлических изделий /Дизайн. Материалы. Технология.: СПбГУТД, 2010. Вып. 2(13) – с. 52-55.

8. Афонькин М.Г. Формирование цветных структур на поверхности металла лазерным излучением: монография / М.Г, Афонькин, Е.В. Ларионова. – Спб.: изд. СЗТУ, 2010. – 205с.: ил.
9. Козаков А.Т., Яресько С.И. Исследование методом оже-спектроскопии состава поверхности многокомпонентных сплавов при импульсном лазерном воздействии. / Физика и химия обработки материалов. 2010, №3, с. 67-73.
10. Прямицын И.Б., Челпанов И.Б. Лазерные сканирующие устройства. методы и методики исследования характеристик. области применения. // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. наука и образование» / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - С. 631-644.

Petkova A. P.[1], Ganzulenko O.Y.[2]

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MARKING ENGINEERING PRODUCTS USING A PRECISION PULSED LASER

[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia,
[2]National Mineral Resources University (Mining University),
St. Petersburg, Russia

Abstract

The article is devoted to some aspects of laser marking technology for machine parts. We consider the local impact zone effect of the pulse laser beam on the surface of metal materials. The results describing the influence of process parameters on the quality of the being marked imagesby pulsed laser are submitted. The examples of using barcode marking on several materials for machine parts in selected technological modes of installation are given.

*Keywords***:** barcode, laser marking, laser pulse, the oxide layer, the process parameters, the diameter of the impression.

REFERENCES

[1] Valiulin A. Laser material marking / Valiulin A., Gorniy S., Grechko Yu., Patrov M., Yudin K., Yurevich V.// Photonics. - 2007. - № 3. - pp. 16-22. (rus.)
[2] Grigor'yants, A.G. Technological processes of laser treatment / Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I.; ed. Grigoryants A.G. - Moscow: Publishing House of the Bauman MSTU, 2006 – 664 p. (rus.)
[3] Pribitkov D.M. Laser-thermal oxidation of thin titanium films / Pribitkov D.M., Khoviv D.A. // Growth of single crystals and heat

mass transfer ICSC- 2005: Materials of the 6th Intern. Conf.: - Obninsk, 2005 . - Vol.1 . - pp. 150-153. (rus.)
[4] Temlyantsev N.V. Investigation of medium-carbon steels oxidation during heating in air / Temlyantsev N.V., Temlyantsev M.V. // Metallurgy: reorganization, management, innovation, quality: Materials of the All-Russian scientific-practical conference / SibSIU. - Novokuznetsk, 2003 - pp. 61-63. (rus.)
[5] Larionova E.V., Priakhin E.I., Ganzulenko O.Y. Oxidation features of several metallic materials by decorating with laser technologies application / Design. Materials. Technology. : SPbSUTD – 2011, issue 2 (17), pp. 67-70. (rus.)
[6] Vojtowich R.F. High-temperature oxidation of metals and alloys: directory / Voytovich R.F., Golovko E.I.; ed. Frantsevich I.N. - Kiev: Naukova Dumka, 1980 – 295 p. (rus.)
[7] Larionova E.V., Priakhin E.I., Ganzulenko O.Y. Physicochemical aspects of colored hues forming under the radiation laser influence when metal materials decorating / Design. Materials. Technology. : SPbSUTD – 2010, issue 2 (13), pp. 52-55. (rus.)
[8] Afon'kin M.G. Formation of colored structures on a metal surface by laser radiation: monograph / M.G. Afon'kin, E.V. Larionova. – St. Petersburg: publishing house NWTU, 2010. – 205 p. (rus.)
[9] Kozakov A.T., Yaresko S.I. AES investigation of the surface composition of multicomponent alloys after pulsed laser irradiation / Physics and Chemistry of Materials Treatment. 2010, issue № 3, pp. 67-73. (rus.)
[10] Pryamitsyn I.B., Chelpanov I.B. Laser scanning devices. Methods and procedures of characteristics research. Applications. // Materials of the 2nd International scientific-practical conference "Modern engineering. Science and Education" / St.Petersburg Publisher Polytechnical University Press, 2012. – pp. 631-644. (rus.)

УДК 621.17

А.И. Попова[1], А.И Попов[2], М. И. Тюхтяев[3], В.С. Медко[4]

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УЗК – КОНТРОЛЯ

[1]Алла Ивановна Попова, к.э.н., СПб ГБУ «Центр развития и поддержки предпринимательства», Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 372-52-80 (доб. 2581).,
E-mail: aipopoffa@rambler.ru

[2]Александр Иннокентьевич Попов, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: aipopoff@rambler.ru

[3]Михаил Иванович Тюхтяев, к.т.н ОАО «Силовые машины» «Ленинградский металлический завод»
Россия, Санкт-Петербург, Тел.: (812) 363-34-10 (доб. 4-7310),
E-mail: Tyukhtyaev_MI@lmz.power-m.ru

[4]Владимир Семенович Медко, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: mmftkm@eandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы управления жизненным циклом лопаток паровых турбин. Проведен анализ возникающих дефектов по всему жизненному циклу лопаток. Показано, что управление жизненным циклом лопаток возможно за счет снижения числа дефектов возникающих на каждом его этапе и выявляемых ультразвуковым эхо - методом. Определены точки контроля для управляющего воздействия и предложены механизмы их реализации. В том числе за счет применения контроля лопаток в турбине через криволинейную поверхность галтели с помощью иммерсионно - жесткой призмы.

Ключевые слова: жизненный цикл, турбинная лопатка, фрезерование, ультразвуковой контроль, дефекты коррозионных и теплостойких сталей. иммерсионно –жесткая призма

Членство России во всемирной торговой организации значительно усиливает конкуренцию со стороны зарубежных энергетических компа-

ний в тендерах по государственным программам производства и ремонта энергетического оборудования для отечественной промышленности.

Возрастание требований, предъявляемых заказчиками к качеству и надежности продукции паровых турбин для тепловых и атомных электростанций требует системного управления процессами жизненного цикла (ЖЦ) изделия, что позволит выявить уязвимые места и вывести процессы на новый уровень[1].

Важнейшим инструментом управлением ЖЦ изделия является формирование и внедрение единых сквозных операционных процедур контроля для критичных групп деталей, включающих в себя алгоритм, описание, визуализацию, необходимый и достаточный объем контроля от момента изучения рынка до принятия решения об утилизации продукции.

Наиболее характерным примером контроля, наряду с капиллярными[2], и магнитопорошковыми методами[3], является применение ультразвукового (УЗ) контроля, обеспечивающего жизненный цикл лопаток паровых турбин. Несмотря на определенные трудности, по расшифровке импульсов от дефектов, метод обладает значительно меньшей стоимостью, по сравнению с рентгеновским, безопасностью для персонала, более высокой чувствительностью к выявлению дефектов расположенных под углом, к тому же использует достаточно миниатюрные датчики для контроля между лопатками турбины.

Целью данной работы является анализ возможности управления жизненным циклом продукции, за счет снижения числа дефектов в объеме металла рабочих лопаток паровых турбин на каждом его этапе. Задачами работы являются: анализ дефектов по всему ЖЦ изделия, анализ влияния применяемого УЗ -контроля на жизненный цикл, разработка управляющих воздействий по снижению числа дефектов в хвостовиках лопаток в ЖЦ изделия.

Анализ выхода из строя роторов турбин показывает, что на долю рабочих лопаток приходится до 46,8% различных повреждений, причем обрывы лопаток и трещины в лопатках составляют соответственно 65,4% и 11.5% [4].

Это связано с многочисленными дефектами материала лопаток, возникающими на основных этапах жизненного цикла. Среди факторов оказывающих влияние на наличие и развитие дефектов необходимо отметить пять основных: экономический, человеческий, логистический, эксплуатационный и технологический.

К экономическому фактору следует отнести затраты на производство и как следствие на приобретение металла заданного уровня качества.

Человеческий фактор определяется соблюдением технологической дисциплины, оперативностью и своевременностью принятия управленческих решений, подготовленностью персонала, применением сертифицированного и поверенного оборудования.

К логистическому фактору относятся дефекты возникающие при длительном хранении лопаток, турбин и их транспортировке.

Эксплуатационный фактор определяет дефекты, возникающие в процессе эксплуатации турбины, в процессе которой в материалах лопаток возникают значительные нагрузки, формирующие нарушение внутренней и поверхностной структуры металла из-за циклического подвода энергии к дефектным зонам, приводящие к выходу их из строя.

Технологическим фактором определяются дефекты, формирующихся в заготовках и лопатках в ходе технологических операций и переходов при металлургических переделах сталей и сплавов, а также дальнейшей механической обработки [5].

Среди технологических дефектов, возникающих в металлургическом цикле прокатанного и кованного металла нержавеющих, жаропрочных, коррозионно - стойких сталей, относящихся к мартенситному, мартенситно -ферритному и аустенитных классам, а также жаропрочных сплавов на никелевой основе и титановых сплавов можно выделить следующие:

- поверхностные и объемные дефекты, поры, волосовины, различные включения, несплошности, неоднородная структура, трещины, расслоения, заковы, закаты, а также нарушение исходных геометрических размеров.

В целом данные дефекты являются первоосновой и центрами зарождения и увеличения несоответствий структуры[6], развивающихся впоследствии и выявляющихся в процессе эксплуатации лопаток. Поэтому применение метода УЗ - контроля в совокупности с другими видами в большей степени направлены на выявление, как самих этих дефектов, так и результатов их внутреннего развития. Основные группы дефектов жизненного цикла турбинных лопаток приведены в таблице.

Управление ЖЦ лопаток паровых турбин начинается с маркетинга и предложения на рынок продукции с заранее заложенными конкурентными преимуществами (рис. 1). Вторым этапом предусматривается разработка требований, обеспечивающих КПД и работоспособность турбинных лопаток за счет создания оптимальной геометрии, прочностных расчетов, выбора материала, испытаний на циклическую прочность. Следующим этапом управления предусматривается подготовка и разработка документированных процессов, минимизирующих возникновение в продукции дефектов за счет применения заданных техпроцессов и операций контроля. Разработка требований к поставщикам металла учитывает технические условия на оговоренные в контрактах на поставку металла нормы внутренних дефектов соответствующих дефектам от ø1 - ø3мм. Важнейшим объектом управления являются производственные циклы, в которых возможно как исчезновение полученных раньше дефектов, так и возникновение новых, способных существенно влиять, на работоспособность изделия. Проверкой правильности заложенных конструкторских, технологических,

контрольных процессов являются динамические стендовые испытания ротора турбины, выявляющие возникающие несоответствия.

Таблица

Анализ дефектов возникающих в изделии «лопатка» на разных этапах жизненного цикла

<table>
<tr><td colspan="6">Этапы жизненного цикла</td></tr>
<tr><td colspan="4">Производственные циклы формообразования лопаток</td><td rowspan="2">Упаковка и хранение, транспортировка</td><td rowspan="2">Эксплуатационный цикл</td></tr>
<tr><td colspan="3">Металлургический производственный цикл</td><td>Обрабатывающий производственный цикл</td></tr>
<tr><td colspan="3">Горячая обработка</td><td>Холодная обработка</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Прокатка, ковка профиля</td><td rowspan="2">Радиальная ковка, штамповка, горячее прессование, ковка</td><td rowspan="2">Термообработка</td><td colspan="2">Обработка резанием</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td>Фрезерование, сверление</td><td>Шлифование</td></tr>
<tr><td>Структурная неоднородность несплошности Ликвации Пористость Закаты Волосовины Расслоения Плены Поперечные трещины (титан)[7]</td><td>Заковы, Трещины Заковы Холодные трещины Инородные включения Трещины Изменение структуры</td><td>Горячие окисленные трещины Холодные трещины Изменение структуры</td><td>Задиры, надрывы</td><td>Микро трещины Изменение геометрических параметров</td><td>Риски Царапины, Коррозия Забоины Вмятины Надиры Местный наклеп</td><td>Усталостные аксиальные и тангентальные трещины Риски Царапины Капельная Эрозионный износ входных и выходных кромок Коррозия</td></tr>
</table>

Не менее важными этапами являются транспортирование и поставка турбины или только комплектов лопаток на станцию.

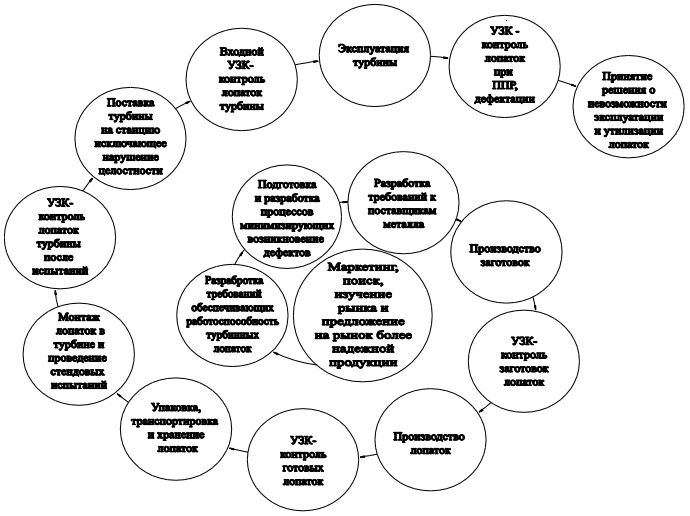


Рис. 1. Схема жизненного цикла турбинных лопаток с применением УЗ - контроля

Данные этапы характеризуются возможными нарушениями целостности поверхности лопаток, что снижает их работоспособность. Важнейшим и главным этапом является период эксплуатации и остановов турбины для ремонта. На этом этапе проверяются все несоответствия предыдущего периода, заложенные в конструкторских, технологических, контрольных этапах и сформированных или отсутствующих надежных операционных процедурах, обеспечивающих ЖЦ продукции.

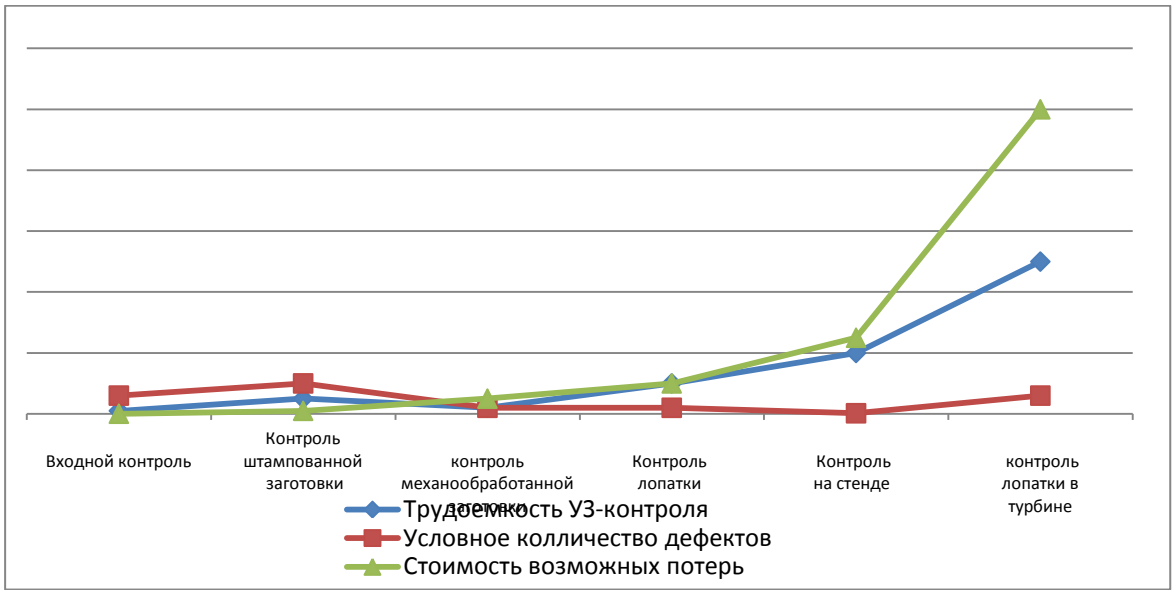


Рис. 2. График зависимости УЗ-контроля в процессе ЖЦ на переменные величины в относительных единицах
а) трудоемкость контроля; б) условное количество дефектов;
в) стоимость возможных потерь

Проведенный анализ влияния ультразвукового контроля на ЖЦ (рис. 2) показывает, что с увеличением готовности лопатки к эксплуатации трудоемкость контроля возрастает, при этом условное количество дефектов носит переменный характер, возрастая на этапе контроля в области металлургических переделов и затем в период эксплуатации. При этом оценка стоимости потенциальных потерь от выхода из строя лопаток постоянно увеличивается, принимая вид экспоненты на этапе эксплуатации турбины. Анализ показывает, что в процессе эксплуатационного контроля контролируется практически весь объем лопаточного аппарата, за исключением зоны хвостовиков. Это связано, прежде всего, с наличием развитой геометрии турбинной лопатки, и ближайшим расположением к ней соседних лопаток. Без фактической разборки ступени очень трудно диагностировать дефекты, расположенные в зоне хвостовика турбины (рис. 3).

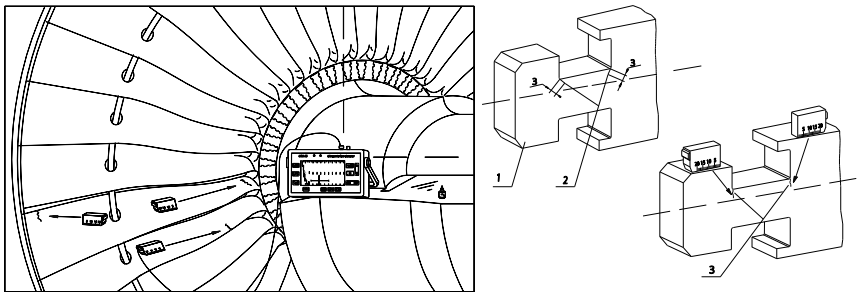


Рис. 3.Проведение УЗ-контроля лопаточного аппарата
а) для турбины в сборе; б) при разборке турбины

Поэтому управляющие воздействие необходимо для двух точек процесса: на этапе производства и этапе контроля.

Отмечено, что этап производства характеризуется отсутствием операций УЗ-контроля в зоне хвостовика лопатки после нескольких металлургических переделов. Очевидно, что постоянно перенастраиваемые (до 120 раз в год - количество типоразмеров лопаток для лидеров отрасли) металлургические переделы (ротационная ковка, штамповка и встроенные в эти процессы операции термообработки) не могут обеспечить равное количество дефектов с отработанным процессом прокатки круглого профиля, при этом имеющие 100% УЗ - контроль. Поэтому на этапе производства необходимо предусмотреть УЗ - контроль для механически обработанного хвостовика лопатки до момента нарезки зубьев хвостовика. Управляющие воздействие данным процессом позволит снизить количество критических дефектов, как на этапе производственного, а следовательно в дальнейшем и эксплуатационного циклов.

Вторым важным воздействием на эксплуатационный цикл предлагается оценка возможностей контроля хвостовика лопаток с Т-образным хвостовиком, установленных в турбине. Возникающие в процессе фрезерования глубокие риски на этапах приработки инструмента и надрывы поверхностного слоя в зоне катастрофического износа инструмента приводят к формированию микродефектов поверхностного слоя и возможному развитию усталостных трещин (рис.3.) в процессе эксплуатации в зоне малого радиуса для галтельных переходов. Наличие усталостных трещин в этой зоне для лопаток в эксплуатационном цикле турбины приводит к разрушению как одной лопатки, так и близлежащих. Возможности определения микродефектов на ранних этапах за счет наличия небольшого радиуса и малых трудно выявляемых дефектов ограничены. Сложность применения УЗ - контроля является необходимость ввода УЗ - луча через криволинейное тело лопатки и необходимость формирования для этого перехода от криволинейной поверхности малого радиуса к плоской поверхности с целью обеспечения надежного акустического контакта[8]. Анализ литературных источников показывает, что разными авторами [9] предприняты попытки ввода УЗ - луча в тело лопатки, однако контролю при этом под-

вергается как правило, только локальное место в области хвостовика или небольшая зона. Метод фазированных решеток, использующий те же принципы ультразвукового контроля, имеет преимущества за счет сканирования значительно большей области, но также не обеспечивает контроль основного объема хвостовика закрепленной лопатки и также требует формирования акустической призмы для перехода от криволинейной поверхности лопатки к плоской поверхности датчика. Поэтому решением этого вопроса является выявление условий, при которых возможен ввод УЗ луча в криволинейное тело лопатки для обнаружения дефектов в зоне крепления Т-образного хвостовика по всей его длине и формирование акустической призмы для ввода луча через криволинейную поверхность [10].

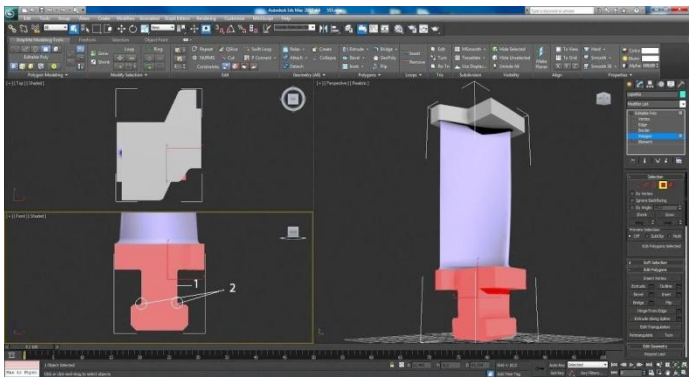


Рис. 4. Применение 3-D моделирования
для определения оптимальной точки ввода УЗ-луча:
1-тело Т- образного хвостовика; 2- зона контроля.

Оценка напряженного состояния в теле хвостовика показала, что наиболее уязвимым местом в период эксплуатации турбины представляет зона 2 галтельного перехода (рис. 4.), в который за счет малого радиуса концентрируются наибольшие радиальные и тангенциальные нагрузки. Кроме этого дефекты, сформированные на этапе механической обработки, являясь дополнительными концентраторами напряжений, приводят к возникновению и развитию трещин и как правило к дальнейшему обрыву лопатки. С применением программы «Unigraphics» разработана схема ввода УЗ - луча для оценки дефектов в зоне контроля 2 Т-образного хвостовика в период эксплуатации турбины.

Наиболее предпочтительным на наш взгляд является введение УЗ - луча через криволинейное тело лопатки сверху в зоне галтельного перехода [11] со стороны внутренней поверхности профиля. Однако развитая геометрия лопатки не позволяет осуществлять конроль по причине отсутствия хорошего аккустического контакта на криволинейной поверхности малого радиуса из-за плоской опорной поверхности датчика. Исходя из этого нами была предложена схема формирования переходной акустической призмы - промежуточного слоя, формирующего переход от

сложной криволинейной поверхности лопатки к плоскости за счет создания иммерсионно - жесткого слоя состоящего из чередующихся слоев машинного масла и полипропилена и обладающего достаточной жесткостью конструкции для удержания необходимой формы при контроле рис.4.

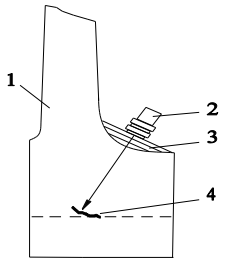


Рис. 5. Принципиальная схема ввода ультразвукового луча через иммерсионно-жесткую призму: 1 - тело лопатки; 2 - УЗ-датчик; 3 - иммерсионно-жесткая призма; 4 - дефект

Для определения возможности получения устойчивого акустического сигнала через иммерсионно - жесткий слой состоящий из слоя машинного масла со средней толщиной 23 мкм и слоя полипропилена со средней толщиной 21 мкм нами были проведены исследования с целью получить устойчивый сигнал от дефекта в стандартном образце СО-2 по ГОСТ14637. В результате исследований выявлена зависимость амплитуды сигнала, полученного от дефекта ø6Н14 прямым пьезоэлектрическим преобразователем 2,5К12, до момента достижения фиксированной высоты импульса на экране дефектоскопа (20%) с увеличением толщины иммерсионно - жесткого слоя (рис.6.).

Показано, что увеличение величины иммерсионно-жесткого слоя. приводит к необходимости подстройки усиления сигнала за счет продольного рассеяния энергии звука по слоям. Кроме этого зафиксировано увеличение угла ввода для датчика П121-2,5-50С на 2° для иммерсионно - жесткого слоя толщиной 8,8 мм.

Показано, что при контроле наклонным преобразователем П121-2,5-50С на стандартном образце СО-3 по ГОСТ14637 получен устойчивый сигнал от боковой поверхности образца и устойчивое выявление в образцах линейных дефектов и дефектов в виде зарубок по ГОСТ14782-86 для переходного слоя толщиной 8,8 мм. Для обеспечения возможности проведения контроля через криволинейные поверхности был изготовлен специальный образец (рис.6) с конусной криволинейной поверхностью глубиной 4мм и ø 65мм в максимальном раскрытии на одной стороне, и сформированной зарубкой на другом. Проведение контроля, через иммерсионно - жесткую призму позволило устойчиво фиксировать дефект на противоположной поверхности образца.

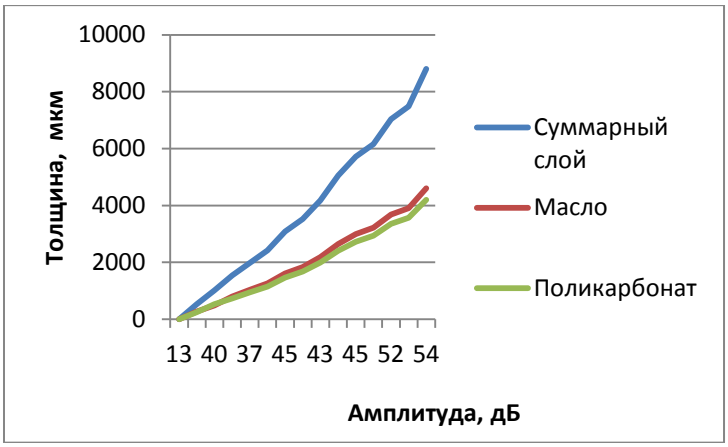


Рис. 6. График влияния толщины иммерсионно - жесткой призмы на амплитуду эхо - импульса от отверстия ø6Н14 при контроле наклонным преобразователем П121-2,5-50С по всей ширине образца.

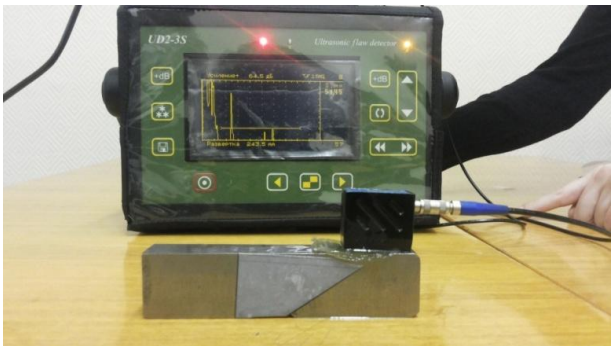


Рис. 7. Проведение контроля на образце с криволинейной призмой ø 65мм глубиной 4 мм, при выявлении дефекта в виде зарубки на донной поверхности

При этом наблюдается сохранение устойчивого сигнала от дефекта в течение длительного времени, за счет хорошего акустического контакта с иммерсионно - жесткой призмой.

Выводы

1. Исследованы несоответствия поверхностных и внутренних дефектов лопаток, возникающие на протяжении всего жизненного цикла паровой турбины.
2. Показана возможность управления жизненным циклом лопаток паровых турбин за счет введения дополнительных точек контроля для механически обработанных хвостовиков лопаток паровых турбин и контроля хвостовиков лопаток в турбине.
3. Сформированы предпосылки для обеспечения контроля зоны хвостовиков лопаток, через криволинейную поверхность галтельного перехода профиля пера лопатки с помощью иммерсионно - жесткой призмы.

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. Попов А.И., Савинов А.М., Зейдан М.Н. Совершенствование неразрушающего контроля в процессе производства турбинных лопаток //Технология машиностроения. - 2006 - №9.-С.71-74.
3. Попов А. И., Савинов А. М., Зейдан М. Н. Совершенствование НК в процессе производства турбинных лопаток // В мире неразрушающего контроля: Ежеквартальное журнальное обозрение. - 2006 . - № 1. - С. 26-29. - ISSN 1609-3178.
4. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: Учебн. пос. – СПб.: Радиоавионика, 2007. – 296 с.
5. Родин В.Н. Ремонт паровых турбин: Учеб. пособие для вузов / под общ. ред. Бродова Ю.М. и Родина В.Н. – Екатеринбург: УГТУ –УПИ, 2002. 296 с.
6. Носов В.В., Лаврин В.Г. Методика контроля качества сляба для производства горячекатаной полосы // 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. 548 – 554.
7. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
8. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. 2е изд. М.: Металлургия, 1985. – 256 с .
9. Carodiskey T.J. Ultrasonic transducer probe. US pat.4.368.642(1983)
10. Ласточкина О.И., Петровичева А.А., Попов А.И., Медко В.С. Повышение работоспособности лопаток паровых турбин с Т-образным хвостовиком за счет применения ультразвукового контроля//Материалы XLII науч. Практ. Конф. с междунар. участием «Новые материалы и технологии «Неделя науки СПбГПУ» 2-7 дек.2013.
11. Попова А.И., Попов А.И., Медко В.С. , Тюхтяев М.И. Обеспечение этапов жизненного цикла лопаток паровых турбин применением ультразвукового контроля//Металлообработка, 5-6(77-78)2013

A.I. Popov[1], A.I. Popova[1], M.I. Tyukhtyaev[2], V.S. Medco[1]

LIFECYCLE MANAGEMENT OF STEAM TURBINE BLADES BY USING ULTRASONIC TESTING-CONTROL

[1]St. Petersburg State Polytechnical University,
[2]Russia Power machines, Russia

Abstract

The questions of the lifecycle management of steam turbine blades. The analysis of emerging defects throughout the life cycle of the shoulder blades. Shows that blade lifecycle management by reducing the number of possible defects occurring at each stage and detected by the ultrasonic echo method. The control points for control action and proposed mechanisms for their implementation. Including through the use of control vanes in the turbine through the curved surface of the fillet with the immersionno-stiff wedges

REFERENCES

[1] Nadeev A.I., Popova A.I., Surina A.V., Svechnikov Y.K.//Principles of building automated systems life cycle support of innovative products Sensors and systems. -2006. -N 11 (90). -p. 59-63. (rus.)

[2] Popov A. I., Savinov A.I., Zeidan M.N. Improvement of non-destructive testing during manufacture turbine blades//Mechanical engineering technology. -2006-no. 9, p. 71-74. (rus.)

[3] Popov A.I, Savinov, A. M., Zeidan M.N Improvement of non-destructive testing during manufacture turbine blades ///Non-destructive testing in the world: The quarterly journal review. - 2006. -№ 1. -p. 26-29. -ISSN 1609-3178. (rus.)

[4] Kretov E.F. Ultrasonic flaw detection in power engineering tutorial St. Petersburg publishing house "Radioavionika" 2007. 296 p. (rus.)

[5] Rodin V.N. Repair of steam turbines / Ed. Brodov Y.M. and RodinV.N. A textbook for universities of Yekaterinburg: SEI USTU-UPI, 2002.296 with. 5-00185-321-5. (rus.)

[6] Nosov V.V., Lavrin V. G. Method of quality control for slabs for forecasting defective hot strip// 2th International scientific conference. “Modern Engineering: Science and Education"/Ed. M.M. Radkevich, A.N. Evgrafov. – SPbSPU, 2012. – p. 548 – 554. (rus.)

[7] J. Krautkremer, H. Krautkremer Ultrasonic testing of materials with inevitable. Directory Publisher; translated from German-M.: Metallurgy, 1991. 752 p. (rus.)

[8] Carodiskey T.J. Ultrasonic transducer probe.US pat.4.368.642 (1983)

[9] Improvement of the health of steam turbine blades with t-shank by applying ultrasonic testing/O.I. Lastochkina,A.A. Petrovicheva, Popov A.I., Medko V.S.//Materials of XLII researcher. Scient. Conf. with the intern. "The new materials and technology, The science week SPbSPU» 2-7 Dec 2013. (rus.)

[10] Popova A.I., Popov A.I., Medko V.S., Tyukhtyaev M.I., Ensuring lifecycle stages of steam turbine blades using ultrasonic testing//Metal working, 5-6 (77-78), 2013. (rus.)

УДК.621.735.79

М.М. Радкевич

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ ПРИ ПРОГРАММНОЙ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Михаил Михайлович Радкевич д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: radmich@mail.ru

Аннотация.

В статье рассмотрены вопросы формирования субструктурного состояния сталей при комбинированном методе упрочняющей обработки – программной механико-термической обработке (ПМТО).

Сделана попытка объяснить возможность и условия получения однородной суб-структуры, более однородной и равноосной микроструктуры сталей в результате ПМТО. Показаны условия выбора режимов ПМТО, обеспечивающих более высокий комплекс механических свойств изделий из конструкционных сталей.

Ключевые слова: структура, программная механико-термическая, деформация, дислокации, последеформационная пауза, рекристаллизация.

Основной задачей программной механико-термической обработки является получение однородной структуры и высокого комплекса механических свойств изделий. Достичь этого можно в том случае, если после горячей деформации управляя процессом рекристаллизации обеспечить прохождение начальной стадии рекристаллизации в горячедеформированном аустените и равномерное распределение дислокаций. Необходимо отметить, что полигонизация имеет много общего с начальной стадией первичной рекристаллизации - формированием центров рекристаллизации [1]. Когда становится возможным перераспределение дислокаций, как правило, сразу же начинается формирование центров рекристаллизации.

Анализируя имеющиеся сведения о механизме полигонизации можно сделать вывод, что на скорость процесса полигонизации оказывают влияние следующие факторы.

Прежде всего это характер дислокационной структуры, образующийся при деформации. Чем более неоднородное распределение дислокаций, тем труднее последующее их перераспределение с образованием малоугловых границ, т.е. тем труднее реализоваться процессу полигонизации.

Для первичной рекристаллизации не существует критической температуры в том смысле, в каком она существует для фазового превращения. Из всех процессов, происходящих в твердом состоянии, к рекристаллизации наиболее близки аллотропические превращения.

При рекристаллизации плотность дислокаций, точечных дефектов и, создаваемые ими искажения решетки максимальны в исходном состоянии (горячедеформированном) и убывают по мере протекания процесса. Представление о том, что формирование центров рекристаллизации связано с перераспределением дислокаций, подкрепляется также косвенными результатами, полученными при изучении начальных стадий рекристаллизации в чистых металлах[2]. В них отчетливо проявилась роль характера дислокационной структуры.

При последующем нагреве, горячедеформированной заготовки с малыми степенями обжатия, идет термически активируемый процесс перераспределения наиболее подвижной части дислокаций, вызывая при этом небольшое нарушение упругого равновесия дислокационных скоплений. Однако, при малых степенях деформации абсолютная плотность дислокаций и величина упругих напряжений невелики, и потому не происходит массовое перераспределение дислокаций и формирование зародышей рекристаллизации. Эти процессы могут активизироваться только при значительно более высоких температурах.

В случае деформации с большими степенями обжатия, когда плотность дислокаций велика, достаточно небольшого диффузионного нарушения упругого равновесия дислокационных скоплений, чтобы начался интенсивный процесс их перераспределения. Вследствие чего происходит формирование границ зародышей рекристаллизации, которые либо сразу имеют большие углы разориентировки, либо превращаются в высокоугловые в течение определенного времени. Такое перераспределение идет со скоростью, значительно превышающей скорость диффузии вакансий и дислоцированных атомов, и поэтому опережает полигонизацию, лимитируемую скоростью переползания дислокаций.

Таким образом, начальная стадия рекристаллизации связана с коллективными атомными перемещениями. Диффузия одиночных атомов (вакансий) играет вспомогательную роль и создает необходимые условия для перераспределения дислокаций.

Существенный момент - разная зависимость скорости этих двух процессов от степени деформации. При деформации с малыми степенями деформации полигонизация успевает совершиться до рекристаллизации, тогда как после сильной деформации рекристаллизация всегда начинается раньше и полигонизация практически вообще не реализуется. Следовательно, с увеличением степени деформации облегчается рекристаллизация.

Говоря о роли дефектов кристаллической решетки необходимо отметить, что увеличение числа дефектов, особенно вакансий, облегчает ми-

грацию атомов в твердом теле и приводит к ускорению диффузии. Они в свою очередь, влияют на изменение физических свойств, а также на механизм и кинетику диффузионных процессов. Вакансии также играют важную роль в процессах растворения, выделения и коагуляции первичных и вторичных фаз. Это особенно проявляется при высоких температурах, когда указанные процессы вследствие увеличения числа дефектов, значительно интенсифицируются.

Охлаждение (закалка) после горячей пластической деформации вызывает неравномерную концентрацию дефектов, т.е. превышающую термодинамически равновесную. В этом случае, появляется термодинамическая движущая сила, стремящаяся уменьшить концентрацию дефектов до равновесной величины при данной температуре.

Весьма важным при ПМТО является вопрос равномерности распада твердого раствора. Известно, что неравномерность распада отрицательно сказывается на деформационной способности конструкционных материалов. В этой связи обеспечение более однородного распада, а следовательно, увеличение числа центров кристаллизации приведет в большей степени к изотропному состоянию твердого раствора. Такая структура металла обладает способностью перераспределять пики напряжений и предотвращать проявление преждевременного разрушения.

Технологический процесс программной механико-термической обработки разработан с учетом следующих положений:

- образование зародышей рекристаллизации не связано с возникновением совершенно новых поверхностей раздела, а происходит лишь за счет перераспределения дислокаций, уже имеющихся в деформируемом материале;
- инкубационный период формирования зародышей рекристаллизации связан со временем, необходимым для протекания диффузионных и термически активируемых процессов нарушающих упругое равновесие дислокаций и создающих возможность их перераспределения.

Рассмотренный дислокационный механизм формирования центров рекристаллизации, лежащий в основе разработки режимов ПМТО объясняет возможность и условия получения однородной субструктуры и изотропности свойств стальных изделий.

Структура заготовки, полученная после горячей пластической деформации и немедленного охлаждения (исключается рекристаллизация), обладает лучшим сочетанием комплекса механических свойств по сравнению с закалкой без деформации.

Установлено, что реализация ПМТО по режимам, которые допускают прохождение начальной стадии рекристаллизации не снижает существенно эффект упрочнения. Структуру заготовок, получаемую в условиях протекания начальных стадий рекристаллизации, изучали, задавая разные значения последеформационной паузы. Учитывая многофакторность про-

цесса рекристаллизации, а также то, что пластическая деформация неоднородна по своей природе, изучалось влияние последеформационных пауз на процесс перекристаллизации стали 08Х18Н10Т в условиях ПМТО [3]. При этом значение времени последеформационной паузы изменялось от 10 до 40 с.

По результатам металлографических исследований изделий, полученных из стали 08Х18Н10Т при различных последеформационных выдержках и разных температурах деформирования, построена диаграмма, отображающая средний размер зерна в зависимости от названных параметров (рис.1).

Анализ полученной диаграммы показывает, что средний размер рекристаллизованного зерна при значениях последеформационной паузы от 10 до 40с практически не отличается. Только лишь при температуре деформирования 1100 0С и последеформационной паузы 40с и более зерно начинает заметно увеличиваться.

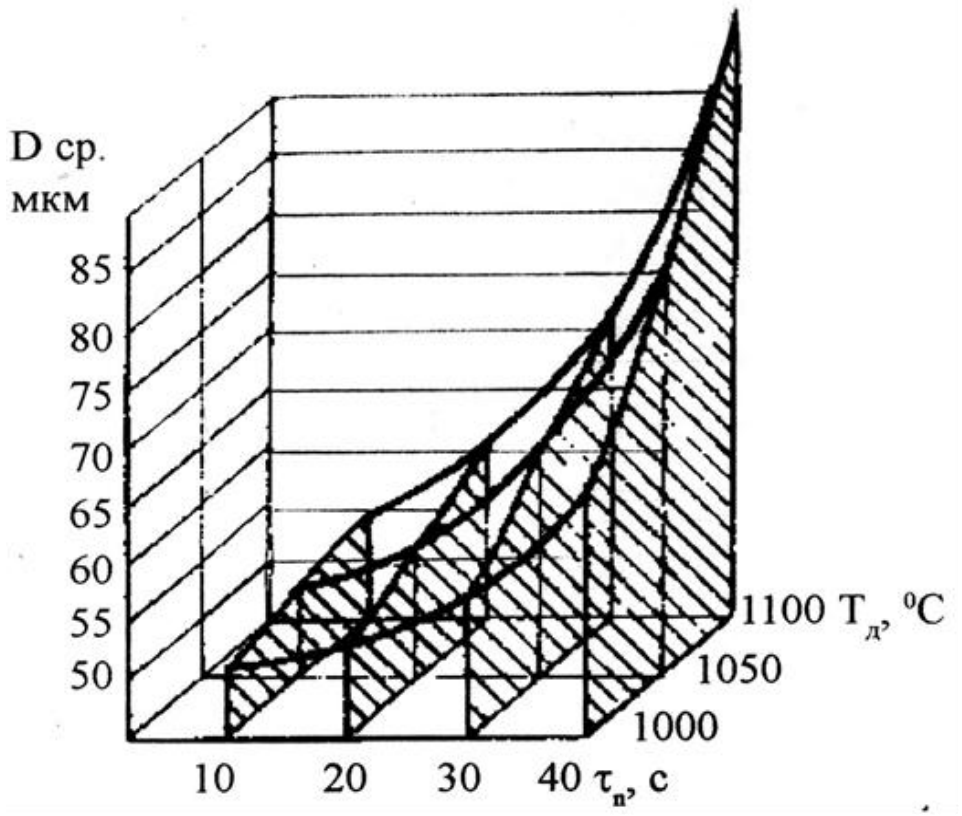


Рис. 1. Зависимость среднего размера зерна от температуры деформации и времени подстуживания.

На рис. 2 показана микроструктура изделий из стали 08Х18Н10Т, полученных в результате ПМТО с различными последеформационными паузами

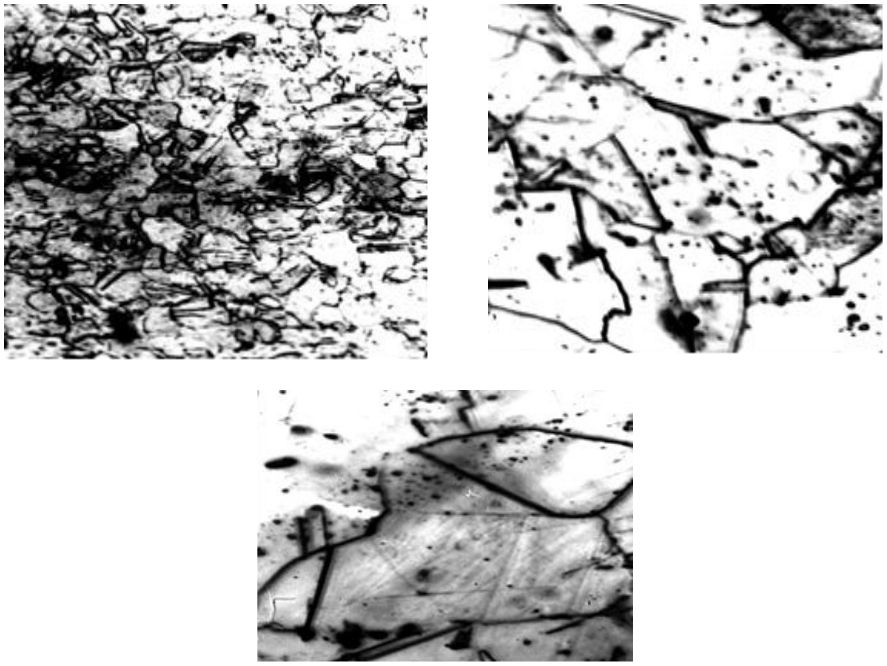


Рис. 2. Зеренная структура стали 08Х18Н10Т после ПМТО. х 340. а) $\tau_п$ =10с; б) $\tau_п$ =20с; в) $\tau_п$ = 30с.

Поскольку горячая пластическая деформация облегчает процессы переползания и поперечного скольжения дислокаций то, как следствие, происходит их перераспределение с частичной аннигиляцией, уже непосредственно в ходе деформирования [4]. То есть формируется структура полигонального типа. Структура такого типа намного стабильнее.

Несколько иначе совершается в ней и рекристаллизация. По-видимому, при рекристаллизации, следующей непосредственно за горячей деформацией, наиболее вероятным является механизм формирования центров рекристаллизации коалесценцией субзерен, образовавшихся в процессе деформации. Стадия формирования центров рекристаллизации не вызывает существенного ухудшения свойств, полученных в результате деформационно-термической обработки.

Таким образом, реализация технологического процесса ПМТО должна осуществляться по режимам, которые бы исключали стадию роста центров рекристаллизации. Между тем, начальная стадия формирования (зарождение) центров рекристаллизации не снижает эффект упрочнения.

На процессы рекристаллизации и укрупнение зерна оказывают замедляющее действие: крупное исходное зерно, легирующие элементы, которые тормозят диффузию, низкий уровень деформирующего напряжения, малая скорость и степень деформации, полигонизация с созданием структуры с пониженной плотностью дислокаций. Образование вторичных фаз может вызывать увеличение сопротивления деформации и деформационного упрочнения (наклепа), что в свою очередь облегчает протекание рекристаллизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик С.С. и др. Рекристаллизация металлов и сплавов. – Металлургия,1978. – 568 с.
2. Бурке Дж.Е., Тарнбалл Д. Успехи физики металлов. Т 1. Металлургиздат. – 368 с.
3. Радкевич М.М. Технология упрочняющей программной механико-термической обработки. СПб., Изд-во Политехнического университета, 2011, 263 с.
4. Варгасов Н.Р.,Барахтин Б.К., Михайлов М.С., Федосеев М.П. Дислокационная структура и текстура образцов из стали 08Х18Н10Т после горячей деформации сжатием. Вопросы материаловедения, №3(63), 2010г, с. 45-52.

M.M. Radkevich

STEEL STRUCTURE FORMATION UNDER PROGRAMM MECHANICAL-THERMO TREATMENT

Abstract

Questions about steel substructure formation under combined method of mechanical-termo treatment (PTMO). An attempt to explain the possibility of obtaining homogeneous sub-structure and equiaxed microstructure of steels under PMTO is made. Mode conditions for purpose to obtain improved mechanical properties are observed.

Key words: Structure, program mechanical-thermo deformation, dislocations, after deformation pause, recrystallization

REFERENCES

[1] S. Gorelik, etc. Recrystallization of metals and alloys. Moscow: metallurgia. 1978. 568 p. (rus.)
[2] Burke, j. e., Tarnball d. Successes of Physics of metals. T 1. Metallurgizdat. 368 p. (rus.)
[3] M.M. Radkevich strengthening Technology behind mechanical and thermal processing. Spb., publishing house of the Polytechnic University, 2011, 263 p. (rus.)
[4] M.M. Radkevich. Strengthening Technology behind mechanical and thermal processing. Spb., publishing house of the Polytechnic University, 2011, 263 p. (rus.)

УДК 539.261

В.В.Трофимов[1], И.Краус[2], Р.У.Ильясов[3]

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕНЗОМЕТРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В АЛЮМИНИЕВЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБАХ

[1]Валерий Васильевич Трофимов, к.ф.-м.н., с.н.с, профессор, кафедра «Транспортные и технологические системы». Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: +7(921)907-1947, E-mail: vtrofimov@mail.ru

[2]Иво Краус, , доктор наук, профессор.
Чешский технический университет
Прага , Чехия.
E-mail: ivo.kraus@fjfi.cvut.cz

[3]Рамиль Уралович Ильясов, аспирант, кафедра «Технологии конструкционных материалов и материаловедение», Россия, Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
E-mail: ramil-4@list.ru

Аннотация

Исследовано напряженно-деформированное состояние в замковых соединениях алюминиевых бурильных труб рентгеновским тензометром.

Ключевые слова: рентгеновская тензометрия, портативный прибор ТРИМ, усталость.

Объектом исследований являются две бурильные трубы, изготовленные из алюминиевого сплава с нормативным пределом текучести σ_{02} = 450 МПа, соединенные между собой с помощью муфты и ниппеля из высокопрочной стали с пределом текучести 850 МПа. Фото опытного образца в сборе представлен на рис. 1. Был осуществлен процесс сборки бурильного замка с целью отслеживания уровня деформации, возникающей вследствие напряжения в избранных точках алюминиевой трубы.

Метод рентгеновской тензометрии [1] остается наиболее достоверным и востребованным методом измерения напряжений в кристаллических материалах. Магнитные, электромагнитные и ультразвуковые методы являются наиболее портативными, дешевыми и удобными для применения. Однако при их использовании возникают трудности в интерпретации результатов измерения. [2]

Рис. 1. Бурильная труба в сборе.

Используемый тензометр измеряет истинные напряжения: остаточные или действующие. При измерении нет необходимости знать предысторию (условия эксплуатации) объекта; не требуется знания параметра кристаллической решетки материала в ненапряженном состоянии. [3]

После термической обработки труба подверглась механической правке. В процессе сборки стальная муфта разогревалась до высоких температур, что обеспечивало заданный уровень предварительного натяжения в соединении.

Измерение остаточных напряжений проводилось методом рентгеновской тензометрии с использованием прибора ТРИМ. [4]

Условия проведения испытания.

Испытания проводились в лабораторном помещении при нормальных атмосферных условиях:

- Температура окружающего воздуха 20±5 ºС
- Атмосферное давление, 84-106 кПа
- Относительная влажность воздуха, 35-95 %.

Испытательное оборудование:

Излучатель с рентгеновской трубкой и высоковольтным источником питания; коллимационное устройство, не требующее юстировки при измерениях; блок питания рентгеновской трубки; блок позиционно-чувствительного детектора; блок анализа информации и связи с компьютером; персональный компьютер; устройство крепления излучателя; сменная насадка.

Процедура испытаний:

На технологических опорах закрепляли образец соединения двух бурильных труб в сборе. Для снятия поверхностного слоя, подвергнутого механической обработке , применяли электролитическое полирование. Расче-

ты НДС(напряженно-деформированного состояния) методом конечных элементов не учитывают остаточных напряжений, возникающих при механической обработке (токарная , фрезерная, слесарная и т.п.). Остаточные напряжения возникают при этом либо от воздействия высоких температур с градиентом от поверхности в приповерхностных слоях, либо от силового действия инструмента. При этом в поверхностных слоях возникают значительные пластические деформации, которые приводят к уширению рентгеновских дифракционных спектров на глубине до десятков мкм. Этот слой представляется возможным снять электролитическим полированием, что позволит определить НДС изделия (бурильная труба), соответствующее начальному состоянию после изготовления. Электролитическое полирование проводили специально спроектированным и изготовленным шлифовальным устройством.

Определения остаточных напряжений выполнялось в трех сечениях: 2; 5; 6 (рис. 2). Проводили измерения окружных напряжений $\sigma_{окр}$. В каждом сечении проводили по четыре измерения по окружности через угол 90º. В сечении 2 на конце трубы, на расстоянии 500 мм от соединения, в сечении 5 в муфте на расстоянии 20 мм от ее конца и в сечении 6 в ниппеле на расстоянии 20 мм от торца ниппеля. Эскиз образца с сечениями представлен на рис. 2.

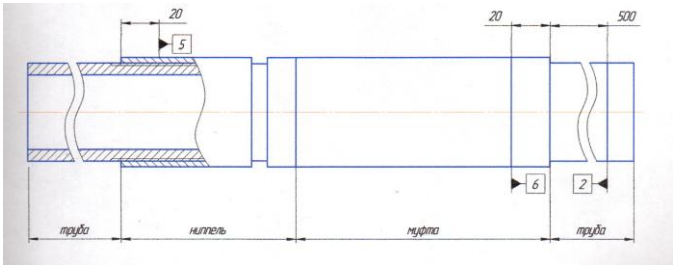


Рис. 2. Сечения проводимых измерений.

Результаты измерений.

В ходе эксперимента были получены следующие значения:

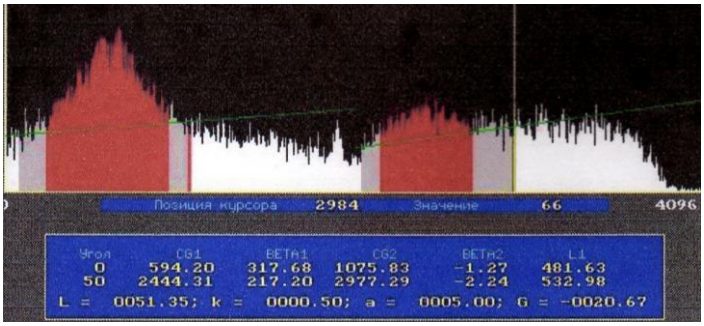


Рис. 3. Остаточные напряжения $\sigma_{окр}$ в сечении 5. Прибор в исходном состоянии, φ=0 . Результат: -206,7 МПа

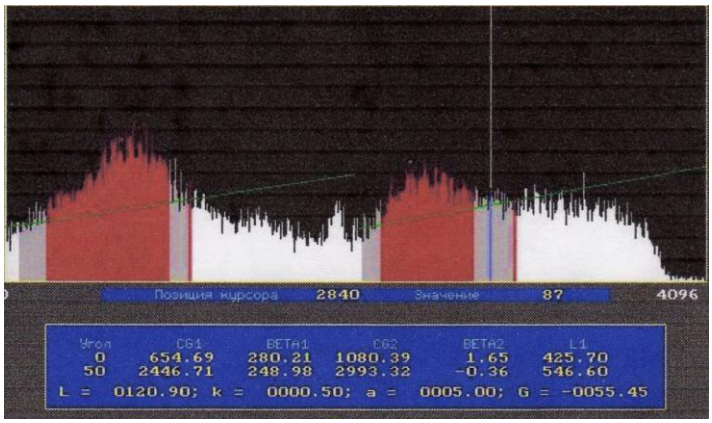


Рис. 4. Остаточные напряжения $\sigma_{окр}$ в сечении 5. Прибор развернут на 180°. Результат: -554,5 МПа

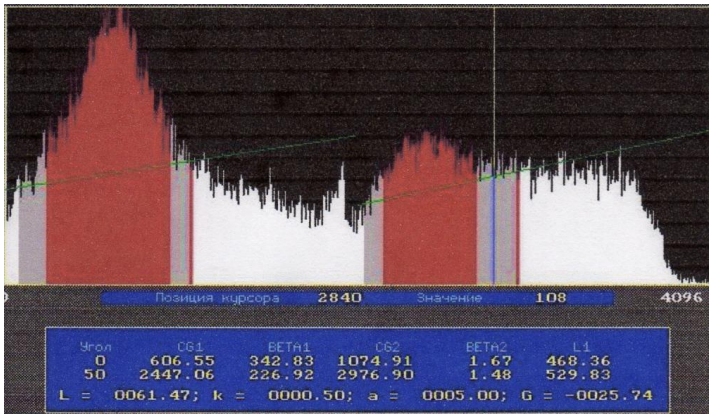


Рис. 5. Остаточные напряжения в сечении 5. Труба повернута на 90°, прибор в исходном положении. Результат: -257,4 МПа

Остальные результаты:

a) Остаточные напряжения в сечении 5. Труба повернута на 90°, прибор развернут на 180°. Напряжения составили: -430 МПа
b) Остаточные напряжения в сечении 6. Прибор в исходном положении. Напряжения составили: -280 МПа
c) Остаточные напряжения в сечении 6. Прибор развернут на 180°. Напряжения составили: -320 Мпа
d) Остаточные напряжения в сечении 6. Труба повернута на 90°, прибор в исходном положении. Напряжения составили: -300 Мпа
e) Остаточные напряжения в сечении 6, Труба повернута на 90°, прибор развернут на 180°. Напряжения составили: -520 Мпа

Заключение

Таким образом, результаты исследования алюминиевой бурильной трубы после термической обработки и механической правки показывают,

что технология сборки бурильных труб соответствует нормативным требованиям и повышает предел выносливости при циклических нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.Kraus,V.V.Trofimov. Rentgenova tenzometrie.–Praha : Academia,1988.–248 p.(чешск.)
2. Венгринович, В. Л. Принципы и практика диагностики напряженно-деформированного состояния конструкций, изделий и сварных соединений . В мире неразрушающего контроля. - 2005. - N1. - С. 4-10.
3. В.В. Трофимов, А.Я. Башкарев, И. Краус. Рентгеновская тензометрия - это так просто. В мире неразрушающего контроля. - 2005. - N1. - С. 28-33.
4. И.Краус, В.В.Трофимов. Метод рентгеновской тензометрии в технической диагностике металлических изделий. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.2011. С. 278 - 283.
5. В.В. Трофимов, В.В. Чижиков, Р.У. Ильясов, П.П. Панов. Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в бурильных трубах.: Материалы 2-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.2012. С. 763 - 768.
6. В.В.Трофимов, В.В.Чижиков, С.С.Колесов, Р.У.Ильясов. Применение портативного рентгеновского тензометра для контроля напряженно-деформированного состояния в деталях при поверхностном упрочнении. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции / под ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.2013. С. 1045 - 1049.
7. Д.М. Васильев, В.В. Трофимов. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений (обзор). Заводская лаборатория.-1984. Т. 50. № 1.-С. 20-29.
8. А.Г. Акуличев, В.Д. Андреева, В.В. Трофимов. Исследование закаленного нитроцементованного слоя стали 20ХЗМВФ методом полнопрофильного анализа рентгенограмм. Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование.-2011. № 1(117).-С. 173-176.
9. Трофимов В. В., Башкарев А.Я., Карякин Ю.Е. Техническая диагностика и неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния трубопроводов и оборудования АС с помощью рентгенов-

ского тензометра//Тр. науч.-техн. конф. «Управление ресурсом контроль металла, диагностика». М.: ВНИИАЭС, 2002. С. 231 -233.
10. Н. А. Яблокова, В. В. Трофимов. Исследование напряженно-деформированного состояния лопаток компрессора методами рентгеноструктурного анализа. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2013. - Т. 79, № 1. - С. 36-44.
11. Н. А. Яблокова, В. В. Трофимов, И. Краус. Рентгеноструктурный анализ остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей компрессоров. Материалы XVI Международной конференции. Решетневские чтения.- Красноярск - 2012. Часть 1. - С. 420-423.

V.V. Trofimov[1], I. Kraus[2], R.U. Ilyasov[1]

APPLICATION OF THE PORTABLE X-RAY TENSOMETER SET FOR INSPECTION STRESSEDLY-DEFORMED STATE IN ALUMINIUM DRILL PIPES

[1]St. Petersburg State Polytechnical University, Russia;
[2]Czech Technical University, Czech Republic

Abstract

The article is devoted to the usage of the non-destructive method – X-ray tensometry for stressedly-deformed state's analysis in aluminium drill pipes with application of portable apparatus TRIM(X-ray tensometer with compact radiator).

Key words: – X-ray tensometry, portable apparatus TRIM, fatigue.

REFERENCES

[1] I.Kraus,V.V.Trofimov. Rentgenova tenzometrie.–Praha : Academia,1988.–248 p. (cheshsk.)
[2] Vengrinovich, V. L. Printsipy i praktika diagnostiki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy, izdeliy i svarnykh soyedineniy. V mire nerazrushayushchego kontrolya. - 2005. - N1. - 4-10 p. (rus.)
[3] V.V. Trofimov, A.Ya. Bashkarev, I. Kraus. Rentgenovskaya tenzometriya - eto tak prosto. V mire nerazrushayushchego kontrolya. - 2005. - N1. - 28-33 p. (rus.)
[4] I.Kraus, V.V.Trofimov. Metod rentgenovskoy tenzometrii v tekhnicheskoy diagnostike metallicheskikh izdeliy. Materialy 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red. M.M.

Radkevicha i A.N. Yevgrafova. - SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta.2011. 278 - 283 p. (rus.)
[5] V.V. Trofimov, V.V. Chizhikov, R.U. Ilyasov, P.P. Panov. Primeneniye portativnogo rentgenovskogo tenzometra dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v burilnykh trubakh.: Materialy 2-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. - SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta.2012. 763 – 768 p. (rus.)
[6] V.V.Trofimov, V.V.Chizhikov, S.S.Kolesov, R.U.Ilyasov. Primeneniye portativnogo rentgenovskogo tenzometra dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v detalyakh pri poverkhnostnom uprochnenii. Materialy 3-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / pod red. M.M. Radkevicha i A.N. Yevgrafova. - SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta.2013. 1045 – 1049 p. (rus.)
[7] D.M. Vasilyev, V.V. Trofimov. Sovremennoye sostoyaniye rentgenovskogo sposoba izmereniya makronapryazheniy (obzor). Zavodskaya laboratoriya.-1984. T. 50. № 1.-20-29 p. (rus.)
[8] A.G. Akulichev, V.D. Andreyeva, V.V. Trofimov. Issledovaniye zakalennogo nitrotsementovannogo sloya stali 20KhZMVF metodom polnoprofilnogo analiza rentgenogramm. Nauchno-tekhn. vedomosti SPbGPU. Ser. Nauka i obrazovaniye.-2011. № 1(117).173-176 p. (rus.)
[9] Trofimov V. V., Bashkarev A.Ya., Karyakin Yu.E. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov i oborudovaniya AS s pomoshchyu rentgenovskogo tenzometra//Tr. nauch.-tekhn. konf. «Upravleniye resursom kontrol metalla, diagnostika». M.: VNIIAES, 2002. 231 -233 p. (rus.)
[10] N. A. Yablokova, V. V. Trofimov. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya lopatok kompressora metodami rentgenostrukturnogo analiza. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. - 2013. - T. 79, № 1. 36-44 p. (rus.)
[11] N. A. Yablokova, V. V. Trofimov, I. Kraus. Rentgenostrukturnyy analiz ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnykh sloyakh detaley kompressorov. Materialy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii. Reshetnevskiye chteniya.- Krasnoyarsk - 2012. Chast 1. 420-423 p. (rus.)

УДК 621.31

Л. А. Ушомирская

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Людмила Алексеевна Ушомирская, д.т.н., профессор.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:8-812-351-47-04

Аннотация

В статье представлены технологические возможности электролитно-плазменного полирования (ЭПП) сталей, титановых и цветных сплавов. ЭПП выполняется в нетоксичных электролитах при напряжении 200-400 В, плотности тока 0,2-0,5 А/см^2, температуре электролита 60-90 ℃: достигнуто высокое качество обработанной поверхности. Возможно ЭПП наружных и внутренних поверхностей изделий сложной формы.

Ключевые *слова:* анод, катод, плазма, вольт-амперные характеристики, искровой разряд, дефектный слой, пузырьковое кипение.

Метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) широко применяется в различных отраслях машиностроения: авиационная промышленность, зубопротезирование, финишное полирование нержавеющих сталей, титановых и цветных сплавов. Данная технология удовлетворяет современным техническим, экономическим и экологическим требованиям. ЭПП является достаточно эффективным процессом, основанным на использовании физико-химических явлений, протекающих в зоне обработки в растворах нетоксичных солей при использовании повышенных напряжений.

Данный способ обработки дает дополнительную циклическую прочность по сравнению с механической обработкой, а по достигаемым показателям сравним с традиционным электрохимическим полированием. В отличие от последнего, этот процесс протекает в экологически чистых электролитах (без кислот и щелочей) с высокой скоростью. Время обработки составляет 0,5-5 мин. Эффект высококачественного полирования в образующейся между электролитом и изделием плазме (парогазовой светящейся оболочке) вызывается плазмохимическими реакциями при напряжениях 250-400 В и плотности тока 0,2-0,5 А/см^2 [1,2,3]

В целом процессы в плазме, используемые для ЭПП, достаточно сложны. Их изучение производится по конечным продуктам электрохими-

ческих реакций методами оптической спектроскопии, электрических зондов и другими методами.

Следует отметить, что в процессе электролитно-плазменном полировании, законы Фарадея не применимы, в отличие от процессов электролиза в электролитах. На основании выполненных исследований получено, что выход продуктов растворения металла не согласуется с законами Фарадея, так как вступают в действие иные механизмы съема. Эффективность активации процессов при ЭПП определяется несколькими факторами: образованием химически активных частиц в парогазовой рубашке (плазме) и их взаимодействием с металлом анода, электрохимическими реакциями образования нерастворимых гидроксидов. Кроме того, законы электролиза не содержат такого параметра как расстояние между электродами и не рассматривают наличия плазмы. В искровом разряде количество продуктов реакций пропорционально расстоянию на электродах. Существенную роль играют и плазмохимические реакции.

Исследование процессов при ЭПП производилось на экспериментальной установке, состоящей из источника питания, электролитной ванны и контрольно-измерительных приборов (амперметр, вольтметр, температурный датчик).

При проведении экспериментов параметры варьировались в пределах: напряжение (U) до 400 В, температура электролита (*T*) 60-90 ℃ время обработки (*t*) 90-240 с. В качестве электролита использовались разные растворы солей. В ходе экспериментов были сняты вольтамперные характеристики (ВАХ), рис. 1.

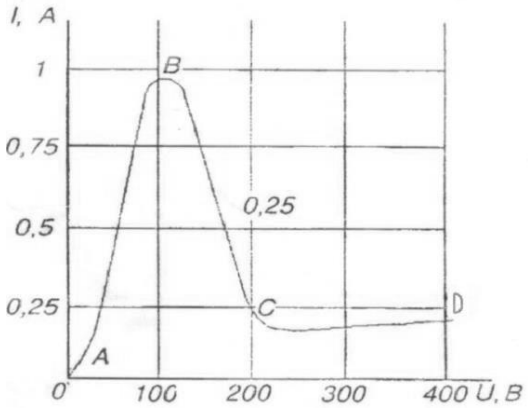


Рис. 1. Обобщенная вольт-амперная характеристика (ВАХ) процесса электролитно-плазменного полирования.

Анализ полученных ВАХ показал, что на участке АВ (0-100 В) с увеличением напряжения на электродах возрастает сила тока. Этот участок ВАХ соответствует процессу анодного растворения. Дальнейшее увеличение напряжения (участок ВС) приводит к образованию неустойчивой парогазовой оболочки электролита на анод. При увеличении напряжения (200-400 В, участок CD) инициируется искровой разряд, который стабилизиру-

ется сплошной парогазовой (плазменной) оболочкой, при этом сила тока резко снижается. Так как величина рабочего тока колеблется, существует такое значение U, при котором эта величина минимальна. [4]

Высокое качество поверхности полируемых изделий можно получить не изменяя питающее напряжение в момент включения установки. Необходимым условием является постепенное погружение деталей в разогретый раствор электролита в течение 2-5 с. При этом улучшаются условия организации парогазовой рубашки по все поверхности детали.

Существенным фактором ЭПП является температура раствора, которая должна быть близкой к температуре кипения и равномерно распределяться по всему объему ванны

Измерение микронеровностей на обработанных ЭПП образцах показали, что наилучшее качество поверхности по параметрам Ra получается при минимальных значениях, как силы рабочего тока, так и его колебаний. С улучшением качества поверхности в ходе полирования детали значение силы тока снижается примерно 20-30% от первоначального значения. Таким образом, по изменению силы тока и по характеру таких изменений можно судить об окончании процесса ЭПП.

Температура образцов, подвергаемых полированию, повышается на 20-30℃ по отношению к температуре электролита, а далее стабилизируется и остается неизменной в течение всего времени полирования. Это позволяет сделать вывод о том, что в системе «анод – парогазовая оболочка – электролит» устанавливается термическое равновесие, при котором электролит поглощает выделяющееся в парогазовой оболочке тепло. Отмечено, что чем стабильнее температурный режим процесса полирования с превышением температуры анода над температурой электролита, тем стабильнее ток, а, следовательно, качественнее получаемая в результате полирования поверхность изделия.

Выполненная фотосъемка позволила зафиксировать свечение плазменного разряда, который квалифицирован как искровой разряд; разрядная зона как бы внедряется в раствор электролита, распадаясь в нем. Ширина прилегающей светящейся зоны составляет 0,2-0,5 мм. [5,6]

В машиностроении полируют ряд деталей имеющие различные геометрические поверхности, эксплуатационные свойства которых должны обладать высокой точностью, низкой шероховатостью поверхности, малыми размерами дефектного слоя, что в сочетании со сложной формой обуславливает наличие определенных проблем в процессе обработки. Особенно это относится к полированию наружных и внутренних поверхностей сложной формы.

При электролитно-плазменном полировании цилиндрических образцов из коррозионной стойкой стали 12Х18Н10Т обработка наружных поверхностей происходила без каких-либо препятствий и уровень шероховатости поверхности снизился на 0,5-0,9 мкм в течение 5 мин. при режиме:

электролит-водный раствор сернокислого натрия Na_2SO_4 с концентрацией электролита 0,2 моль/л, температурой среды – 95 ℃ рабочее напряжение 320 В, плотность тока – 0,15 А/см^2. При этом газовая анодная оболочка является стабильной и в процессе полирования протекает по всей поверхности равномерно. Она служит источником значительного количества теплоты, которая при полировании наружных поверхностей отводится в находящейся вокруг детали электролита. При полировании внутренних цилиндрических поверхностей процесс протекает при недостаточном отводе теплоты. В этом случае выделяемая газовой анодной оболочкой тепловая энергия преобразует поверхностное кипение в пузырьковое и происходит интенсивное выбрасывание электролита из внутренней полости, это препятствует стабильности процесса.

При исследовании процесса электролитно-плазменного полирования легированных сталей разброс значений параметра шероховатости Ra составил 0,1…0,3 мкм для различных сложных поверхностей. Эту неравномерность можно считать незначительной, что объясняется особенностью формирования газовой анодной оболочки в зоне обработки. [7,8,9]

Для обеспечения полирования длинномерных изделий и внутренних поверхностей можно рекомендовать использовать различные варианты струйной электролитно-плазменной полировки. При струйном течении электролита возможно обработать всю поверхность детали любых размеров или только локальный участок поверхности. Для такого полирования необходимо создать приспособление, обеспечивающее перемещение либо детали либо струи электролита по специальной программе. Предложенная технология позволяет сократить расход электроэнергии, врем обработки и увеличить производительность полирования.

Выводы:

1) Электролитно-плазменное полирование является эффективным и развивающимся, широко применяемым в машиностроении вместо химической и электрохимической полировки.
2) Данная технология освоена для полировки легированных, а также цветных сплавов сложных профилей наружных и внутренних поверхностей изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И. Гончар, А.К. Товарков. Образование паровой оболочки при прохождении тока через электролит // Электронная обработка материалов. – 1991. – Nol. – 49-52.
2. П.Н. Белкин, С.Н. Белкин. Стабилизация парогазового слоя при анодном нагреве в растворах электролитов.// ИФЖ. – 1989.- Т.57., С. 159-160
3. Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков, А.И. Фоломкин. Формирование га-

зовой анодной оболочки и ее влияние на возможности электролитно-плазменной обработки сложных поверхностей.// Металлообработка. 2012. №3. С. 11-14.
4. Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков. Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении// Металлообработка. 2008. №1 (43). С.22-24.
5. Н.А. Амирханова, В.А. Белоногов, Г.У. Белоногова. Исследование закономерностей электролитно-плазменного полирования жаропрочного сплава ЭП-718.// Металлообработка. 2003. №6 с.16-20.
6. Б.П. Саушкин, А.Г. Атанасянц. Электроразрядные процессы в технологиях машиностроительного производства.// Металлообработка. 2006. №2 С.10-13.
7. Л.А. Ушомирская, А.И., А.И. Фоломкин, В.И. Новиков. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток// Металлообработка. 2008. №4 (46). С. 19-21.
8. Д.Е. Локтев, Л.А. Ушомирская, В.И. Новиков. Исследование параметров электролитно-плазменного полирования низколегированной стали методом планирования полного факторного эксперимента// Металлообработка. 2009. №5 (53). С. 15-18.
9. Н.Б. Кириллов, С.Д. Васильков, В.И. Новиков. Исследование влияния электролитно-плазменного полирования на качество поверхностного слоя издейлий из легированных сталей//Научн.-техн. Ведомости СПбГПУ. 2010. №2-2 (100). С. 130-135.
10. Б.П. Саушкин, А.Г. Атанасянц, *Г.А. Сычков. Проблемы и* перспективы развития импульсной электрохимической обработки.// Электронная обработка материалов. – 2003. - №2. С.12-15.

L.A. Ushomirskaja

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The paper presents the technological capabilities of electrolytic-plasma polishing (EPP) steels, titanium and non-ferrous alloys. EPP is performed in a non-toxic electrolytes at a voltage of 200-400 V, a current density of 0.2-0.5 A /cm^2, electrolyte temperature 60-90 ℃: achieved a high quality surface finish. Perhaps EPP external and internal surfaces of complex shapes.

Keywords: anode, cathode, plasma, current-voltage characteristics, the spark, the defect layer, nucleate boiling.

REFERENCES

[1] V.I. Gonchar, A.K. Tovarka. Education steam shell as the current passes through the electrolyte / / Electronic Materials Processing. - 1991 . - Nol. - 49-52. (rus.)

[2] P.N. Belkin, S.N. Belkin. Stabilization of the vapor-gas layer at the anode heating in solutions of electrolytes. / / Journal of Engineering Physics. - 1989. - T.57, Pp. 159-160 (rus.)

[3] L.A. Ushomirskaya, V.I. Novikov, A.I. Folomkin. Formation of the anode gas shell and its effect on the ability of electrolytic plasma processing of complex surfaces // Metalloobrabotka. 2012. № 3. Pp. 11-14. (rus.)

[4] L.A. Ushomirskaya , V.I. Novikov . Polished alloy steels in non-toxic electrolytes at high voltage / / Metallobrabotka. 2008. № 1 (43) . P.22 -24. (rus.)

[5] N.A. Amirkhanova, V.A. Belonogov, G.U. Belonogova. Investigation of regularities electrolytic-plasma polishing superalloy EP- 718. / / Metallobrabotka. 2003. № 6 pp.16- 20.

[6] B.P. Saushkin, A.G. Atanasyants. Electric discharge processes in engineering production technologies. // Metalloobrabotka. 2006. № 2 p.10- 13. (rus.)

[7] L.A. Ushomirskaya, A.I., AI Folomkin, V.I. Novikov. Features finishing turbine blades // Metalloobrabotka. 2008. № 4 (46). Pp. 19-21 .

[8] D.E. Loktev, L.A. Ushomirskaya , V.I. Novikov. Study parameters electrolytic-plasma polishing method for planning low-alloy steel full factorial experiment / / Metalloobrabotka. 2009. № 5 (53). Pp. 15-18. (rus.)

[9] N.B. Kirillov, S.D. Cornflowers, V.I. Novikov. Investigation of the influence of electrolytic- plasma polishing the quality of the surface layer of the alloy steels izdeyly // Nauchn. - tehn. STU statements. 2010. № 2-2 (100). Pp. 130-135. (rus.)

[10] B.P. Saushkin, A.G. Atanasyants, G.A. Sychkov. Problems and prospects of pulse electrochemical machining. // Electronic Materials Processing . - 2003. - № 2. C.12 -15. (rus.)

УДК 621.039.53:669.14

М. В. Яковицкая [1], А. П. Петкова [2]

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ ХРОМО-НИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

[1]Марина Валентиновна Яковицкая, к.т.н.,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург
Тел.:+7-904-558-07-76, E-mail: mava1968@gmail.com.

[2]Ани Петрова Петкова, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Россия, Санкт-Петербург
Тел.:+7-921-336-87-73, E-mail: apetkova@inbox.ru

Аннотация

В докладе предложена совокупность методов повышения физико-механических свойств аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей для технологических систем энергетического машиностроения, подвергающихся длительному воздействию высоких температур и водородсодержащих сред. Проведённые исследования показали, что предложенная технология может быть использована для увеличения работоспособности энергетического оборудования.

Ключевые слова: коррозионностойкие стали, физико-механические свойства, аустенизация, водородопроницаемость.

Цель: повышение комплекса основных физико-механических свойств аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей, обеспечивающее увеличение работоспособности энергетического оборудования.

В настоящее время, в силу известных обстоятельств, проблемам безопасности эксплуатации объектов атомной энергетики уделяется особое внимание. В ряду многочисленных вопросов, которые приходится решать важное место занимает изучение и создание специальных конструкционных жаропрочных хромоникелевых сталей.

В подобных материалах нуждаются также отрасли промышленности, связанные с хранением, транспортировкой и очисткой водорода, применением емкостей высокого давления, трубопроводов и внутри корпусных

систем водородной энергетики и освоением перспективных водородогидридных технологий.

К наиболее распространенным конструкционным материалам следует отнести аустенитные хромоникелевые твердорастворноупрочняемые стали. Из них наибольшее распространение в отечественной промышленности получили стали типов 18-8 и подобные им композиции, стабилизированные титаном. Эти конструкционные материалы относительно жаростойки и жаропрочны, имеют высокое сопротивление общей коррозии и коррозионному растрескиванию, при оптимальном легировании они не склонны к межкристаллитной коррозии, относительно устойчивы против язвообразования и щелевой коррозии, а также могут быть использованы при низких и криогенных температурах. Аустенитные стали типа 18-8 технологичны, т.е. удовлетворительно деформируются при высоких температурах (ковка, прошивка, штамповка), а также выдерживают холодную гибку, развальцовку, правку и т.д. Стали хорошо свариваются.

Основным недостатком наиболее широко применяемых в России и за рубежом стабилизированных титаном или ниобием аустенитных хромоникелевых сталей типа 18-8 и подобных композиций является их высокая водородопроницаемость, обусловленная структурной неоднородностью (скопления, строчечность) и низкой сцепляемостью титан - и ниобийсодержащих фаз внедрения с матрицей

Перечисленные недостатки известных аналогов делают актуальной задачу повышения комплекса основных физико-механических свойств в аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей для увеличения работоспособности технологических систем энергетики, подвергающихся длительному воздействию высоких температур и водородосодержащих сред.

Исследования, связанные с выбором марочного состава водородостойких коррозионностойких сталей и оценкой их работоспособности выполнялись на металле лабораторных плавок.

Химический и фазовый состав исследуемых марок сталей выбирался с учетом имеющегося опыта эксплуатации широкого спектра коррозионностойких сталей и сплавов аустенитного класса, а также реальной возможности промышленного производства необходимых полуфабрикатов и заготовок отечественной металлургической промышленности.

Были учтены следующие факторы, подтвердившиеся в ходе дальнейших исследований:

Обеспечение весьма низкого содержания углерода (0,005-0,015 %) в предлагаемой стали необходимо как для весьма значительного снижения содержания карбидов и карбонитридов титана (особенно их скоплений), так и для обеспечения стойкости ее к межкристаллитной коррозии, что достигается применением особо чистых шихтовых материалов и вакуумной выплавки.

Ограничение содержания азота (0,005-0,01 %) при весьма низком содержании углерода способствует значительному снижению количества фаз внедрения.

Резкое снижение содержания углерода и азота в предлагаемой стали, может быть скомпенсировано только повышением содержания никеля до 12-14 % для обеспечения стабильности.

Ограничение содержания в стали азота при его определенном соотношении с углеродом и титаном обеспечивает снижение структурной неоднородности в металле, повышает энергию активации диффузионных процессов атомов водорода и снижает водородопроницаемость металла.

Ограничение содержания кислорода в предлагаемой стали (0,001-0,005 %) позволяет значительно снизить количество оксидов (0,5-1 балл), способствует улучшению технологичности стали при горячей обработке давлением, повышению газоплотности тонкостенных конструкций при операциях холодной пластической деформации.

Ограничение содержания фосфора (0,005-0,03 %) и серы (0,005-0,015 %) повышает стойкость разработанной стали против образования горячих трещин.

Однако, кроме количественного фактора, необходимо также учитывать направленность карбидов и неметаллических включений, т.к. требуется снизить и водородопроницаемость конструкционного материала

Введение в сталь типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ микролегирующих и модифицирующих добавок алюминия, иттрия и кальция в определённом соотношении улучшает ее структурную стабильность при рабочих температурах и, как следствие, весь комплекс основных физико-механических и служебных свойств.

Такое микролегирование приведет к снижению диффузионной подвижности атомов водорода в кристаллической решетке аустенитной стали, а также повысит работу зарождения и развития дислокационных и межзеренных хрупких трещин при водородном растрескивании в условиях статического и динамического нагружений.

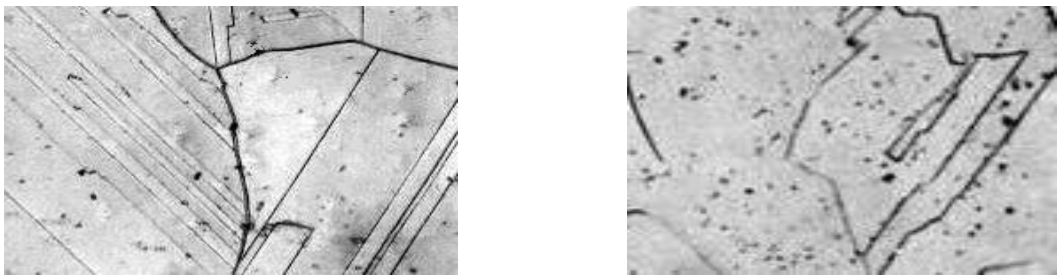
Модифицирование стали азотом в определенном соотношении с углеродом и титаном позволяет существенно улучшить структурную стабильность металла шва и зоны термического влияния, способствует формированию при соответствующей термообработке в достаточном количестве мелкодисперсных карбидных и нитридных фаз, термодинамически устойчивых при температурах технологических и сварочных нагревов.

Это обеспечит снижение структурной неоднородности в металле и повысит энергию активации диффузионных процессов атомов водорода. Одновременно с этим ожидается, что ограничение содержания азота, при определенном соотношении его с углеродом и титаном, будет способствовать сохранению необходимой коррозионно-механической прочности ос-

новного металла и сварного шва наряду с высокой пластичностью и вязкостью.

Применение вакуумной индукционной выплавки позволило снизить содержание серы, фосфора, кислорода, азота и других вредных элементов, способствующих образованию относительно легковесных оксидов, силикатов, сульфидов, нитридов, фосфидов по сравнению со сталями типа 18-8.

Что обеспечило более равномерное их распределение в материале: отсутствуют скопления фаз внедрения и направленное (строчечное) расположение фаз. Их количество в разработанной стали составило не более 0,5-1 балл.



а) *б)*

Рис. 1. Структура сталей после аустенизации:
а – 01Х18Н13ТЧ-ВИ: аустенит и карбиды титана, не растворившиеся при закалке, × 1200; *б*- 08Х18Н10Т: аустенит, содержащий двойники, и множество частиц карбидов TiC, × 1500

В качестве исходных шихтовых материалов для опытных плавок применялось чистое низкоуглеродистое железо марок 008ЖР, НЖ и др. с содержанием 0,003-0,002 % С и менее 0,025 % S и Р. Суммарное содержание сопутствующих примесей (Si, Mn, A1 и др.) находилось в пределах 0,15-0,25 %.

В качестве основных легирующих и модифицирующих добавок использовался низкоуглеродистый феррохром марок ФХ001 и ФХ002 с содержанием 0,01-0,02 %С, электролитический никель марок Н-1, Н-2.

Выплавка исследованных сталей производилась в вакуумных индукционных металлургических печах. Слитки обрабатывались на лабораторном и промышленном кузнечнопрессовом оборудовании с целью получения заготовок и полуфабрикатов необходимых размеров.

Структура исследуемых нержавеющих сталей, видимая с помощью световой микроскопии, представлена на рисунке 1.

После выбора и отработки оптимальной систем легирования из наиболее перспективных композиций изготавливались опытно-промышленные партии металла с последующим комплексным исследованием и оценкой работоспособности рекомендуемой марки стали применительно к условиям эксплуатации изделия.

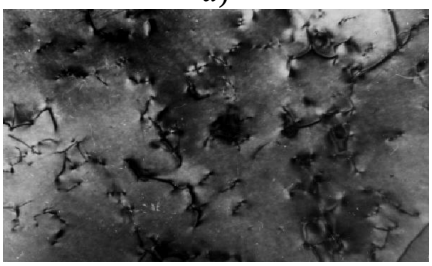
Режим термической обработки аустенитных сталей и сплавов, обеспечивающий мелкозернистую структуру с 6–8 баллом зерна, состоял из нагрева до 1050 °С, выдержки в течение I ч с последующим охлаждением в воде. Режим термической обработки, обеспечивающий крупнозернистую структуру с 1–3 баллом зерна, состоял из нагрева до 1200 °С, выдержки в течение 5 ч с последующим охлаждением в воде. Термообработанные по вышеописанным режимам исследованные аустенитные хромоникелевые материалы имели однофазную структуру аустенита.

Наибольшую информацию о тонкой структуре металла дает прямой метод электронно-микроскопического исследования.

Исследование тонкой структуры разработанной стали типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ и ее ближайшего аналога 03Х18Н13 проводилось на электронном просвечивающем микроскопе JEM 120.

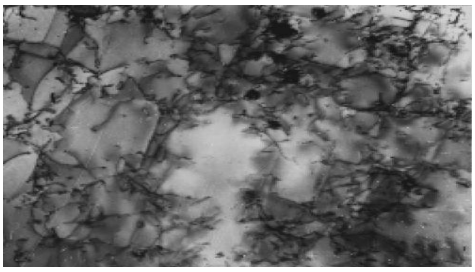
Анализ методом фольг показал, что после аустенизации 1050 °С характер распределения дисперсных частиц внутри на границах зерен является схожими с аналогом отличающимся только по размеру, у аналога больше в 1,5-2 раза (рис. 2, *а*, 3, *а*).

а)

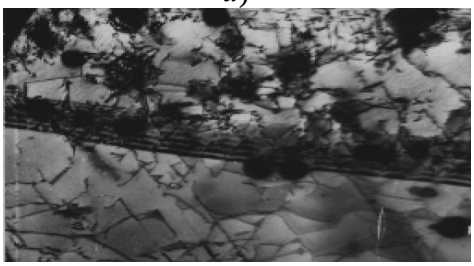


б)

Рис. 2. Тонкая структура стали типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ после закалки с 1050 °С (а), × 74000 и с 1100 °С и старения при 750 °С (б), × 40000



а)



б)

Рис. 3. Тонкая структура стали типа 03Х18Н13 после закалки с 1050 °С (а) и 1100 °С и старения при старения при 750 °С (б), × 60000

После закалки и старения структура стали практически не изменилась, увеличилась в 2 раза объемная плотность распределения частиц, дислокации расположены значительно равномернее по сравнению с аналогом (что свидетельствует о формирования в ней устойчивой дислокационной структуры).

Микродифракционного картина содержит только рефлексы аустенита установлено – в стали типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ более крупные частицы на границах двойников фаза TiC (рис. 2, *б*), у аналога - σ-фаза очень крупного размера (рис. 3, *б*).

Таким образом, в аустенизированном состоянии характер распределения дисперсных частиц в обеих сталях является схожим, они обнаружены как внутри, так и на границах зерен аустенита, внутри зерен частицы относительно равномерно распределены по объему, имеют сферическую форму и весьма дисперсны. Внутри зерен аустенита частицы более дисперсны в стали типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ.

Склонность исследуемых аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов к межкристаллитной коррозии устанавливали по методу АМ.

Самый длительный инкубационный период формирования карбидных и интерметаллидных фаз наблюдается в сталях типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ, при длительных выдержках до 500 часов в них не обнаружено выделений ни карбидов хрома и ни σ-фазы, что говорит об отсутствии склонности к межкристаллитной коррозии.

Это позволяет дать заключение о возможности использования предлагаемой свариваемой стали при повышенных температурах в хлорсодержащих средах.

Исследования высокотемпературной проницаемости водорода сквозь рассматриваемые материалы проводились объемно-метрическим методом.

При этом содержание хрома варьировалось от 18 до 19 %, никеля от 10 до 14 %, микролегирующих добавок РЗМ и иттрия от 0,005 до 0,05 % с различным сочетанием модифицирующих добавок и остаточных примесей.

Анализ полученных результатов по водородопроницаемости сквозь исследованные стали показал, что она зависит от химического состава, и, в частности, от содержания в твердом растворе хрома, никеля и примесных элементов.

Водородопроницаемость сталей типа 01Х18Н13ТЧ-ВИ в 1,5-2 раза превосходит свои ближайшие аналоги типа 18-8 (табл. 1).

Таблица 1

Константы проницаемости водорода технической чистоты сквозь хромоникелевые аустенитные стали в экспоненциальном выражении в температурном интервале 300-700 °С

Марка стали	$P_o \cdot 10^{-5}$, $см^3 \cdot мм/см^2 \cdot с \cdot атм^{0,5}$	E, ккал/г·атом	$P_{300\,°C} \cdot 10^{-5}$, $см^3 \cdot мм/см^2 \cdot с \cdot атм^{0,5}$
01Х18Н13ТЧ-ВИ	2,6	15,0	0,021
02Х19Н14ТЧ-ВИ	2,5	15,1	0,020
03Х18Н13	3,6	13,8	0,042
06Х18Н10Т	3,2	14,8	0,028

Испытания на стандартные механические характеристики (прочность и пластичность) проводились на разрывной испытательной машине ИМ–12А, дооборудованной электрической печью сопротивления, позволяющей проводить испытания при температурах до 900 °С. При испытаниях записывали диаграмму растяжения, по которой определяли стандартные механические характеристики (табл. 2).

Таблица 2

Механические характеристики сталей

Марка стали	Механические характеристики			
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
01Х18Н13ТЧ-ВИ	530	200	46	75
02Х19Н14ТЧ-ВИ	550	220	45	70
03Х18Н13	450	180	40	55
08Х18Н10Т	490	196	40	55
AISI 304L	440	155	40	55

Установлено повышение прочностных и пластических характеристик предлагаемой стали по сравнению с аналогами вследствие ее высокой структурной стабильности сравнению с аналогами типа 18-8 и 18-13.

Таким образом, были выявлены основные технологические приемы, позволяющие повысить технологичность, свариваемость, коррозионную, радиационную стойкость и снизить водородопроницаемость предложенной стали по сравнению с аналогами:

- снижение количества углерода для обеспечения коррозионной стойкости;

- ограничение суммарного содержания следующих элементов (алюминия и кремния не более 0,8 %; углерода и азота не более 0,025 %; серы и фосфора не более 0,04 %) для обеспечения гарантированного уровня физико-механических свойств;

- введение микролегирующих и модифицирующих добавок алюминия, иттрия и кальция, как элементов с высокими термодинамическими и особыми физико-химическими свойствами, обеспечивающими повышение всего комплекса физико-механических свойств;

- модифицирование стали азотом в определенном соотношении с углеродом и титаном с целью повышения термической стабильности, улучшения механических характеристик, коррозионной стойкости и снижения водородопроницаемости как основного металла, так и металла шва и зоны термического влияния при температурах технологических и сварочных нагревов.

- ограничение содержания кислорода для снижения количества оксидов.

Соотношение указанных легирующих и примесных элементов выбрано таким, чтобы был обеспечен требуемый уровень и стабильность важнейших структурно-чувствительных характеристик материала, определяющих высокую работоспособность и эксплуатационную надежность внутрикорпусных систем реакторных установок атомной и водородной энергетики.

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании работоспособности оболочек чехлов для гидридных изделий (тонкостенных сосудов и емкостей, мембранных и особотонкостенных конструкций и т.д.) и тепловыделяющих элементов ряда перспективных стационарных и транспортных АЭУ на стадии эскизного и технического проектирования.

Полученные данные представляют значительный научный и практический интерес также и при решении ряда других актуальных инженерных задач по материаловедческому обеспечению создания и строительства реакторных установок нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.В. Яковицкая, А.П. Петкова, Е.Д. Лесникова. Жаропрочность коррозионностойких аустенитных Cr-Mn-N, Cr-Ni-Mn-N и Cr-Ni сталей // Сборник «Формирование технической политики инновационных наукоёмких технологий». - СПб.: Изд-во: Политехн. Ун-та, 2009. - С. 480-481.
2. М.В. Яковицкая, А.П. Петкова. Исследование структурных изменений при длительном тепловом воздействии в Cr-Mn-N и Cr- Ni-Mn-N сталях // Труды XV международной научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций». - СПб.: Изд-во: СПбГУНиПТ, 2009. – С. 21-27.
3. Структурно-физические механизмы повышения радиационной стойкости, надежности, ресурса и экологической безопасности тонкостенных конструкций внутрикорпусных систем атомных энергетических установок / Луккен А.А. и [др.] // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ВУЗа «Системы и процессы управления и обработки информации» в 2 ч. – СПб.: Изд-во: СЗТУ, 2010. - Т. 2. - С. 347-354.
4. Повышение ресурса и надежности тонкостенных конструкций внутрикорпусных систем реакторных установок атомной и водородной энергетики / Ганзуленко О.Ю. и [др.] // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ВУЗа «Системы и процессы управления и обработки информации» в 2 ч. - СПб.: Изд-во: СЗТУ, 2010. - Т. 1. - С. 145-155.
5. A.M. Parshin, A.P. Petkova, M.V. Yakovitskaya. / А.М. Паршин, А.П. Петкова, М.В. Яковицкая. Propensity research to intercrystall corrosion

low-activated heat resisting austenitic high-strength Cr-Mn-N and Cr-Ni-Mn-N steels / Исследование склонности к межкристаллитной коррозии мало активируемых жаропрочных аустенитных высокопрочных Cr-Mn-N и Cr-Ni-Mn-N сталей // Advanced materials and operations society, Issue 2. - Vol. 1. – 2010 -. P. 124-129. / Сборник «Авангардни материали и обработки». - Вып. 2. - Т. 1. - 2010. - С. 124-129.

6. A.M. Parshin, A.P. Petkova, M.V. Yakovitskaya. / А.М. Паршин, А.П. Петкова, М.В. Яковицкая. Research of sort-time mechanical characteristics and cyclic strength in Cr-Mn-N and Cr-Ni-Mn-N steels / Исследование кратковременных механических характеристик и циклической прочности В Cr-Mn-N И Cr- Ni-Mn-N сталях // Advanced materials and operations society, Issue 2. - Vol. 1. - 2010. - P. 136-141. / Сборник «Авангардни материали и обработки». - Вып. 2. - Т. 1. – 2010. - С. 136-141.
7. Разработка радиационно-стойкой дисперсионно-твердеющей хромоникелевой стали для внутрикорпусных систем АЭУ / Кириллов Н.Б. [др.] // Научно-технические ведомости СПб ГПУ, сер. Наука и образование. - СПб.: Изд-во: Политехнического университета. – 2011. - № 2(123). - С. 149-155.
8. В.А. Жуков. Критерий малоциклового разрушения. // Материалы Международной научно-производственной конференции «Современное машиностроение. Наука и образование».- СПб.: Изд-во: Политехнического университета, 2011. - С. 219-229.
9. Водородопроницаемость и работоспособность аустенитных сталей и сплавов в водородосодержащих средах / Ганзуленко О.Ю. и [др.] // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Сер. Наука и образовани. – СПб.: Изд-во: Политехнического университета, 2011. - № 2 (123). - С. 218-224.
10. Повышение водородостойкости аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей для высокотемпературных технологических систем энергетических установок / Ганзуленко О.Ю. и [др.] // Научно-технические ведомости СПб ГПУ, Сер. Наука и образование. - СПб.: Изд-во: Политехнического университета, 2012. - № 3-2(154). - С. 159-166.
11. М.В. Яковицкая. Повышение работоспособности аустенитных коррозионностойких сталей для высокотемпературных технологических систем энергетических установок [Электронный ресурс] // Науковедение. № 1. 2013. .http://naukovedenie.ru/PDF/32tvn113.pdf.

M.V. Yakovitskaya, A.P.Petkova

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUSTENITIC CHROMIUM-NICKEL STEELS FOR POWER

St. Petersburg State Polytechnical University, Russia

Abstract

The report proposed a set of methods to improve the physical and mechanical properties of austenitic corrosion-resistant chromium-nickel steels for power engineering technology systems, prolonged exposure to high temperatures and hydrogen environments. Studies have shown that the proposed technology can be used to increase the efficiency of power equipment.

Key words: corrosion-resistant steel, mechanical properties, austenization, hydrogen permeability.

REFERENCES

[1] M.V. Yakovitskaya, A.P. Petkova, E.D. Lesnikova. Jaroprochnost korrozionnostoikih austenitnyh Cr-Mn-N, Cr-Ni-Mn-N i Cr-Ni stalei // Sbornik “Formovanie tehnicheskoi politiki innovacionnyh naukoemkih tehnologii”.-SPb.: Izd-vo: Politehn. Un-ta, 2009. – p. 480-481.

[2] M.V. Yakovitskaya, A.P. Petkova. Issledovanie strukturnyh izmenenii pri dlitelnom teplovom vozdeistvii v Cr-Mn-N i Cr-Ni-Mn-N stalyah// Trudy XV mejdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii “Problemy resursa i bezopasnoi ekspluatacii materialov i konstrukcii”. – SPb.: Izd-vo: SPbGUNiPT, 2009. – p.21-27.

[3] Strukturno-fizicheskie mehanizmy povysheniya radiacionnoi stoikosti, nadejnosti, resursa i ekologicheskoi bezopasnosti tonkostennyh konstrukcii vnutrikorpusnyh system atomnyh energeticheskih ustanovok / Lukken A.A. i [dr.] // Trudy Mejdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii, posvyashennoi 80-letiyu VUZa “Sistemy i processy upravleniya i obrabotki informacii” v 2 ch. – SPb.: Izd-vo: SZTU, 2010. – T.2.-p.347-354.

[4] [Povyshenie resursa i nadejnosti tonkostennyh konstrukcii vnutrikorpusnyh system reaktornyh ustanovok atomnoi i vodorodnoi energetiki/ Ganzulenko O.Yu. i [dr.] // Trudy Mejdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii, posvyashennoi 80-letiyu VUZa “Sistemy i processy upravleniya I obrabotki informacii” v 2 ch. – SPb.: Izd-vo: SZTU, 2010. – T.1. – p. 145-155.

[5] A.M. Parshin, A.P. Petkova, M.V. Yakovitskaya. Propensity research to intercrystall corrosion low-activated heat resisting austenitic high-strength Cr-Mn-N and Cr-Ni-Mn-N steels / Advanced materials and operations society, Issue 2. - Vol. 1. – 2010 -. P. 124-129.
[6] A.M. Parshin, A.P. Petkova, M.V. Yakovitskaya. Research of sort-time mechanical characteristics and cyclic strength in Cr-Mn-N and Cr-Ni-Mn-N steels / Advanced materials and operations society, Issue 2. - Vol. 1. - 2010. - P. 136-141.
[7] Razrabotka radiacionno-stoikoi dispersionno-tverdeyushei hromonikelevoi stali dlya vnutrikorpusnyh system AEU/ Kirillov N.B. [dr.] // Nauchno tehnicheskie vedomosti SPbGPU, ser. Nauka i obrazovanie. – SPb.:Izd-vo: Polytehnicheskogo universiteta. – 2011. - №2(123). – p. 149-155.
[8] Zhukov. Kriterij malociklovogo razrusheniya. // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-proizvodstvennoj konferencii «Sovremennoe mashinostroenie. nauka i obrazovanie» SPB.: Izd-vo: Politexnicheskogo universiteta, 2011. - p. 219-229.
[9] Vodorodopronicaemost i rabotosposobnost austenitnyh stalei i splavov v vodorodosoderjashih sredah / Ganzulenko O.Yu. i [dr.] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ser.Nauka i obrazovanie. – SPb.: Izd-vo: Polytehnicheskogo universiteta, 2011. - №2(123). – p. 218-224.
[10] Povyshenie vodorodostoikosti austenitnyh korrozionnostoikih hromonikelevyh stalei dlya vysokotemperaturnyh tehnologicheskih system energeticheskih ustanovok / Ganzulenko O. Yu. i [dr.] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ser.Nauka i obrazovanie. – SPb.: Izd-vo: Polytehnicheskogo universiteta, 2012. - №3-2 (154). – p. 159-166.
[11] M.V. Yakovitskaya. Povyshenie rabotosposobnosti austenitnyh korrozionnostoikih stalei dlya vysokotemperaturnyh tehnologicheskih system energeticheskih ustanovok [Elektronnyi resurs] // Naukovedenie. №1.2013. http://naukovedenie.ru/PDF/32tvn113.pdf.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.83

Я.А. АНДРЕЕВА

ДИНАМИЧЕСКОЕ УРАВНОВЕШИВАНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Яна Андреевна Андреева, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, Новокузнецк
Тел.: (3843)465791, E-mail: Naika1611@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача полного уравновешивания самоустанавливающихся многосателлитных планетарных механизмов. Изложен пример послойного статического уравновешивания двухсателлитного планетарного механизма, содержащего в своей структуре четырехзвенную группу Ассура.

Ключевые слова: планетарный механизм, зубчатый механизм, сателлит, уравновешивание.

Решение задач анализа и синтеза механизмов, содержащих рычажные звенья, начинают с составления их кинематических схем, т.е. с их строения, структуры. Обычно кинематические или структурные схемы изображают в плоскости движения составляющих механизм звеньев, т.е. в плоскости, перпендикулярной геометрическим осям используемых в схемах шарниров. Однако такой подход нельзя назвать исчерпывающе доказательным с точки зрения полной работоспособности создаваемого механизма. Не каждая схема, прорисованная в плоскости движения звеньев, оказывается проворачиваемой, т.е. реально работоспособной. На практике проблема слойности механизмов [1], как правило, передается на рассмотрение конструкторов, которые занимаются проектированием уже кинематически и динамически исследованных механизмов.

Профильное рассмотрение механизмов широко используется для исследования сложных зубчатых редукторов – планетарных [2-6]. На рис. 1 показан односателлитный планетарный механизм в профильной (рис. 1, а) и фасной плоскостях (рис. 1, б). Такой механизм работает в трех слоях: I – слой, в котором вращаются центральное колесо и сателлит; II – слой, в котором устанавливается шарнир, соединяющий сателлит и водило; III – слой, в котором соединяется водило со стойкой (опорным колесом).

Принципиальная особенность кинематических цепей зубчато-рычажных механизмов заключается в том, что в них используются высшие

кинематические пары, пары четвертого класса, звенья которых контактируют в точках. Поэтому не возникает необходимости в создании для них параллельных слоев.

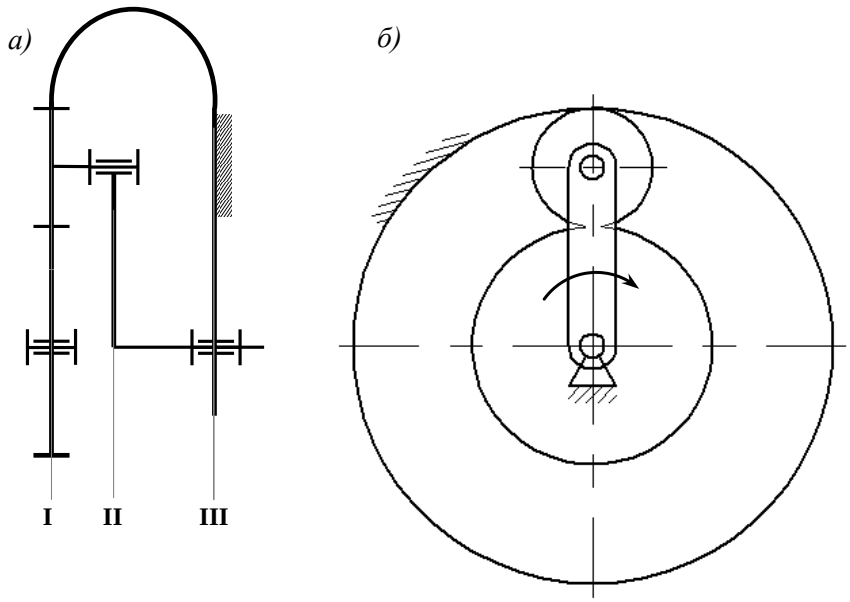


Рис. 1– Планетарный механизм в профильной и фасной плоскостях

Одноподвижные кинематические пары – шарниры связывают геометрические оси звеньев постоянно, и выстроить такие пары в один слой, зачастую, не представляется возможным. На этом основании планетарный механизм, показанный на рис. 1, создается в три слоя – по числу использованных в нем вращательных кинематических пар.

При создании самоустанавливающихся планетарных механизмов, в состав которых входят не только зубчатые колеса, но и рычажные звенья, число слоев, в которых этот механизм может быть размещен, рассчитывается по следующей формуле [7]

$$f_{\max} = p_5 - k + 1, \qquad (1)$$

где p_5 – число кинематических пар пятого класса – шарниров; k – количество сателлитов планетарной передачи.

Необходимо отметить, что формула (1) применима для определения максимального количества слоев, в которых может быть расположен механизм, только для планетарных передач, т.к. фактически все рычажные звенья, входящие в их состав, вращаются вокруг неподвижной центральной геометрической оси, что позволяет разместить несколько шарниров одного звена в один слой. Входящая в формулу (1) цифра «1» отражает слой расположения вращательной кинематической пары, образованной водилом и стойкой.

Синтез уравновешенных планетарных механизмов [8], в которых нагрузка, передаваемая сателлитами, распределяется между ними равномерно, предполагает присоединение к ведущему центральному колесу группы звеньев нулевой подвижности. При таком подходе создаваемый планетарный механизм по формуле П.Л. Чебышева [9] будет обладать подвижностью равной единице. На рис. 2, а показан пример реализации структурного синтеза уравновешенных планетарных механизмов к созданию двухсателлитной передачи. Планетарный механизм содержит в своей структуре центральное подвижное колесо 1 с внешним зацеплением, неподвижное опорное колесо 6 с внутренним зацеплением, два сателлита 2 и 3, соединенные с водилом 5 через трехпарное звено 4. Благодаря такому соединению, сателлиты имеют возможность самоустанавливаться относительно ведущего и неподвижного колес.

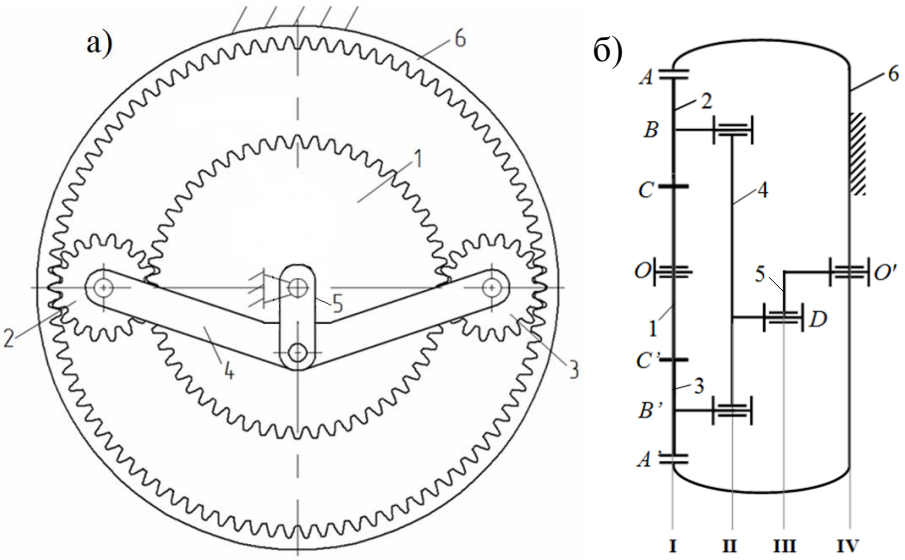


Рис. 2 – Двухсателлитный планетарный механизм с четырехзвенной группой Ассура

Для обеспечения условия подвижности $W=1$ такой механизм выполняется с применением четырехзвенной группы Ассура (звенья 2, 3, 4, 5), присоединенной к ведущему центральному колесу 1. В механизме число подвижных звеньев n=5: колеса 1, 2, 3, трехпарное звено 4 и водило 5; число шарниров p_5=5 – это соединения с опорой колеса 1 и водила 5, соединение колес 2 и 3 с трехпарным звеном 4, соединение водила 5 с трехпарным звеном 4; число кинематических пар p_4=4: контакты сателлитов 2 и 3 соответственно с колесами 1 и 6. По формуле [9]

$$W=3\cdot 5-2\cdot 5-4=1, \qquad (2)$$

что доказывает отсутствие избыточных связей и работоспособность

самоустанавливающегося двухсателлитного планетарного механизма.

В соответствии с формулой (1) такой механизм может быть выполнен четырехслойным:

$$f_{\max} = 5 - 2 + 1 = 4. \quad (3)$$

Схема двухсателлитного самоустанавливающегося планетарного механизма в профильной плоскости показана на рис. 2, б.

При решении проблемы слойности на этапе проектирования новых самоустанавливающихся планетарных механизмов, возникает задача их динамического уравновешивания. При движении сателлита, имеющего смещенную относительно оси вращения всего механизма массу, в механизме появляется дисбаланс сил, вызванный переменной по направлению инерционной силой сателлита, что в итоге вызывает динамическую неуравновешенность и может приводить к перегрузкам и разрушению подшипниковых опор всего механизма.

Задача динамического уравновешивания планетарного механизма сложной структуры может быть решена путем послойного статического уравновешивания вращающихся звеньев [10, 11].

При вращении звеньев механизма на его опоры действуют динамические реакции, т.е. реакции, зависящие от ускорений (иначе – от сил инерции). Для полного устранения этих реакции необходимо, чтобы главный вектор F_u и главный момент сил инерции M_u были равны нулю в любой момент движения:

$$F_u = 0; \quad M_u = 0. \quad (4)$$

Для статического уравновешивания необходимо в направлении, противоположному центру масс, установить корректирующую массу $m_П$ на расстоянии $r_П$ от оси вращения.

Условие статического уравновешивания механизма примет вид

$$F_{uП} = \sum F_u , \quad (5)$$

из которого определяются параметры необходимого противовеса. При вращении звеньев сила инерции корректирующей массы окажется равной и противоположной силе инерции F_u неуравновешенных звеньев. Результирующая сила инерции при этом условии равна нулю.

Уравновешивание двухсателлитного самоустанавливающегося планетарного механизма в I слое достигается путем диаметрально противоположной установки сателлитов. В связи с этим, требуется уравновесить силы инерции от рычажных звеньев механизма лишь в слоях

II и III. В этом случае условие уравновешивания по слоям запишется в виде

$$\overline{F}_{u\,f} = \overline{F}_{u\,П}, \tag{6}$$

где $\overline{F}_{u\,f}$ – сила инерции звена, расположенного в слое f.

При установке противовеса противоположно центру масс звена относительно геометрической оси механизма данное уравнение может быть записано в скалярном виде

$$m_f r_{s\,f} = m_П r_{s\,П} \overline{F}_{u\,П}, \tag{7}$$

где m_f и $r_{s\,f}$ – масса и расстояние до центра тяжести соответственно звена, лежащего в слое f.

Из условия (7) в дальнейшем подбираются масса и место установки противовеса.

Исходя из поставленной задачи, предлагается один из вариантов конструктивного исполнения динамически уравновешенного двухсателлитного планетарного механизма, представленного на рис. 3. Уравновешивание силы инерции от трехпарного промежуточного звена достигается за счет его исполнения в форме кольца, причем радиус средней линии кольца принимается равным межосевому расстоянию механизма. Уравновешивание силы инерции от водила достигается путем выполнения водила в форме стержня, длина которого равна двум межосевым расстояниям.

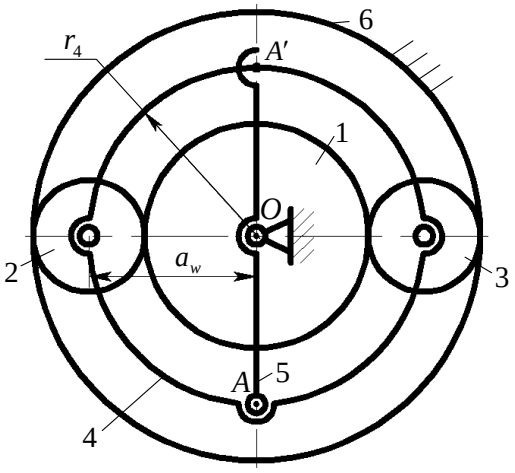


Рис. 3 – Уравновешенный двухсателлитный планетарный механизм

Новая конструкция двухсателлитного планетарного механизма заявлена в Роспатент как полезная модель.

Таким образом, решение задачи полного уравновешивания многосателлитных планетарных механизмов, созданных с использованием группы звеньев нулевой подвижности, достигается путем их послойного статического уравновешивания, или выполнением рычажных звеньев в форме тел, центр масс которых находится на геометрической оси механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников Л.Т. Исходные основания к изучению проворачиваемости и слойности плоских рычажных механизмов // МашиноСтроение: материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2006.– №16. – С. 3-16.
2. Андреева Я.А. Проблемы совершенствования трехсателлитных планетарных механизмов / Я.А. Андреева, И.А. Жуков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2012. – №1. – С. 23-26.
3. Андреева Я.А. Кинематический анализ трехсателлитного планетарного механизма с четырехзвенной группой Ассура / Я.А. Андреева, И.А. Жуков // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы II Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 126-132.
4. Андреева Я.А. Исследование кинетостатики трехсателлитного планетарного механизма с четырехзвенной группой Ассура / Я.А. Андреева, И.А. Жуков // Современные проблемы теории машин: Материалы I международной заочной научно-практической конференции / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013.– С. 9-15.
5. Герасимов С.П., Дворникова Е.В. О группах Ассура применительно к планетарным зубчатым механизмам // Успехи современного естествознания. – 2012. – №6. – С. 150.
6. Шеломов В.Б. Структурный синтез кинематических схем планетарных коробок передач // Теория механизмов и машин. – 2010. – №15, Т.8. – С. 52-61.
7. Андреева Я.А. Решение проблемы слойности многосателлитных самоустанавливающихся планетарных механизмов / Я.А. Андреева, И.А. Жуков // Вестник КузГТУ. – 2013. – №1. – С. 65-68.
8. Андреева Я.А. Решение проблемы создания планетарных редукторов с равномерным распределением нагрузки по сателлитам / Я.А. Андреева, Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – №4. – С. 2-8.

9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. Изд. 3-е. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
10. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1990. – 592 с.
11. Андреева Я.А. Уравновешивание сил инерций в самоустанавливающемся планетарном механизме // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – Вып. 16. – Ч. II. Технические науки. – С. 175-178.

Ya. A. Andreeva

DYNAMIC EQUILIBRATION OF PLANETARY GEARS OF DIFFICULT STRUCTURE

Siberian state industrial university, Russia

Abstract

In work the problem of a full equilibration of self-established multisatellite planetary gears is considered. The example of a layer-by-layer static equilibration of the two-satellite planetary gear containing in the structure four-unit group of Assur is stated.

Keywords: planetary gear, gear mechanism, satellite, equilibration.

REFERENCES

[1] Dvornikov L.T. The initial bases to studying of a crank and a ply of flat lever gears // Mechanical engineering: materials of the sixteenth scientific and practical conference on mechanics and mechanical engineering problems. – Novokuznetsk: Prod. center of SibSIU, 2006. – №16. – P. 3-16. (rus.)
[2] Andreeva Ya.A. Problems of improving three satellite planetary mechanisms / Ya.A. Andreeva, I.A. Zhukov // Bulletin of the Siberian state industrial university. – 2012. – №1. – P. 23-26. (rus.)
[3] Andreeva Ya.A. Kinematic analysis of three satellite planetary mechanism with four-links group of Assur / Ya.A. Andreeva, I.A. Zhukov // Modern engineering. Science and education: materials of the II International scientific-practical conference. – SPb.: Publishing house of Politechn. university, 2012. – P. 126-132. (rus.)
[4] Andreeva Ya.A. Research of kinetostatics three satellite planetary mechanism with four-links group of Assur / Ya.A. Andreeva, I.A. Zhukov // Modern problems of theory of machines: Materials of I

international correspondence scientific-practical conference. – Novokuznetsk: Pub. center of SibSIU, 2013. – P. 9-15. (rus.)
[5] Gerasimov S.P., Dvornikova E.V. About groups of Assur with regard to planetary gear mechanisms // Successes of modern natural science. – 2012. – №6. – P. 150. (rus.)
[6] Shelomov V.B. Structural synthesis of kinematical planetary gearboxes // Theory of mechanisms and machines. – 2010. – №15, Vol. 8. – P. 52-61. (rus.)
[7] Andreeva Ya.A. Solution of the problem of a ply of multisatellite self-established planetary gears / Ya.A. Andreeva, I.A. Zhukov // Messenger of KuzSTU. – 2013 . – №1. – P. 65-68. (rus.)
[8] Andreeva Ya.A. Solution of the problem of creation of planetary reducers with an equal distribution of loading on satellites / Ya.A. Andreeva, L.T. Dvornikov, I.A. Zhukov // Mechanical engineering and engineering educations. – 2013 . – №4. – P. 2-8. (rus.)
[9] Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines. – M.: Science, 1975. – 640 p. (rus.)
[10] Levitsky N.I. Theory of mechanisms and machines. – M.: Science, 1964. – 281 p. (rus.)
[11] Andreeva Ya.A. Balancing the forces of inertias in self-aligning planetary system // Science and youth: problems, searches, solutions. – Novokuznetsk: SibSIU, 2012. – Vol. 16. – Part II. Technical Sciences. – P. 175-178. (rus.)

УДК 621.436: 621.43.019.2

А.А. Гаврилов[1], А.Н. Гоц[2]

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИКЛА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

[1]Александр Алексеевич Гаврилов, д.т.н., профессор Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых»
Россия, Владимир
Тел.: (4922)479-940, факс: (4922)361-981

[2]Александр Николаевич Гоц, д.т.н., профессор Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых»
Россия, Владимир
Тел.: (4922)479-940, E-mail hotz@mail.ru.

Аннотация

Показано, что на величину давления p в цилиндре поршневого двигателя оказывают основное влияние четыре фактора: изменение текущего объёма цилиндра V; изменение массы рабочего тела при газообмене M; подвод теплоты, выделившейся при сгорании топлива Q_x и теплообмен со стенками внутрицилиндрового пространства Q_w. Если знать оценку вклада каждого из этих факторов на изменение давления рабочего тела в цилиндре, то это позволит целенаправленно совершенствовать процессы в поршневом двигателе. Математическая модель представлена в квазистационарной постановке, однако она позволяет обеспечивает получение требуемых результатов в расчётных исследованиях, особенно при доводке двигателя до требуемых показателей.

Ключевые слова: поршневой двигатель, рабочее тело, давление, газообмен, сгорания, задержка воспламенения

Введение. Качество протекания процессов в циклах поршневого двигателя (ПД) оценивается по изменению давления рабочего тела в цилиндре $p = f(\varphi)$ от угла поворота коленчатого вала (φº ПКВ). Сравнение теоретической и экспериментальной индикаторной диаграмм $p = f(\varphi)$ позволяет судить об адекватности математической модели цикла в ПД. На величину давления p оказывают основное влияние четыре фактора: изменение текущего объёма цилиндра V; изменение массы рабочего тела при газообмене M; подвод теплоты, выделившейся при сгорании топлива

Q_x и теплообмен со стенками внутрицилиндрового пространства Q_w. Если знать оценку вклада каждого из этих факторов на изменение давления рабочего тела в цилиндре, то это позволит целенаправленно совершенствовать процессы в ПД. Несмотря на простоту в квазистационарной постановке, предлагаемая математическая модель процессов в ПД, во многих случаях обеспечивает получение требуемых результатов в расчётных исследованиях. Для ориентировки в характерных участках цикла четырехтактного двигателя на рис. 1 приведена схема индикаторной диаграммы цикла четырехтактного двигателя с выделением точек начала и конца тактов.

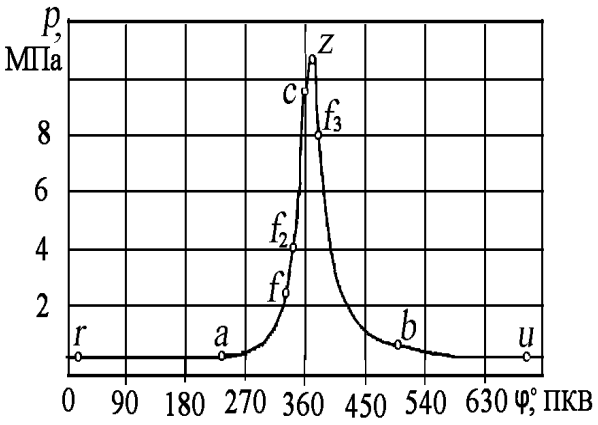


Рис. 1. Схема индикаторной диаграммы $p = f(\varphi)$: u, a – начало и конец процесса впуска; b, r – начало и окончание процесса выпуска; f – момент подачи искры в двигателе с принудительным зажиганием или начала впрыска топлива в двигателях с воспламенением смеси от сжатия; f_2 – начало резкого повышения давления при сгорании топлива (видимого горения); c – верхняя мертвая точка (ВМТ); z – максимальное давление при сгорании топлива; f_3 – условный момент окончания процесса сгорания топлива

В рассматриваемой модели цикла используются уравнения: термодинамических процессов, баланса энергии, сохранения массы, состояния и эмпирические зависимости. При описании массовых и тепловых потоков приняты индексы: *c*- цилиндр; *s* - впускной, *p* - выпускной трубопроводы; *cs* – перетекание газа из цилиндра во впускной ресивер.

Цель исследования. Провести анализ опубликованных результатов исследований по математических моделях циклов для ПД, работающих жидком топливе, и дать рекомендации по использовании моделей при расчете.

Результаты исследования и их обсуждение. Зависимость давления рабочего тела в цилиндре от указанных выше факторов описывается функцией $p = f(V, M, Q_x, Q_w)$, производная которой по времени $d\tau$ представляет сумму частных производных:

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{\partial p}{\partial V}\frac{dV}{d\tau} + \frac{\partial p}{\partial M}\frac{dM}{d\tau} + \frac{\partial p}{\partial Q_x}\frac{dQ_x}{d\tau} + \frac{\partial p}{\partial Q_w}\frac{dQ_w}{d\tau}. \qquad (1)$$

Для вывода уравнения, учитывающего изменение давления в цилиндре от объёма V в течение цикла, $(dp/d\tau)_{V_{var}} = (\partial p/\partial V)(dV/d\tau)$, используется уравнение $pV^k = \text{const}$, где значение показателя k зависит от состава и процесса изменения состояния рабочего тела.

При постоянной массе M и $Q_x = Q_w = 0$

$$\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_{V_{\text{var}}} = -\frac{k\,p}{V}\frac{dV}{d\tau}\,, \qquad (2)$$

где $\frac{\partial p}{\partial V} = -\frac{k\,p}{V}$, $\frac{dV}{d\tau} = \omega F_p R\left(\sin\varphi + \frac{\lambda}{2}\sin 2\varphi\right)$, ω – угловая скорость; F_p – площадь поршня; $\lambda = R/L$; R – радиус кривошипа; L – длина шатуна.

Уравнение (2) является основным при моделировании процессов сжатия и расширения. Текущая температура вычисляется по уравнению состояния. Второе слагаемое в (1), учитывает зависимость давления в цилиндре от изменения массы рабочего тела в процессе газообмена (на рис. 1 участок $b-u-r-a$) при условии V =const и $Q_x = Q_w = 0$, то есть, изменение давления обусловлено только перемещением масс газов между цилиндром и трубопроводами

$$(dp/d\tau)_{M_{\text{var}}} = (\partial p/\partial M)(dM/d\tau). \qquad (3)$$

Сомножитель $dM/d\tau = G$ представляет расход продуктов сгорания или свежего заряда G_1 при массообмене между системами. Для определения частной производная $\partial p/\partial M$ использовались уравнения: баланса приращений внутренних энергий $dU/d\tau = dU_p/d\tau + dU_s/d\tau$; $U = C_v T M$ и $pV = RTM$, где $dU/d\tau$ – приращение внутренней энергии рабочего тела в цилиндре; $dU_p/d\tau$ и $dU_s/d\tau$ – приращения от внутренних энергий газов, участвующих в массообмене между выпускным (индекс p) и впускным (s) трубопроводами.

Температуры T и теплоёмкости C_v зависят от направления перетекания рабочего тела между цилиндром и трубопроводами. После преобразований получено значение сомножителя в (3) $\partial p/\partial M = RT/(C_v V)$, а $\partial U/\partial M = C_v T$.

Таким образом, уравнения для расчета процесса газообмена, учитывающие все возможные перетекания рабочего тела между цилиндром и трубопроводами имеют вид:

- приращение массы рабочего тела в цилиндре

$$dM/d\tau = -G_{cp} + G_{pc} - G_{cs} + G_{sc} + G_{1sc} - G_{1cs}\,; \qquad (4)$$

- приращение давления в цилиндре

$$\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_{M_{\text{var}}} = \frac{R}{C_v V}\left(-C_v T G_{cp} + (C_v)_p T_p G_{pc} + (C_v)_s T_s (G_{sc} + G_{1sc}) - C_v T (G_{sc} + G_{1sc})\right), \qquad (5).$$

где G_{cp}, G_{pc} – расходы газов при их истечении в выпускной трубопровод и их возможном $(p_P \succ p_c)$ возврате в цилиндр; G_{cs}, G_{sc} – расходы газов при забросе $(p_c \succ p_S)$ во впускной трубопровод при перекрытии клапанов и возврате в цилиндр; G_{1sc}, G_{1cs} – расходы свежего заряда при впуске и обратном выбросе $(p_c \succ p_S)$ рабочего тела из цилиндра во впускной

трубопровод в такте сжатия; $C_v, (C_v)_p, (C_v)_s$ – изохорные теплоемкости рабочего тела в цилиндре, выпускном и впускном трубопроводах, соответствующие температурам T, T_p, T_s.

Сгорание топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя – сложный процесс. Попытки описать его с помощью математического аппарата с высокой степенью достоверности приводят к существенному усложнению моделей и программ расчета циклов. Во многих случаях можно использовать более простые модели процесса сгорания топлива, обеспечивающие при принимаемых допущениях результаты, удовлетворяющих целям исследования. При расчете цикла важное значение имеет точность определения **начало видимого горения (**начала подвода теплоты к рабочему телу – точка f_2, см. рис.1). Расположение точки f_2 относительно ВМТ существенно влияет на индикаторную работу и КПД цикла.

Положение точки f_2 зависит от момента подачи искры в двигателе с принудительным зажиганием или начала впрыска топлива в двигателе с воспламенением от сжатия (точка f и соответствующий этой точке на индикаторной диаграмме угол ПКВ φ_f) и углового $\varphi_i = \varphi_{f_2} - \varphi_f$ или временного τ_i промежутка ПКВ между точками f и f_2. Этот промежуток называют задержкой воспламенения смеси (ЗВС) τ_i. В практике положение точек f, f_2 и z обычно определяется относительно ВМТ.

Угол φ_f является регулировочным параметром, поэтому при расчете цикла принятое значение его включается в исходные данные.

Сложность учета влияния различных факторов на продолжительность ЗВС обусловила большое разнообразие эмпирических или полуэмпирических формул для расчета времени τ_i, которое существенно усложняет их выбор для конкретной модели. В работе [1, табл. 8.6] приведен анализ структуры, условий и способов получения формул для определения τ_i (анализируется 19 полуэмпирических и экспериментальных зависимостей различных авторов), имеющих в основном следующую структуру:

$$\tau_i = B \cdot p^{-n} \cdot T^{-m},$$

где B = const – некоторая постоянная величина; p, T – давление и температура в момент впрыскивания топлива или подачи искры.

Анализируя приведенную зависимость, отметим следующее:

- главными факторами, влияющими на продолжительность ЗВС τ_i, являются значения давления p_f и температуры T_f в точке f, так как они присутствуют в большинстве зависимостей;
- оценить вклад p_f и T_f в численное значение τ_i затрудняет значительный разброс в формулах величин сомножителей;

- использование большинства формул, приведенных в [1, 6-10], дает результаты нереальные для двигателей с частотой вращения n_e > 2000 мин$^{-1}$.

Учитывая изложенное, авторами были выполнены исследования и определены вклады различных факторов в значение времени ЗВС τ_i на дизеле и бензиновом двигателе (таблица).

Таблица

Вклады p_f и T_f в значение τ_i

МодельПД	n_e, Мин$^{-1}$	φ°_f, ПКВ до ВМТ	τ_i, мс	φ°_i	δ_B	δ_p	δ_T
Д-130	2000	24	1,63	20	0,184	0,539	0,277
ЗМЗ-409	4400	24	0,753	20	0,189	0,534	0,277
Различие					2,6%	0,9%	0

Приведенные в таблице результаты позволили сформировать структуру новой формулы для расчета продолжительности ЗВС τ_i

$$\tau_i = B_i \, \alpha \, w_p^{-k} \, p_f^{-n} \, T_f^{-m}, \qquad (6)$$

где B_i=1.0 – сомножитель, который при корректировке φ_i по экспериментальным данным или учете дополнительных факторов, может иметь значение отличное от единицы; p_f, T_f – давление, Па и температура, К в точке *f* (см. рис. 1); w_p – средняя скорость поршня, м/с; k = 0,754; n = =0,242; m = 0,270.

Вклад определяющих факторов в продолжительность ЗВС составляет: давление p_f – $\delta_p \approx$ 50 %; температура T_f – $\delta_T \approx$ 25 %; средняя скорость поршня w_p – $\delta_w \approx$ 20 %; остальные факторы ≈ 5 %.

Показатели степени в формуле (6) могут находиться в диапазонах:

n = 0,236…0,242; m = 0,267…0,270; k = 0,754.

Уточнение показателей в формуле (6) целесообразно выполнять только при наличии экспериментальной индикаторной диаграммы или данных с прототипа двигателя.

Для определения третьего слагаемого в (1) $(dp_c/d\tau)_{Q_x \text{var}} = (\partial p_c/\partial Q_x)(dQ_x/d\tau)$ используется уравнение баланса энергии

$$Q_x = (U_x - U_{f_2}) + pV, \qquad (7)$$

где $Q_x = xQ_z$ – текущее количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива; x – характеристика тепловыделения (выгорания топлива) [1, 5]; Q_z – количество теплоты, выделившейся при сгорании цикловой дозы топлива; U_{f2}, U_x – внутренние энергии рабочего тела в цилиндре в начале и в данный момент процесса сгорания.

Приращение

$$dQ_x/d\tau = Q_z(dx/d\tau). \qquad (8)$$

Приращение внутренней энергии $U_x - U_{f2}$ происходит также в соответствии с характеристикой тепловыделения

$$d\left(U_x - U_{f_2}\right)/d\tau = \left(U_x - U_{f_2}\right)(dx/d\tau). \qquad (9)$$

В начале процесса сгорания $Q_x = 0$, а в конце $Q_X = Q_z = \xi\left(H_u - \Delta H_u\right)(m_c / M)$.

Здесь ξ – коэффициент использования теплоты; H_u – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг; m_c – цикловая масса топлива, кг; M – масса свежего заряда; ΔH_u – неполнота выгорания топлива (в бензиновом и газовом двигателях при $\alpha < 1$, а в дизеле при α<1,3) Дж/кг.

Таким образом, производная для третьего слагаемого в уравнениях (2) и (3) с учётом уравнений (8) и (9) принимает вид

$$\left(dp/d\tau\right)_{Q_x \text{var}} = \frac{1}{V}\left[Q_z - \left(U_x - U_{f_2}\right)\right]\frac{dx}{d\tau}. \qquad (10)$$

где $dx/d\tau$ – скорость выделения теплоты в процессе сгорания топлива.

Достоверные характеристики тепловыделения получают при обработке экспериментальных индикаторных диаграмм. При математическом моделировании процесса сгорания обычно используют характеристику тепловыделения *x*, которая описывается экспонентой [1- 5]

$$x = \Delta Q_x / Q_z = 1 - e^{K_x\left(\varphi_x/\varphi_{f2 f3}\right)^{m+1}}, \qquad (11)$$

где Q_z – количество теплоты, выделившейся при сгорании цикловой дозы топлива; ΔQ_x – количество теплоты, выделившейся к расчетному промежутку времени (сумме шагов расчета); $K_x = \ln\left(1 - x_{\max}\right)$ – коэффициент, зависящий от относительного количества сгоревшего топлива; при практически полном выгорании $x_{\max} = 0{,}999$ $K_x = -6{,}908$, а если $x_{\max} = 0{,}95$ $K_x \approx -2{,}99$; $\varphi_{f_2 f_3}$ и φ_x – продолжительность сгорания в градусах поворота коленчатого вала (град. ПКВ) и текущий угол от начала сгорания; m – показатель характера сгорания.

Доля топлива, выгоревшая за время, соответствующее шагу расчета $\Delta\varphi$, вычисляется по уравнению

$$dx = e^{-6{,}908\left(\frac{\varphi_x + \Delta\varphi}{\varphi_{f2 f3}}\right)^{m+1}} - e^{-6{,}908\left(\frac{\varphi_x}{\varphi_{f2 f3}}\right)^{m+1}}. \qquad (12)$$

В двигателях с воспламенением от сжатия различают две фазы сгорания топлива: взрывной и диффузионный, поэтому выгорание топлива имеет существенную неравномерность. Вследствие различного характера выгорания топлива кривая скорости тепловыделения будет иметь два максимума. Для учета этой особенности при расчете цикла дизеля цикловую дозу топлива делят на две соответствующие части $Q_z = Q_{z1} + Q_{z2}$, принимают на каждом участке различные показатели характера сгорания

топлива m_1 и m_2, а в предлагаемой методике расчета кроме того, отношение углов $\varphi_x/\varphi_{f_2 f_3}$ заменяется отношениями Q_x/Q_z, в котором количество топлива на каждом шаге ΔQ_x выгорает по своему закону: на первом участке Q_{z1} – ниспадающая ветвь синусоиды, на втором (диффузионное сгорание) Q_{z2} – синусоида. Такое предположение обосновано тем, что в момент начала сгорания воспламеняется не всё топливо, поступившее за период задержки воспламенения, а только то, которое перемешалось с воздухом.

С учетом указанных предположений уравнение для вычисления коэффициента тепловыделения принимает вид

$$x = 1 - e^{K_x\left[\left(\frac{Q_{x1}}{Q_{z1}}\right)^{m_1+1} + \left(\frac{Q_{x2}}{Q_{z2}}\right)^{m_2+1}\right]}. \qquad (13)$$

где Q_{x1}, Q_{x2} – количество теплоты, выделившейся при взрывном и диффузионном сгорании топлива к текущему моменту времени, а m_1, m_2 – соответствующие показатели характера сгорания.

В конце процесса сгорания $Q_{x1} = Q_{z1}$ и $Q_{x2} = Q_{z2}$, где Q_{z1}, Q_{z2} - количества теплоты, выделившиеся при взрывном и диффузионном сгорании топлива в цикле.

Скорость тепловыделения можно определить численным дифференцированием кривой изменения $x = f(Q_x, m)$ на участке $\varphi_{f_2 f_3}$.

Приращения относительного тепловыделения на каждом шаге расчета вычисляются по уравнениям:

$$\Delta x_1 = e^{K_x\left(\frac{Q_{x1}+\Delta Q_{x1}}{Q_{z1}}\right)^{m_1+1}} - e^{K_x\left(\frac{Q_{x1}}{Q_{z1}}\right)^{m_1+1}}; \qquad \Delta x_2 = e^{K_x\left(\frac{Q_{x2}+\Delta Q_{x2}}{Q_{z2}}\right)^{m_2+1}} - e^{K_x\left(\frac{Q_{x2}}{Q_{z2}}\right)^{m_2+1}}.$$

Значение $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ используется при расчете текущего давления в процессе сгорания топлива.

В уравнении (13) при известных Q_z, m_1, m_2 необходимо установить соотношение между количествами теплоты Q_{z1} и Q_{z2}, то есть установить их значения в равенстве

$$Q_{z1} + Q_{z2} = Q_z. \qquad (14)$$

Для этого предварительно принимается значение теплоты Q_{z1} с учётом отношения периода задержки воспламенения смеси φ_i к продолжительности φ_{vp} впрыска топлива $Q_{z1} = Q_z \frac{\varphi_i}{\varphi_{vp}}$, затем показатель степени в квадратных скобках в зависимости (13) по окончании сгорания приравнивается к единице $\left(Q_{z1}/Q_z\right)^{m_1+1} + \left(Q_{z2}/Q_z\right)^{m_2+1} = 1$ и решается относительно Q_{z2}. По полученным результатам корректируется уравнение (14).

Для двигателей с принудительным зажиганием топливо-воздушной смеси уравнение (13) принимает вид

$$x = 1 - e^{-6{,}908\left(\frac{Q_x}{Q_z}\right)^{m+1}}.$$

При моделировании теплообмена между рабочим телом и стенками внутри цилиндрового пространства предполагается, что при этом изменяется только внутренняя энергия рабочего тела. Исходное уравнение $Q_w = \Delta U = \Delta[C_v T M] = \Delta[C_v\, p(V/R)]$ после дифференцирования преобразуется к виду

$$\left(\frac{dp}{d\tau}\right)_{Q_w \text{var}} = \frac{\partial p}{\partial Q_w}\frac{dQ_w}{d\tau} = -\frac{R}{C_v V}\frac{dQ_w}{d\tau} = -\frac{(k-1)}{V}\frac{dQ_w}{d\tau}.. \qquad (15)$$

Теплота, участвующая в теплообмене между рабочим телом и стенками внутрицилиндрового пространства вычисляется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q_w = \alpha_w \sum F_x (T - T_x),$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи; F_x – площадь поверхностей поршня, крышки цилиндра и поверхности зеркала цилиндра в данный момент времени; T – текущая температура рабочего тела; T_x – температуры соответствующей поверхности внутрицилиндрового пространства.

Температура рабочего тела в цилиндре на каждом элементарном промежутке времени определяется по уравнению состояния

$$T = pV/(RM). \qquad (16)$$

Приращения давлений и температур в трубопроводах вычисляются по уравнениям:

- выпускной трубопровод

$$\frac{dp_p}{d\tau} = \frac{R}{V_P}\left(\sum_{j=1}^{i}\left[\frac{C_p}{(C_p)_p}G_{cp}T_c\right] - \sum_{j=1}^{i}(G_{pc}T_p) - G_{po}T_P + \frac{E_P}{(C_p)_p}\right); \qquad (17)$$

- впускной трубопровод

$$\frac{dp_s}{d\tau} = \frac{R}{V_s}\left[G_k T_k - \sum_{j=1}^{i}(G_{1sc} + G_{sc})T_s + \frac{C_p}{(C_p)_s}\sum_{j=1}^{i}(G_{1cs} + G_{cs})T + \frac{E_s}{(C_p)_s}\right], \qquad (18)$$

где $C_p, (C_p)_s$ - изобарные теплоёмкости газов и свежего заряда в цилиндре и трубопроводах; V_p, V_s – объёмы трубопроводов; G_k, T_k – расход и температура, в соответствии с уравнениями (4) и (5).

Приращение температур рабочего тела в трубопроводах вычисляется по уравнениям:

$$\frac{dT_P}{d\tau} = \frac{T_P R}{p_P (C_p)_p}\frac{dp_P}{d\tau}; \qquad \frac{dT_s}{d\tau} = \frac{T_s R}{p_s (C_p)_s}\frac{dp_s}{d\tau}. \qquad (19)$$

Для перехода к производной по углу поворота коленчатого вала $dp/d\varphi$, более удобной при моделировании процессов в поршневом

двигателе, используется зависимость $d\varphi = \omega d\tau = 6\, n_e\, d\tau$, где $\omega = d\varphi/d\tau = 6\, n_e$ – угловая скорость, °ПКВ/с; n_e – частота вращения вала, мин$^{-1}$.

Вывод уравнений для расчета параметров рабочего тела в трубопроводах изложено в работе [11], а моделирование наддува в [12].

Описанная модель цикла реализована в пакете программ расчёта поршневых двигателей и используется в научно-исследовательской работе и учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Учебник для вузов.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2008.-720с.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Кн.1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов/ В.Н. Луканин [и др.]; Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова.– М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Кн.3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС: Учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова.– М.: Высш. шк., 2005.– 414 с.
4. Гаврилов А.А., Игнатов М.С., Эфрос В.В. Расчет поршневых двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во Владим. гос.. ун-та, – 2003. – 102 с.
5. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1961. – 240 с.
6. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л.: ОНТИ, – 1934. – 110 с.
7. Корреляция между испарением и самовоспламенением капли/ Фролов С.М. [и др.] // Химическая физика, т. 28, № 5, 2009. – С. 3-18.
8. Славуцкий В.М., Салыкин Е.А., Славуцкий В.В. Анализ факторов, определяющих задержку воспламенения топлива в дизелях/ Известия Волг. гос. техн. ун-та: межвуз. сб. науч. ст. №12(99)/ ВолгГТУ.- Волгоград,2012. – 68 с.– (Сер. Процессы преобразования энергии и энергетические установки).-Вып. 4.-С. 51-54
9. Толстов А.И. Индикаторный период запаздывания воспламенения и динамика цикла быстроходного двигателя с воспламенением от сжатия /Тр. НИЛД «Исследование рабочего процесса и подачи топлива в быстроходных дизелях». № 1. М.: Машгиз, –1955. – С. 5-55.
10. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химиеской кинетике. М.: Изд-во АН СССР, – 1947, 2-е изд. М.: Наука –1967.– 125 с.
11. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Влияние внешних факторов на давление рабочего тела в цикле поршневого двигателя./ Матеріали V-оїї Всеукраїнськоі науч. техн. конференції с міждунар. участю

«Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення».– Первомайск, 2013.– С. 52-59.
12. Гаврилов А.А., Гоц А.Н. Модель турбонаддува в цикле двигателя с переменным давлением воздуха на впуске /Фундаментальные исследования , №8 (часть 1), – 2013. – С. 24-28.

A.A. Gavrilov, A.N. Gots

THE MODIFIED MATHEMATICAL MODEL CYCLE PISTON ENGINE

Vladimir State University n. a. A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia

Abstract

It is shown that the pressure *p* in the cylinder piston engine have a major influence of four factors: change of the current volume of the cylinder *V*; the change in mass of the working fluid at the gas exchange *M*; the supply of heat released during the combustion of fuel Q_x and heat exchange with the walls intracylinder space Q_w. If you know the contribution of each of these factors on the change in the pressure of the working fluid in the cylinder, it will allow purposefully to improve the processes in piston engine. The mathematical model presented in quasi-stationary production, but it allows obtaining the desired results into account research, especially the final design of the engine up to required parameters.

Keywords: piston engine, working body, pressure, gas exchange, combustion, delay of ignition

REFERENCES

[1] Kavtaradze R.Z. Theory piston engines. Special chapters. Textbook for high schools.- M: Publishing house MGTU name AD Bauman, – 2008. –720 p. (rus.)
[2] Internal combustion engines. Book 1. Theory workflow: Textbook for universities/ V.N. Lukanin [and other]; edited by V.N. Lukanin and M.G. Shatrov.– M: The High. shool., 2005. – 479 p. (rus.)
[3] Internal combustion engines: Book 3. Computer practicum. Modeling of processes in internal combustion engines: Textbook for universities / V.N. Lukanin [and other]; edited by V.N. Lukanin and M.G. Shatrov.– M: The High. shool., 2005.– 414 p. (rus.)
[4] Gavrilov A.A, Ignatov M.S., Efros V.V. Calculation of piston internal combustion engines: training manual. – Vladimir: Publishing house of Vladim. state University, – 2003. - 102 p. (rus.)

[5] Vibe I.I. New about the duty cycle of the internal combustion engine. - M: machine-building, 1961. – 240 p. (rus.)
[6] Semenov N.N. Chain reaction. Leningrad: ONTI, – 1934. - 110 p.
[7] The correlation between vaporization and self-ignition of drops/ S.M. Frolov [and other] // Chemical physics, V. 28, number 5, 2009. – P. 3-18. (rus.)
[8] Slavutskii V.M., Salicin E.A., Slavutsky V.V. Analysis of the factors determining the delay of ignition of fuel in diesel engines/ News VOLG. state technology. University: collected scientific articles. Art. no. 12(99)/ VSTU.- Volgograd, –2012. – 68 p.– (Ser. Processes of energy conversion and power plants).-V. 4. – P. 51-54. (rus.)
[9] Tolstov A.I. Indicator lag period of ignition and dynamics of the cycle of high-speed engine with a compression-ignition /Works of NILD "Study workflow and fuel in high-speed diesel engines". No. 1. M: Mashgiz – 1955. – P. 5-55. (rus.)
[10] Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in hemiski kinetics. M: Publishing house AN USSR, – 1947, 2-nd edition. M: Science-1967.- 125 p. (rus.)
[11] Gavrilov A.A., Gotz A.N. The influence of external factors on the pressure of the working fluid in the cycle of a piston engine./ Proc. of V proceedings Vseukrainska nauch. the technology. conference with international intervention "Modern problems of engine : the state, ideas, solutions ".– Pervomaisk, – 2013.- P. 52-59. (rus.)
[12] Gavrilov A.A., Gotz A.N. Model turbo in the cycle engine with variable air pressure at the inlet /Basic research , №8 (part 1), – 2013. – P. 24-28. (rus.)

УДК 681.58

В. И. Дягилев[1], В.А. Коковин[2], С.У. Увайсов[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СХЕМЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

[1]Владимир Иванович Дягилев, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9
Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: dvi-39@mail.ru.

[2]Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9
Тел.: (4967)31-0234, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.

[3]Сайгид Увайсович Увайсов, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроники и телекоммуникаций»
Московский институт электроники и математики, Россия, Москва, Б. Трёхсвятительский пер., 3
Тел.: (495)9168813, E-mail: s.uvaysov@hse.ru.

Аннотация

Работа посвящена исследованию процессов в генераторе токов высокой частоты для питания ультразвуковых технологических установок. Выявлены возможности стабилизации выходного напряжения или его регулирования в заданных пределах при неизменном входном напряжении.

Ключевые слова: транзисторный генератор, ультразвуковые технологии, силовой преобразователь.

В технологических процессах, используемых в машиностроении, связанных с обработкой твердых тел ультразвуком [1, 2] для возбуждения излучателя ультразвуковых механических колебаний необходим генератор синусоидального высокочастотного напряжения. В качестве излучателей, как правило, используются пьезокерамические или магнитострикционные электромеханические преобразователи (ЭМП).

В работе [3] была рассмотрена структура силового преобразователя, в состав которого входит транзисторный генератор ультразвуковых колебаний (УЗГ) [4]. В работах [5, 6] приведены результаты исследования силовых преобразователей, имеющих потоковое управление. Данная работа посвящена более детальным исследованиям процессов в УЗГ.

Рассмотрим один из вариантов такого генератора. Как правило, это мостовой транзисторный преобразователь постоянного питающего напряжения в переменное прямоугольное. Для получения синусоидального напряжения необходимо включить между генератором и нагрузкой фильтр. В качестве такого фильтра используется колебательный контур LC, настроенный в резонанс с пьезокерамическим или магнитострикционным электромеханическим преобразователем [7].

Исследования одной из модификаций ВЧ фильтра было проведено с помощью математического моделирования процессов в схеме замещения (рис.1). Она содержит генератор прямоугольного напряжения (V1) амплитудой ±100В, частотой 25Гц и колебательный контур, состоящий из двух звеньев. Первое звено – последовательный L1C1 контур (по отношению к резистору R2, который является нагрузкой). Второе звено - параллельный L2C2R2 контур.

Потери в схеме, при протекании тока, отображены резистором R1 – внутреннее сопротивление генератора и активное - дросселя. Для упрощения анализа конденсаторы представлены идеальными моделями.

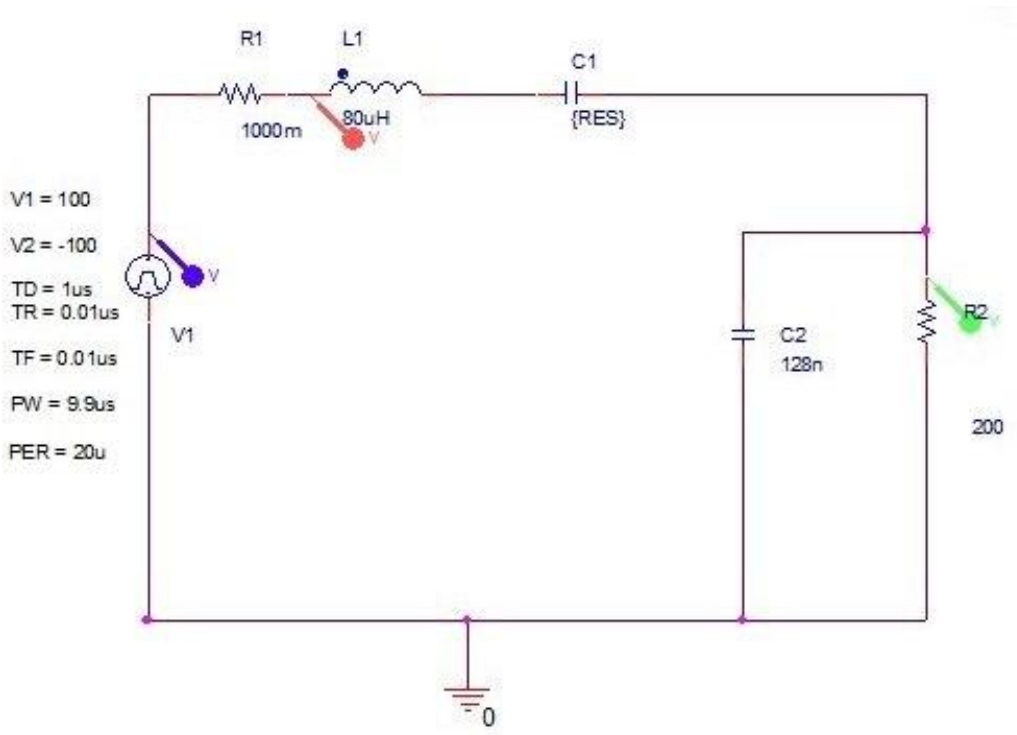


Рис. 1.

Согласно [8,9], в колебательном контуре для нормального функционирования фильтра (синусоидальное напряжение на нагрузке) должны быть соблюдены следующие соотношения:

- Для параллельного контура $К_н > 1$, то есть демпфирование конденсатора С1 колебательного контура не должно быть чрезмерным.
- Для последовательного контура $К_н < 1$, то есть добротность дросселя L1 должна удовлетворять условию получения первой гармоники тока.

Такое сочетание противоположных свойств двух контуров при их совместном включении может представлять известный интерес. Следует заметить, что конденсатор С1, включенный последовательно, обычно имеет значительную емкость (С1 » С2) и используется как защитный элемент при коротких замыканиях нагрузки. В данной статье показаны исследования других свойств такого включения конденсатора С1 при большом диапазоне изменения его величины.

Моделирование схемы замещения генератора (рис.1) проводилось в 3 этапа:

1. Параллельный контур (С1 закорочен, С2=const, R2 - var.)
2. Последовательный конденсатор С1 отсутствует, С2=const, R2-var.
3. Двухконтурная схема исследуется в двух вариантах:
   - 3.1 С2, R2 – const, С1 – var.
   - 3.2 С2 – const, R2 – var и С1 – var.

Результаты первых двух опытов представлены в таблице 1. Для более удобного рассмотрения результатов экспериментов в дальнейшем будем обозначать резистор R2 как нагрузку Rн, а напряжение на нагрузке – Uн.

Таблица 1

Результаты первых двух экспериментов

Параллельный контур L1, C2, Rн, $Zв_1$=10 Ом									
Rн,Ом	10	50	100	150	200	300	400	500	600
Uн,В	25	100	205	230	260	275	290	295	310
Последовательный контур L1, C1, Rн, $Zв_2$=10 Ом									
Rн,Ом	0,1	1	1,5	2	4	6	8	10	
Uн,В	0,5	25	35	40	50	56	57	59	

Результаты опыта 3.1 приведены на рис. 2. Это временные диаграммы зависимостей Uн(t) и Uвх(t) при фиксированных значениях L1, C1 и вариации емкости конденсатора С1 в диапазоне от 10-500 нФ. На этом же рисунке (верхний рисунок) приведены параметрические зависимости напряжения на нагрузке Uн(С1), а также средней мощности в нагрузке

Рн.ср(С1) при фиксированном значении Rн=150 Ом. Анализ этих зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

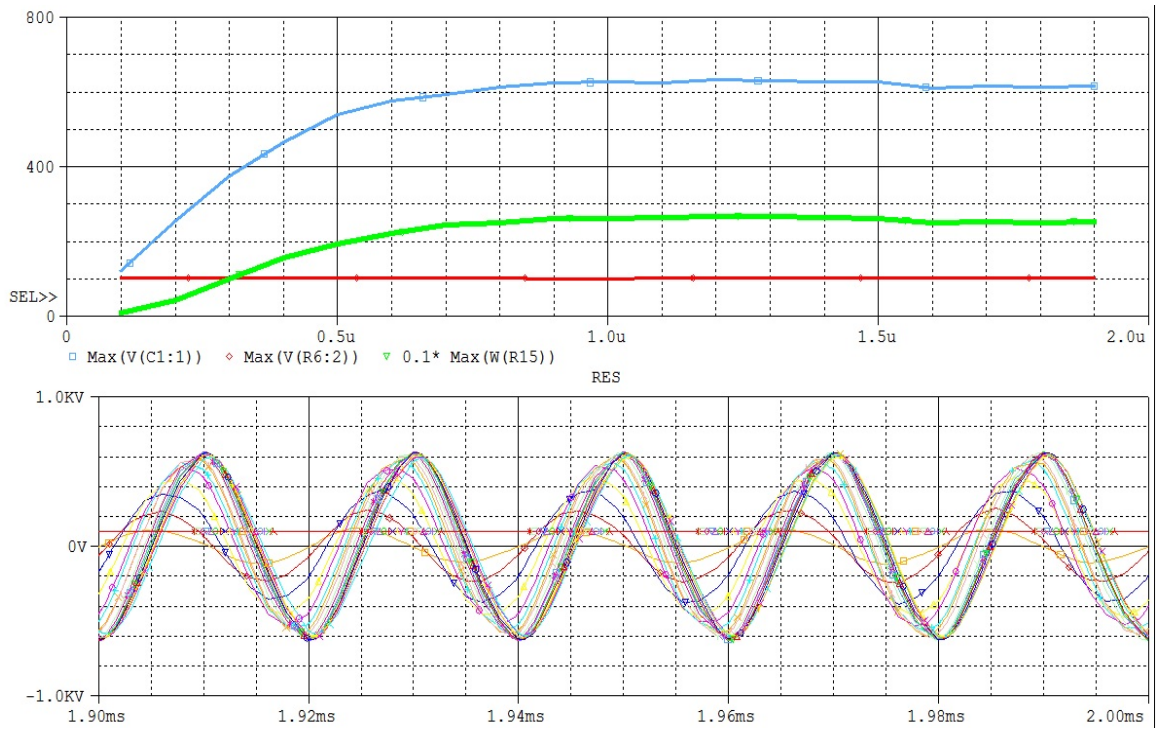


Рис. 2. Параметрические (1- мощность в нагрузке (х10Вт), 2 – напряжение на нагрузке (В), 3- входное напряжение (В) и временные зависимости $U_н(t)$ и $U_{вх}(t)$ при регулировании выходного напряжения на нагрузке величиной 150 Ом.

1. С увеличением емкости С1 растет напряжение на нагрузке и соответственно мощность на выходе. При этом напряжение питания и сопротивление нагрузки остаются неизменными. А это означает, что мощность нагрузки можно регулировать только изменением величины емкости последовательного конденсатора. Величины индуктивности дросселя L1 и емкости С1 должны быть неизменными, ибо они определяют частоту выходного напряжения.
2. При значительном увеличении емкости С1 напряжение на нагрузке перестает расти.

Результаты опыта 3.2 представлены в таблице 2. Здесь также зафиксированы значения реактивных мощностей в дросселе и конденсаторе.

Графическая иллюстрация эффекта в опыте 3.2 представлена временной диаграммой и параметрической зависимостью (рис. 3).

Таблица 2

Результаты проведенного моделирования

C_1 ,нФ	50	100	150	200	250	300	400	500
Рн.ср, Вт	220	800	1300	1500	1500	1450	1380	1240
$P_{вх}$, Вт	310	910	1600	1800	1820	1800	1730	1600
P_L, VAr	3750	7800	8700	9000	9100	8900	8500	7900
P_C, VAr	1000	3800	4000	4100	4000	3900	3700	3500
η	0,72	0,88	0,81	0,83	0,81	0,79	0,78	0,77

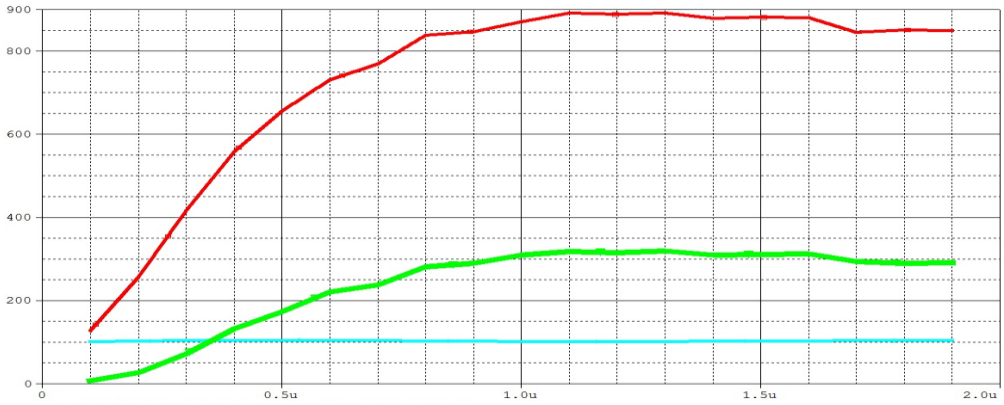


Рис. 3. Параметрические (1- мощность в нагрузке (х10Вт), 2 – напряжение на нагрузке (В), 3- входное напряжение (В) и временные зависимости $U_н(t)$ *и* $U_{вх}(t)$ при регулировании выходного напряжения на нагрузке величиной 250 Ом.

При сравнении параметрических зависимостей на рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что величина напряжений и мощностей генератора определяется величиной нагрузки. При этом эти параметры так же можно изменять путем изменения емкости конденсатора С1.

В этих опытах был также получен еще один интересный результат. При равенстве величин $C_1=C_2$ осуществляется стабилизация напряжения на нагрузке [10]. На рис. 4 приведены временные диаграммы $U_н(t)$ при изменении сопротивления Rн в диапазоне от 0,1 Ом до 900 Ом и параметрическая кривая $U_н(R_н)$, которая показывает, что нестабильность напряжения в таком большом диапазоне изменения Rн, составляет примерно 2%.

Можно предположить, что этот эффект обусловлен равенствами

$$Zв_1=Zв_1=\sqrt{L_1/C_1}=\sqrt{L_1/C_2} \text{ и } Zв_1=Rн.$$

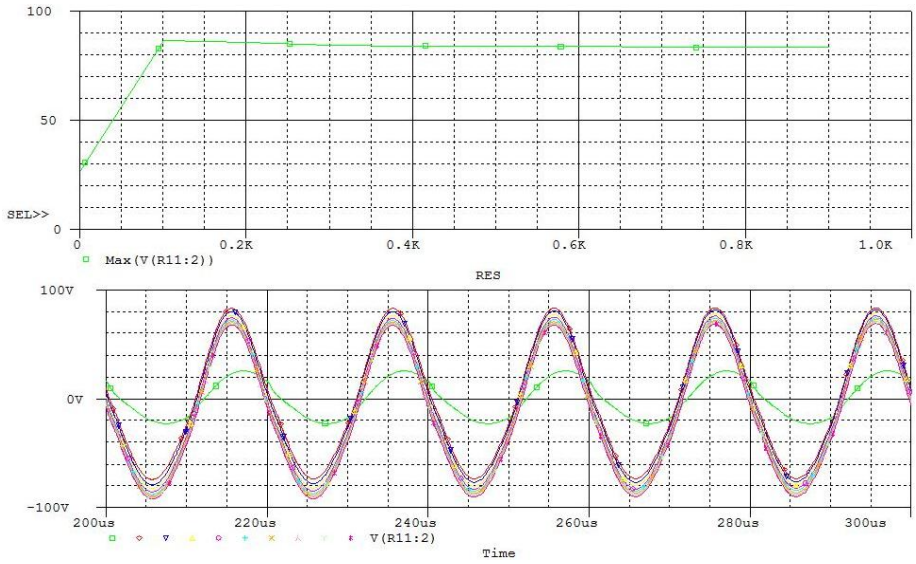


Рис. 4. Стабилизация выходного напряжения при равенстве волновых сопротивлений двух контуров $U_н(R_н)$-вверху, и $U_н(t)$внизу.

При этом уровень стабильного напряжения в данном случае будет определяться величинами Rн и Zв при других значениях L_1 и C_2. Следовательно, и частота тока в нагрузке будет иной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петушко И.В. Оборудование для ультразвуковой обработки. Научное издание. – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2005.
2. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – 400 с.
3. 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. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 1122-1131.
4. Козырев В.Б., Лаврушенков В. Г., Леонов В. П. и др. Транзисторные генераторы гармонических колебаний в ключевом режиме/ Под ред. И. А. Попова. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.
5. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Силовой преобразователь с потоковым управлением для геовизора// Материалы международной науч.-практ. конф. “Инновационные информационные технологии”. Т.2.,М.:МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С. 184-190.

6. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Исследование схемы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением для ВИЭ// Материалы международной науч.-практ. конф. “Инновационные информационные технологии”. Т.2.,М.:МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С. 99-106.
7. Носов В.Н., Дягилев В.И., Правоторов Н. И., Дягилев А. В. Электромеханические преобразователи в технологических ультразвуковых установках и выбор источника питания для их возбуждения. Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». – Дубна, 2005. №1(12). – С.34-40.
8. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. –М.:Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
9. Дягилев В.И. Транзисторные генераторы тока высокой частоты для электротехнологий. – Монография: - Дубна:- Изд-во «Лика», 2011.- 67 с.
10. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Силовой преобразователь // Патент на полезную модель Россия № 134717. 2013. Бюл. № 32.

V.I. Diagilev[1], V.A. Kokovin[1], S.U. Uvaysov[2]

RESEARCH PROCESSES IN THE CIRCUIT TRANSISTOR ULTRASONIC GENERATOR FOR PROCESS PLANTS

[1]The Public Institution of Higher Education of Moscow Region the International University “Dubna” of Nature, Society and Man, Branch “Protvino”, Russia;
[2]Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, Russia

Abstract

Work is devoted to processes in the generator of high frequency currents to power ultrasonic technological devices. Identify opportunities to stabilize the output voltage or regulation within the specified limits at constant input voltage.

Key words: transistor oscillator, ultrasound technology, the power converter.

REFERENCES

[1] Petushko I.V. Oborudovanie dlya ultrazvukovoy obrabotki. Nauchnoe izdanie. SPb.: OOO «Andreevskiy izdatelskiy dom», 2005. (rus.)
[2] Hmelev V.N., Leonov G.V., Barsukov R.V., Tsyiganok S.N., Shalunov A.V. Ultrazvukovyie mnogofunktsionalnyie i spetsializirovan-nyie apparatyi dlya intensifikatsii tehnologicheskih

protsessov v promyishlennosti, selskom i domashnem hozyaystve.- Barnaul: AltGTU, 2007.- 400 p. (rus.)
[3] Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Postroenie silovogo preobrazovatelya s adaptivnoy sistemoy upravleniya dlya ultrazvukovyih tehnologicheskih ustanovok // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi 3-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – P. 1122-1131. (rus.)
[4] Kozyirev V.B., Lavrushenkov V. G., Leonov V. P. i dr. Tranzistornyie generatoryi garmonicheskih kolebaniy v klyuchevom rezhime/ Pod red. I. A. Popova. – M.: Radio i svyaz, 1985. – 192 p. (rus.)
[5] Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Silovoy preobrazova-tel s potokovyim upravleniem dlya geovizora// Materialyi mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. "Innovatsionnyie informatsionnyie tehnologii". T.2.,M.:MIEM NIU VShE, 2013. – P. 184-190. (rus.)
[6] Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Issledovanie shemyi silovogo preobrazovatelya s vyihodnyim sinusoidalnyim napryazheniem dlya VIE// Materialyi mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. "Innovatsionnyie informatsionnyie tehnologii". T.2.,M.:MIEM NIU VShE, 2013. – P. 99-106. (rus.)
[7] Nosov V.N., Dyagilev V.I., Pravotorov N. I., Dyagilev A. V. Elektromehanicheskie preobrazovateli v tehnologicheskih ultrazvuko-vyih ustanovkah i vyibor istochnika pitaniya dlya ih vozbuzhdeniya. Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirodyi, obschestva i cheloveka «Dubna». – Dubna, 2005. №1(12). - P.34-40. (rus.)
[8] Rozanov Yu.K. Osnovyi silovoy elektroniki. –M.:Energoatomizdat, 1992. – 296 p. (rus.)
[9] Dyagilev V.I. Tranzistornyie generatoryi toka vyisokoy chastotyi dlya elektrotehnologiy. – Monografiya: - Dubna:- Izd-vo «Lika», 2011.- 67 p. (rus.)
[10] Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Silovoy preobrazovatel // Patent na poleznuyu model. Rossiya. № 134717. 2013. Byul. № 32. (rus.)

УДК 531.8

И.А. Жуков[1], В.В. Молчанов[2]

К РАЗРАБОТКЕ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ БОЙКОВ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВАНИИ ПРАВИЛА «ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ»

[1]Иван Алексеевич Жуков, к.т.н., доцент
Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42, Новокузнецк, 654007, Россия.
Тел.: (3843)465791, E-mail: tmmiok@yandex.ru.

[2]Виктор Вячеславович Молчанов, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, Новокузнецк
Тел.: (3843)465791, E-mail: prosto_viktor@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача рационального проектирования двухступенчатых бойков ударных систем технологического назначения. Предлагается новый подход к разработке двухступенчатых форм бойков на основе правила «золотого сечения». Результаты аналитических расчетов показали, что выполнение двухступенчатых бойков, длины ударной и цилиндрической поршневой частей которых подбираются по правилу «золотого сечения», волне целесообразно для некоторых геометрических форм ударных частей.

Ключевые слова: ударная система, боёк, удар, импульс, золотое сечение.

В «Книге Абака» (Liber Abacci) средневекового математика Леонардо Пизанского, известного как Фибоначчи, изданной в 1228 году, появилась особая последовательность чисел – 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 и т.д., названная в последствии числами Фибоначчи [1]. Уникальность этого ряда обусловлена тем, что отношение каждого последующего числа к предыдущему – есть величина постоянная. Лука Пачоли называл это отношение «божественной пропорцией», а в 1835 году Мартином Омом был введен в обиход термин «золотое сечение». Правило «золотого сечения» использовалось во все времена в искусстве, кинематографе, строительстве, механике.

Авторы настоящей предлагают применить правило «золотого сечения» к разработке форм бойков, представляющих собой

двухступенчатые тела вращения, являющихся неотъемлемой частью машин ударного действия [2-6]. Выполнение бойков в виде двухступенчатых тел связано с требованиями к надежности, прочности и долговечности ударных систем технологического назначения. В частности, соударяющиеся тела – бойки и волноводы должны по возможности иметь простые геометрические формы с плавными переходами от одного сечения к другому и должны иметь большие запасы продольной устойчивости. Наиболее простыми с точки зрения геометрической формы являются двухступенчатые ударники (рис. 1), поршневая ступень которых выполняется цилиндрической с целью обеспечения им устойчивого положения в корпусе механизма, а ударная задается из условия обеспечения необходимой формы ударного импульса.

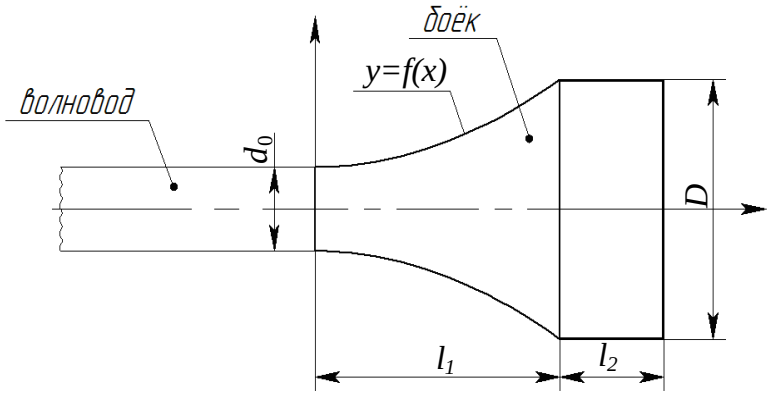


Рис. 1 – Удар двухступенчатым бойком

Если к разработке формы двухступенчатого бойка применить число 1.618, т.е. создать такой ударник, в котором длины ступеней соотносятся как число 1.618, то получим так называемый ударник с «золотым сечением» [7], в котором

$$\frac{l_1}{l_2} = 1{,}618. \qquad (1)$$

Анализ масс-инерционных характеристик двухступенчатых бойков с различной геометрией ударной части, созданных согласно условию (1), показал что применение правила «золотого сечения» для выбора длин ступеней обеспечивает расположение центра масс бойка в поршневой цилиндрической части, тем самым придавая ему устойчивое положение в корпусе механизма.

Оценка эффективности применения бойком различной геометрии основывается на сравнении таких показателей генерируемых ими ударных импульсов, как максимальная амплитуда, длительность, энергия первой волны. Доказано [8-10], что форма ударного импульса оказывает непосредственное влияние на эффективность работы ударной системы. С этой точки зрения подбор форм бойков, генерируемых в волноводах ударный импульс, оптимальный для обработки какого-либо объекта или

разрушения хрупкой среды, является одним из наиболее действенных методов проектирования машин ударного действия, приводящих к увеличению их коэффициента полезного действия.

Синтез формы ударяющего тела в зависимости от характеристик обрабатываемого объекта может быть осуществлен по разработанной авторской методике [11-14]. Однако при этом синтезируемая форма бойка будет представлять собой одноступенчатое тело вращения. Такая конструкция является практически непригодной с точки зрения встраивания в корпус ударного механизма. Одним из простейших вариантов решения этой проблемы является добавление к синтезированной ударной части бойка поршневой цилиндрической ступени с учётом условия (1). При таком исполнении габаритный диаметральный размер двухступенчатого бойка значительно меньше исходного одноступенчатого.

Для обоснования предлагаемого подхода к созданию двухступенчатых бойков были выполнены расчеты ударных импульсов, генерируемых при ударе по волноводам различными бойками, поршневая ступень которых представляет собой цилиндр постоянного поперечного сечения, а ударная часть выполнена в виде тела вращения, в качестве образующей которого выбирались различные плоские кривые. Анализ полученных решений (таблица) показал, что для всех форм бойков энергия ударного импульса однозначно возрастает, но для некоторых бойков это не оправданно в связи с уменьшением максимального значения амплитуды более чем не 10%.

Таблица

Сравнительный анализ двухступенчатых бойков

№	Образующая боковой поверхности ударной части бойка	Изменение максимальной амплитуды импульса, ΔF_{max}, %	Изменение энергии первой волны импульса, ΔE, %
1	Прямая (конус)	-7,5	8,35
2	Гипербола	-17,5	14
3	Парабола квадратичная	-13,5	14
4	Парабола квадратичная повернутая	-14,3	14
5	Парабола кубическая	-19	18
6	Синусоида	**-2,55**	**8**
7	Тангенсоида	-11	14
8	Политропа квадратичная	-21	21,5
9	Политропа кубическая	-32	24
10	Экспонента	**-33,8**	**39**
11	Строфоида	-12,9	13,3
12	Циссоида Диокла	-10	11,5
13	Верзьера Аньези	-14	14
14	Конхоида Никомеда	-10	11,5
15	Цепная линия – катена	-3,85	24

Анализ найденных форм ударных импульсов, генерируемых в волноводах двухступенчатыми бойками, показал форма первой волны ударного импульса за время, соответствующее удвоенной длине ударной части бойка, обуславливается лишь геометрией ударной части бойка, что подтверждается совпадением на этом участке с формой импульса, генерируемого соответствующим одноступенчатым бойком. На рис. 2 показан пример решения задачи определения ударного импульса, генерируемого одно- и двухступенчатыми бойками с одинаковыми образующими криволинейной части.

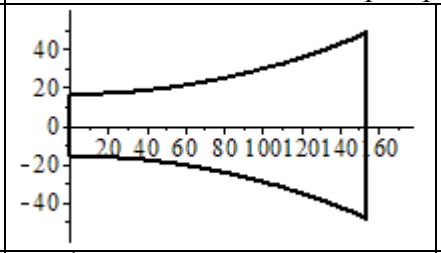
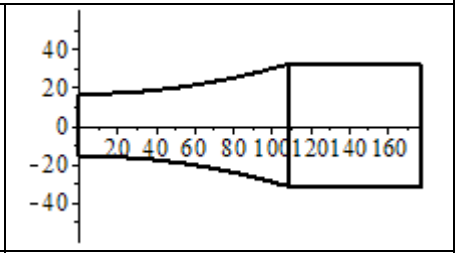
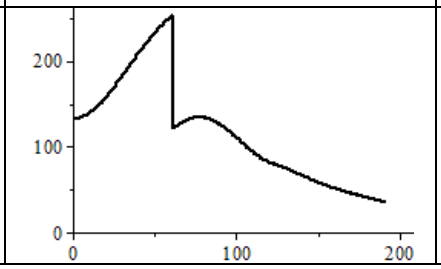
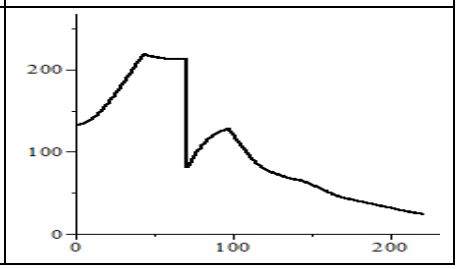
Тип образующей бойка	Верзьера Аньези	
Изображение		
Форма ударного импульса		

Рис. 2 – Сравнение бойков и ударных импульсов

Таким образом, можно сделать вывод, что выполнение двухступенчатых бойков, длины ударной и цилиндрической поршневой частей которых подбираются по правилу «золотого сечения», волне целесообразно, но рационально лишь для некоторых геометрических форм ударных частей.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-854.2014.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Н.Н. Числа Фибоначчи. – М.: Наука, 1978. – 144 с.
2. Липин А.А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №2. – С. 74-78.
3. Доронин С.В. Оценка конструктивных решений и расчетное обоснование рациональных параметров деталей машин ударного

действия для разрушения горных пород / С.В. Доронин, Д.В. Косолапов // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №10. – С. 47-53.
4. Смоляницкий Б.Н. Перспективы совершенствования пневмомолотов для специальных строительных работ / Б.Н. Смоляницкий, И.В. Тищенко, В.В. Червов и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – №4. – С. 65-75.
5. Юнгмейстер Д.А. Исследования ударной системой «поршень-боёк-инструмент» для расширения области использования процесса дребезга / Д.А. Юнгмейстер, Ю.В. Судьенков, В.А. Пивнев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №8. – С. 288-294.
6. Жуков И.А. Рациональное проектирование цилиндроконических бойков машин ударного действия / И.А. Жуков, В.В. Молчанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – №2. – С. 37-40.
7. Молчанов В.В. О применении правила «Золотого сечения» к разработке форм бойков ударных механизмов / В.В. Молчанов, И.А. Жуков // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – №8, часть 2. – С. 267
8. Жуков И.А. Научно-методические основы создания ударных систем, предназначенных для разрушения горной породы // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 238-244.
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: материалы II Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 311-319.
10. 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.
11. Жуков И.А. Теоретические основы синтезирования форм бойков ударных систем технологического назначения / И.А. Жуков, Е.В. Сараханова // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – №2. – С. 173-177.
12. Жуков И.А. Синтезирование геометрии бойка ударной системы по линейной форме падающего ударного импульса // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – №10. – С. 27-31.
13. Жуков И.А. Обобщенная методика и инструментальные средства создания машин ударного действия для разрушения хрупких сред //

Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 230-233.
14. Жуков И.А. Автоматизированный программный комплекс для определения рациональных параметров ударных систем технологического назначения // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы I международной заочной научно-практической конференции / НОЦ «МС». – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013. – С. 32-35.

I.A. Zhukov, V.V. Molchanov

TO DEVELOPMENT TWO-LEVEL ANVIL BLOCK OF IMPACT MECHANISMS ON THE BASIS OF THE RULE OF "GOLDEN RATIO"

Siberian state industrial university, Russia

Abstract

In work the problem of rational design of two-level anvil blocks of impact systems of technological appointment is considered. New approach to development of two-level forms of anvil blocks on the basis of the rule of "golden ratio" is offered. Results of analytical calculations showed that performance of two-level anvil blocks, lengths impact and cylindrical which piston parts are selected by the rule of "golden ratio", to a wave it is expedient for some geometrical forms of impact parts.

Keywords: impact system, anvil blocks, impact, impulse, golden ratio.

REFERENCES

[1] Vorob'ev N.N. Fibonacci’s numbers. – M: Science, 1978. – 144 p. (rus.)
[2] Lipin A.A. Promising punchers for drilling // Physical-technical problems of development of mineral resources. – 2005. – №2. – P. 74-78. (rus.)
[3] Doronin S.V. Evaluation of design solutions and design substantiation of rational parameters of machine parts impact for destruction of rocks / Doronin S.V., A.I. Kosolapov // Mining machinery and electromechanics. – 2008. – №10. – P. 47-53. (rus.)
[4] Smolyanitsky B.N. Prospects of improvement of the air hammers special construction works / B.N. Smolyanitsky, I.V. Tischenko, V.V.

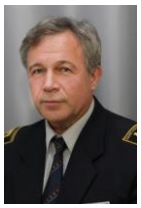
Chervov, etc. // Physical-technical problems of development of mineral resources. – 2009. – №4. – P. 65-75. (rus.)
[5] Jungmeister D.A. Research of impact system «piston – anvil block – tool» for expanding the use of process and chattering / D.A. Yungmeister, Yu.V. Sudenkov, V.A. Pivnev, etc. // Mountain information-analytical bulletin. – 2011. – №8. – P. 288-294. (rus.)
[6] Zhukov I.A. Rational design cylinder-conical anvil blocks of impact machines / I.A. Zhukov, V.V. Molchanov // Mining machinery and electromechanics. – 2013. – №2. – P. 37-40. (rus.)
[7] Molchanov V.V. On the application of the rule of the Golden section to the development of forms of the anvil block of the impact mechanisms / V.V. Molchanov, I.A. Zhukov // Modern high technologies. – 2013. – №8, part 2. – P. 267. (rus.)
[8] Zhukov I.A. Scientific-methodological basis for the creation of a impact systems intended for destruction of rocks // Modern engineering. Science and education: materials of International scientific-practical conference. – SPb.: Publishing house Politechn. University, 2011. – P. 238-244. (rus.)
[9] Zhukov I. Theoretical bases of creation and research system "head – waveguide – tool" impact machines intended for destruction of rocks // Modern engineering. Science and education: materials of the II International scientific-practical conference. – SPb.: Publishing house Politechn. University, 2012. – P. 311-319. (rus.)
[10] Dvornikov L.T. Rational design percussion systems in technological applications / L.T. Dvornikov, I.A. Zhukov // Bulletin of the Siberian state industrial University. – 2012. – №2. – P.15-20. (rus.)
[11] Zhukov I.A. Theoretical bases of designing forms of anvil block percussion systems in technological applications / I.A. Zhukov, E.V. Sarakhanova // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2009. – V. 315. – №2. – P. 173-177. (rus.)
[12] Zhukov I.A. Synthesis of geometry anvil block of the impact system on a linear form of the incident shock pulse // Mining machinery and electromechanics. – 2012. – №10. – P. 27-31. (rus.)
[13] Zhukov I.A. Generalized methods and instrumental means for creating impact machines for destruction of fragile environments // Modern problems of mechanical engineering: proceedings of VII International scientific and technical conference; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Pub. TPU, 2013. – P. 230-233. (rus.)
[14] Zhukov I.A. Automated software system for definition of rational parameters of the impact systems for technological purposes // Automated designing in mechanical engineering: Materials of I international correspondence scientific-practical conference. – Novokuznetsk: Publishing center of SibSIU, 2013. – P. 32-35. (rus.)

УДК 621.7

В. А. Клевцов, В. В. Максаров

О РОЛИ СИСТЕМНОСТИ В РАЗВИТИИ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ.

Клевцов В. А., канд. техн. наук, доцент
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(960)2517594 E-mail: sapr2k8@yandex.ru



Максаров В. В., д-р техн. наук, профессор
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)7593504 E-mail: maks78.54@mail.ru

Аннотация

В работе представлены некоторые итоги реализации принципов системности, преемственности, унификации и автоматизации,как методологической основы развития базы технических знаний (БТЗ) и методики обучения. В качестве объекта иллюстрации выбран сегмент БТЗ, составляющий *теорию технического проектирования* и затрагивающий основные понятия *теории базирования.* Приведённое совершенствование есть результат многолетней научно-педагогической деятельности авторов в области технического проектирования и его автоматизации (САПР). Результаты опробированы и внедрены в научной и педагогической сферах.

Ключевые слова: база знаний, методология, принципы, системность, преемственность, унификация, автоматизация, структура, теория, техническое проектирование, интегративное свойство, семантика, дедукция.

При изучении морфологии Т-систем помимо выделения «состава», «связей» на определённом этапе познания взаимосвязи необходимо рассматривать и учитывать при этом влияние такой системной черты как «отношение», свидетельствующее о направленности связи и характеризующем тем самым различие функции в этом процессе каждого из взаимодействующих объектов исследуемого системного образования. Всё это осуществляется в рамках функционального аспекта системного исследования Т-систем. Именно такое комплексное исследование и позволяет раскрыть и описать сущность используемых в БТЗ системных понятий «базирование» и «база». Продолжим применять для наглядности в ходе исследования моделирование взаимодействия объектов но уже с учетом влияния «отношений» между ними на результат. (см. рис. 1 в [1]).

Для осмысления роста информативности моделей необходимо сравнивать их с соответствующими моделями взаимосвязи без учёта этой характеристики. Например: модели бинарных связей, представленные на рис. 1, б, в и рис. 1, г 1 и 2. [1]. В первом случае модель лишь фиксирует, что между объектами ОБ1 и ОБ2 имеет место наличие неориентированной геометрической связи положения (1) и сопряжения (2.1; 2.2) с *отношением толерантности* (равнозначности) между ними. Совсем другую информацию несут модели рис. 1, г 1 и 2 [1], свидетельствующие, что здесь между объектами ОБ1 и ОБ2 также имеет место геометрическая связь соответственно положения (1.1; 2.1) и сопряжения (1.2 и 2.2), но уже с учетом направленности в «*отношении строгого порядка*» с двумя потенциально возможными для бинарной связи вариантами распределения «функции базирования» между ними. Так, с использованием упомянутого понятия «базирование», модели на рис. 1, г 1.1 и 1.2 [1] отражают, что объектам присуща геометрическая связь соответственно положения или сопряжения с *отношением однозначного распределения функций* между ними: ОБ1- *базирующего* (базы), а ОБ2 - *базируемого*.

В моделях же на рис. 1, г 2.1 и 2.2 [1] имеет место отражение обратного направления связи и соответствующей этому смены распределения функций «базирования» между геометрически связанными объектами: ОБ2- *базирующего* (база), а ОБ1- *базируемого*. Последний пример есть наглядная иллюстрация путём моделирования упоминаемого в технической литературе свойства потенциальной «обратимости баз» в бинарной геометрической взаимосвязи.

И здесь уже на обобщенных моделях можно и нужно показать целесообразность этапности при исследовании геометрической взаимосвязи объектов и оценке ограничений неопределенности их взаимного положения в пространстве. Так, на обобщенных моделях объектов (рис.1в,г)выделяются их элементы Эоб1 и Эоб2, непосредственно участвующие в осуществлении геометрической связи и выполнении сопутствующему этому распределению «функций базирования» между объектами с учётом свойства интегративности.

Всё сказанное пока затрагивало бинарные связи объектов. А как это свойство реализуется и проявляется в более сложных структурах? Уже первые иллюстрации ответов на поставленный вопрос (рис. 1, д, е) [1] показывают потенциальную многовариантность выбора решений, необходимость формальной оценки функции каждого объекта, входящего в структуру (его показатели С и ПС приведены в одномерных таблицах, изображённых здесь же соответственно ниже для каждой графовой модели взаимосвязи объектов 1, 2, 3), влияния этого фактора в задачах конструкторского и технологического проектирования.

Выявив на обобщенных моделях проявление рассматриваемого свойства, перейдем к ознакомлению с характеризующими его общими понятиями.

К сожалению, регламентируемые действующим ГОСТ 21495-76 понятия нельзя назвать таковыми, позволяющими при конкретизации охватить всю потенциально возможную область их применения. Для наглядности анализа и осмысления выдвигаемых аргументов критики приведём их из упомянутого источника. [3]

> Базирование – это придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

> Базой называется поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

Далее приведем предлагаемые понятия и основные тезисы, раскрывающие их семантику и принципы конкретизации.

> Базирование объекта – процесс его ориентации в «пространстве» посредством геометрической (-их) связи (-ей) с объектом (-ами) из «окружения» с целью ограничения до должного уровня степени неопределенности положения первого в выбранной системе координат на фиксированный период времени.

Важным посылом, обуславливающим необходимость критического анализа и развития существующих знаний в этой области, служит принципиальное изменение в подходе к исследованию объекта.

Так, общие понятия названного выше ГОСТ выводились, как оговорено в его приложении, с использованием подхода, заимствованного из теоретической механики, предусматривающего изучение и описание обособленного поведения объекта, скажем, движения, покоя тела в пространстве.

В рассматриваемой же проблеме с позиций реализуемого системного подхода при исследовании ставится *задача выявления и описания взаимосвязи объектов*, включая и геометрической её разновидности. Необходимость упомянутой постановки уже заложена в самом понятии «система, как взаимосвязанное множество элементов…».

Поэтому, не оспаривая корректности существующих понятий, необходимо четко оговорить и в дальнейшем учитывать области и условия рационального применения действующих и предлагаемых понятий.

При этом предлагаются общие понятия, появление и необходимость которых с позиций системного подхода обусловлено характерным для него дедуктивным направлением в познании и описании исследуемой проблемы, предполагающим использование таких понятий с последующей их конкретизацией при описании аналогичных свойств взаимосвязи любых объектов «техносферы». Вот почему важно дать не только общее

определение понятия, но и указать признаки, учитываемые при его конкретизации. Только так можно выявить общность и контрастнее показать различие в содержании каждого частного понятия.

Относительность первичного понятия «базирование объекта», в роли которого может потенциально выступать любая из рассматриваемых Т-систем или любой отдельный их элемент, предопределяет относительность и понятия «база объекта». И здесь также дадим общее понятие и признаки, его конкретизирующие.

> База объекта – объект из «окружения» рассматриваемого, ограничивающий в пределах своих возможностей посредством геогеометрической связи с ним некоторую степень неопределенности в должном положении первого в принятой системе координат пространства и на фиксированный период времени.

Сопоставим содержание предлагаемых и регламентированных понятий для выявления их различия и оценки соответствия требованиям и сферам использования в рассматриваемой проблеме.

Конкретизируя «объекты сопоставления», укажем, что они касаются содержания понятий «объект базирования» и «базирующий объект (база)».

В результате сопоставлений можно сделать следующие замечания по определениям из ГОСТ.

Первое затрагивает содержание понятия «объект базирования». В приведенных из ГОСТ определениях, хотя они и претендуют на общие, сфера использования понятия строго ограничена рамками «объекта производства: заготовка, изделие». А разве средства производства (станок, приспособление, инструмент и т.д.) при исследовании взаимосвязи в гетерогенных «Т-системах преобразования», скажем в ТСО, не могут выступать в функции «объекта базирования»? Утвердительный ответ на этот вопрос очевиден и будет подтвержден позднее в ходе исследования конкретных Т-систем такого вида. Этот же вопрос можно поставить и при исследовании гомогенных систем ТСД, ТСЗ применительно к их элементам. Отсюда следует, что приведенные в ГОСТ определения всего лишь *частные* понятия.

Второе замечание касается содержания в них понятия «базирующего объекта» (базы). В первом общем определении оно вообще не оговорено, *ибо виртуальное понятие «система координат»*, упомянутое там, в априори *не может выполнять такую функцию в рассматриваемой задаче* . Действительно, базирование, об этом говорится и в Приложении 1 анализируемого ГОСТ 21495-76, затрагивает «геометрические связи» и прежде всего бинарные между объектами, один из которых выполняет при этом роль «базирующего», другой – «базируемого». Этот тезис справедлив для всех уровней иерархической структуры любой Т-системы. Поэтому некорректно говорить о «геометрической связи» между «реальным и

виртуальным» объектами. Да, упоминание термина «система координат» уместно в определении, но лишь для исчерпывающего описания положения этих взаимосвязанных объектов в пространстве.

Справедливость высказанного замечания находит подтверждение уже в самом приведенном из ГОСТ понятии «база».

Действительно, и здесь в роли *объекта базирования* названы *заготовка , изделие,* но в роли *базирующего объекта* уже названы «поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, *принадлежащая заготовке* или *изделию* и *используемая* для *базирования*», но, заметим, не пресловутая виртуальная «система координат».

Вдумаемся в эту повторенную еще раз цитату из определения понятия «база» по ГОСТ и посмотрим на неё с позиции выдвигаемого положения об этапности в изучении этого комплексного свойства. Тогда становится явным, что по сути речь идет о смешении авторами содержания понятий «объект базирования» (здесь, «заготовка», «изделие») и «элемент этого объекта», непосредственно осуществляющий геометрическую связь, упоминаемую здесь (смотри иллюстрацию этого факта на моделях рис. 1, б, в, г, [1]).

Да, «базирование» характеризует «геометрическую связь» и «отношение» объектов. Каких? В приведенной цитате речь идет о связи целого (заготовки, изделия), в трактовке принципа гомеостата, с *его же отдельным элементом* (поверхностью и т.д.). Корректно ли такое утверждение о характере «связи» и «отношения» между упомянутыми объектами?

Да, этот элемент ($Э_{ОБ1} \in$ ОБ1 рис. 1, в, г 2.1 [1]) используется для базирования, *по нему оно происходит*, но *функцию базирующего* при этом *объекта* в любом случае выполняет *объект из окружения* (ОБ2 для этого примера), в составе которого кстати и есть элемент ($Э_{ОБ2} \in$ ОБ2), непосредственно участвующий в выполнении этой функции! Таково проявление интегративного свойства в объекте с позиции системного подхода при проводимых исследованиях.

В ходе дальнейших исследований указанные элементы базируемого объекта, чтобы оттенить их функцию при базировании, будут выделены и названы *первичными элементами во внутренней структуре связей выделенного образования этого объекта*. Введение этих понятий позволяет глубже понять сущность и описать процесс базирования с учётом таких системных категорий как «внутреннее (реальное) и внешнее окружения», определяющих границы обозреваемого при этом «пространства», разработать алгоритмы решения возникающих задач базирования.

Есть ли объективные причины, объясняющие выявленное различие в содержании рассмотренных понятий? Ведь они одни из множества

фундаментальных понятий технической области знаний. Поэтому, представляется, что в их трактовке, восприятии, области рационального использования должна быть полная ясность. Но, увы!

В качестве версии объяснения можно ещё раз назвать исходный посыл, упомянутое *различие* в постановке задачи (исходных условий) исследования. Так, напомним, что понятия, регламентированные ГОСТ, выводились на основе методики, используемой в теоретической механике для условий исследования и описания *обособленного* поведения объекта (скажем, тела) в пространстве. Такой подход корректен лишь для определенного вида задач технического проектирования.

Но сказанное всего лишь подтверждает тезис, что главная причина всё таки заключается в отсутствии чётко сформулированной методологии построения и развития как всей БТЗ, так и отдельных её сегментов. И хотя её основополагающие принципы были озвучены, но они, к сожалению, так и не стали «руководством к действию», по разным, а главное, субъективным причинам.

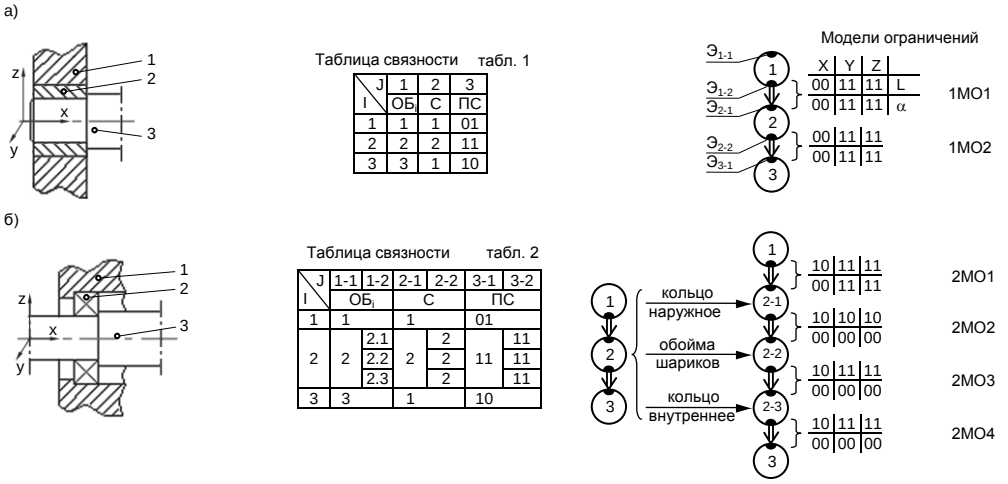


Рис. 1. Моделирование «подвижных опор»

В качестве примера из практики заимствуем (рис. 1, а, б) предложенную в [2] иллюстрацию понятия «подвижной опоры» в двух конструктивно по-разному реализованных вариантах. Фактически «подвижные опоры» представляют собой разновидность не всегда явно выделяемого при структурном анализе образования, называемого «функциональной цепью», в состав которой здесь входит триада объектов: корпус (ОБ1), подшипник (ОБ2) и вал (ОБ3). Упомянутое различие состоит в том, что в первом варианте используется «подшипник скольжения», во втором – «качения». Это с позиций функциональности казалось бы непринципиальное различие позволяет в сравнении при паралелльном анализе геометрической взаимосвязи объектов в структурах по каждому варианту подтвердить на практике в ходе исследований корректность:

1) предлагаемых обобщённых понятий «базирование объекта», «база объекта»;

2) алгоритма конкретизации содержания понятия «база объекта»;

3) определения его интегрального показателя – «модели ограничений» (МО).

Используем в процессе исследования *материала* задачи такой инструмент системного подхода, как *моделирование* рассматриваемых объектов, результатов их взаимодействия.

Так, на рис. 1, а, б представлены фрагменты двух конструкций названных опор. Это их зрительно воспринимаемые модели. Здесь же для каждого варианта приведены наборы моделей, позволяющих формально описать различные свойства как самих объектов, так и результаты процесса их геометрического взаимодействия. Так, графовые модели фиксируют перечисленный выше состав образования, наличие между ними геометрических связей «сопряжения» и «отношений строгого порядка» в этой взаимосвязи по функциональному признаку, что отражено в направлении связей и однозначном распределении «функций базирования» между ними.

В приведённых рядом соответственно каждому варианту «таблицах связности» (1 и 2) формально отражены составы ($ОБ_i$), степени вершин С и показатели связности ПС каждого представителя.

Идентичность списочного состава конструкций обоих вариантов позволяет на первом витке исследования, рассматривая все входящие в него объекты, как единые целые, иметь частично одинаковое содержание «табличных моделей связности». Этим фиксируется, что в обоих вариантах одинаковая структура геометрических связей «сопряжения» между $ОБ_i$ с определённым распределением между ними «функций базирования»: ОБ1 – ПЭ (ПС = [01 ; 10[), ОБ2 – с инверсируемой функцией (ПС = [11 ; 20[) и ОБ3 – базируемый (ПС = 10). Различие будет выявляться только на этапах построения «моделей ограничений» (МО), дающих в табличной форме действительную картину накладываемых при парном взаимодействии ограничений неопределённости положения ОБ с учётом трёхмерности пространства и возможного направления в характеристике ограничения. Поэтому на втором витке познания необходимо отметить, что состав объектов в каждом варианте конструкций всё же различен. Так, в первом варианте, все три объекта – гомогенные Т-системы (на уровне ТСД), во втором – ОБ1 и ОБ2 – гомогенные, а ОБ2 – гетерогенная Т-система. Поэтому требуется при этом исследовании структуризация последней с выделением в ней по конструктивному и функциональному признакам трёх её составляющих: 2-1 – «кольцо наружное», 2-2 – «обойма с шариками», 2-3 – «кольцо внутреннее» и соответствующее уточнение всех показателей связности С и ПС, отражённое в табл. 2 в соответствующих её столбцах.

Наполнение «моделей ограничений» конкретным содержанием осуществляется по приведённому выше алгоритму. Результаты отражены в МО, изображённых справа на уровне каждой пары взаимодействующих объектов, на которых отмечены элементы непосредственного их контакта, геометрия которых и определяет картину ограничений (в частности, «условие связи»-S).

Особый интерес для анализа результатов исследования представляет вариант рассматриваемого примера из практики, когда в составе структуры «функциональной цепи» в роли объекта с «инверсируемой функцией базирования» выступает гетерогенная Т-система. В данном примере в роли таковой выступает «подшипник качения» – ОБ2. В результате его структурирования выделен «каскад» из трёх составляющих, каждая из которых представляет собой «объект с инверсируемой функцией базирования». Это предопределяет необходимость исследования факта потенциальной возможности трансформации содержания МО при переходе в этом «каскаде взаимодействующих объектов» от одной пары к другой. Сказанное наглядно иллюстрирует сопоставление содержания МО, последовательно изображённых справа на уровне каждой пары взаимодействующих объектов. Прокомментируем трансформацию «модели ограничений». Так, в первой паре (ОБ1 – ОБ2-1) имеет место «сопряжение» $Э_{ОБ1}$ с $Э_{ОБ2\text{-}1}$ (отверстия в «корпусе» ОБ-1 с цилиндрической поверхностью «наружного кольца подшипника) – модель 2МО1. Во второй паре (ОБ2-1 – ОБ2-2)- сопряжение $Э_{ОБ2\text{-}1}$ (отверстия наружного «кольца подшипника») с $Э_{ОБ2\text{-}2}$ («шариками в обойме») – 2МО2. В третьей паре (ОБ2-2 – ОБ2-3) – сопряжение «шариков в обойме» с наружной цилиндрической поверхностью «внутреннего кольца подшипника» ОБ2 – 2МО3. Вот эта последняя модель согласно действия интегративного свойства в системном образовании (здесь, «подшипника» ОБ2, как единого целого) и становится «достоянием» всего «подшипника», определяющим его «возможности» в дальнейшем, согласно конструкции «опоры», взаимодействии с «валом» ОБ3 в последней в этом «каскаде» паре взаимодействия: $Э_{ОБ2\text{-}3}$ (отверстия внутренного кольца подшипника) с $Э_{ОБ3}$ (цилиндрической поверхностью ступени вала ОБ3). «Модель ограничений» последнего взаимодействия – 2МО4. Сравним её с 2МО3. Они конгруэнтны, что и понятно. Внутреннее кольцо подшипника «качения» ОБ2-3 способно оказать воздействие на «вал» ОБ3 *только в пределах своих интегративных возможностей*, «механизм» формирования которых рассмотрен выше. Это подтверждает справедливость народной мудрости: «Выше головы (своих сиюминутных возможностей) не прыгнешь».

Памятуя, что всё познаётся в сравнении, осуществим эту процедуру, сопоставив содержание 1МО2 первого варианта конструкции с 2МО4 второго. А ведь картина сопряжений и участники этого действа всё те же

(кольцо – «подшипник скольжения» и вал ОБ3 в первом и такое же кольцо, но только принадлежащее «подшипнику качения» и такой же вал ОБ3- во втором). Участники те же, а на выходе «ограничения» (результаты) разные! О чём это говорит?

Ответ один: данное исследование реального примера из практики подтверждает высказанное выше утверждение об ограниченности регламентированных понятий и потенциальной сложности их применения при решении «задач базирования» на формализованном уровне.

«Кажущаяся простота» понятий не есть показатель обязательной *глубины* их содержания. Действительность намного сложней и её содержание следует глубоко изучать а результаты использовать для совершенствования знаний в этом сегменте БТЗ. При этом нельзя понятия, представляющие собой «кирпичи» теории в столь сложной и мощной области знаний, выводить на основе *субъективного взгляда* на проблему. Они должны формироваться только на единой методологической основе! Таков закон современного развития знаний. Больше того, развитие *понятийной* стороны должно *учитывать сущностную сторону* рассматриваемой проблемы и обеспечивать возможность соответствующего развития и *процедурной*, не забывая о необходимости реализации при этом принципа *автоматизации* из состава методологической основы развития знаний, диктующего должный уровень познания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов В.А., Максаров В.В. Об основах развития «компьютерных технологий» в машиностроении. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Международной научно-практической конференции. / под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 877-886.
2. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 312 с., ил.
3. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. ГОСТ 21495-76. – М.: Госстандарт, 1976

V. A. Klevtzov, V. V. Maksarov

ON THE ROLE OF THE SYSTEMATICNESS IN THE DEVELOPMENT OF THEORY OF BASING

National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper presents some results of implementation of the principles of system, succession, unification and automatization, as a methodological basis for development of technical knowledge base (BTZ) and teaching methods. BTZ segment called "Theory of Technical Engineering" touching upon principles of theory of basing was chosen as an illustration of the subject matter. Improvements in said segment after years of authors' research and teaching in the field of technical design and automation (SAPR) have affected conceptual and procedural sides of the problem. Results were tested and implemented in scientific and educational spheres.

Keywords: knowledge base, methodology, principles of system, succession, unification, automatization, structure, theory, technical engineering, integrative property, semantics, deduction.

REFERENCES

[1] Klevtsov V.A., Maksarov V.V. Ob osnovah razvitiya «kompyuternyih tehnologiy» v mashinostroenii. // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. / pod red. M. M. Radkevicha i A. N. Evgrafova. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. – p. 877-886. (rus.)

[2] Kulagin V. V. Osnovy konstruirovanija opticheskih priborov: Ucheb. posobie dlja priborostroitel'nyh vuzov. – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1982. – 312 p., il. (rus.)

[3] Bazirovanie i bazy v mashinostroenii. Terminy i opredelenija. GOST 21495-76. – M.: Gosstandart, 1976 (rus.)

УДК 681.518

В.А. Коковин, А.А. Евсиков

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ПОТОКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент
Международный университет природы, общества и человека "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра «АТПиП», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр. 9.
Тел.: (4967)31-0234, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.

Александр Александрович Евсиков, к.т.н.,
заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Россия, Протвино, Московская область, Северный пр. 9.
Тел.: (4967)31-0190, E-mail: eaa@uni-protvino.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены особенности использования метода потокового управления при автоматизации технологических установок. Показаны преимущества использования данного метода при больших объемах анализируемой информации и высоких требованиях к времени реакции управляющей системы.

Ключевые слова: потоковое управление, потоки данных, диаграммы потоков данных.

Введение

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), связанные с машиностроением, развиваются в направлении повышения функциональности, надежности и вычислительной мощности. Решение этих задач при автоматизации высокоэффективных технологических процессов обусловлено обработкой большого объема информации от датчиков и обеспечением быстрой реакции управляющей системы. Кроме этого существует класс задач, связанных с диагностикой быстропротекающих процессов. Автоматизацию технологических установок с быстропротекающими процессами может обеспечить только архитектура систем управления (СУ)

реального времени, с максимально распараллеленными процессами обработки данных, имеющая в своем составе быстродействующий вычислитель, либо алгоритм выполнения должен быть реализован аппаратно. Появление процессоров нового поколения, содержащих в своем составе несколько ядер, позволяет частично распараллелить обработку информации, тем самым уменьшить время реакции и повысить производительность вычислителей АСУ.

В статье [1] рассмотрено адаптивное управление элементами силовых преобразователей (СП), входящих в состав ультразвуковых технологических установок (ТУ). Данные ТУ широко используются в машиностроении для обеспечения технологии ультразвуковой обработки и очистки различных деталей. Методы акустического контроля применяются при неразрушающем контроле машиностроительных изделий. В этой статье показано преимущество построения блоков управления СП на основе цифровых матриц, позволяющих распараллелить процессы обработки входных данных, что приводит к повышению эффективности работы ультразвуковых ТУ.

Большую роль в задаче повышения надежности работы технологических установок играет диагностика параметров компонентов установок в реальном времени. В статье [2] показаны особенности диагностирования компонентов системы управления СП, реализованной на технологии программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В этом случае появляется возможность создания СУ на основе модели ***data flow,*** когда алгоритм управления реализуется аппаратно. Это дает возможность параллельно обрабатывать различные процессы (что актуально при большой частоте преобразования в СП), при этом обработка выполняется синхронно. Другим преимуществом использования ПЛИС является возможность реконфигурировать аппаратную реализацию алгоритма неограниченное число раз.

Эффективность применения ПЛИС при автоматизации таких сложных ТУ как подсистемы ускорителя заряженных частиц показана в статье [3]. Появилась возможность выполнять разработку на языках описания аппаратуры (*Verilog, VHDL*), что повысило производительность разработки и дало возможность выполнять функциональную и временную симуляцию проекта. Благодаря возможности параллельной обработки входных потоков данных минимизируется время реакции на входные события.

Использование метода потокового управления

Современные АСУ в своей основе имеют, как правило, традиционную архитектуру с использованием вычислителя (микропроцессора), построенного на базе модели фон-Неймана [4], которую в литературе принято называть ***control flow*** (поток команд). Основным недостатком

данной модели, с точки зрения быстродействия, является последовательное выполнение команд, реализующих алгоритм. Другой вариант - реализация архитектуры вычислителей на основе модели вычислений ***data flow*** (поток данных), предложенной в работах Д. Денниса, например [5]. В этом случае, реализуемый алгоритм «зашит» в аппаратуре системы управления в виде требуемых вычислительных и логических операторов, что позволяет распараллеливать различные процессы и неограниченно масштабировать.

Недостатком модели ***data flow*** до недавнего времени оставалась реализация эффективной по производительности, но узкоспециальной по назначению задачи. При смене алгоритма задачи приходилось модернизировать аппаратную часть системы управления. С появлением технологии ПЛИС ситуация изменилась. Как было сказано выше, наиболее узким местом при обработке большого объема информации от датчиков и формирования быстрой реакции управляющих систем является последовательное выполнение команд вычислителей, применяемых в СУ. Решением данной проблемы может быть максимальное распараллеливание обработки данных и выполнение алгоритма, на что, и нацелен метод потокового управления. Метод потокового управления (МПУ) основан на классической модели управления [6], когда решается задача обеспечения требуемых выходных параметров объекта управления (технологического процесса, установки и т.д.) через формирование управляющих воздействий на основе анализа информации от сенсоров, контролирующих состояние объекта управления.

В основе МПУ лежат потоки данных и управляющих воздействий, при этом информация от датчиков обрабатывается на основе модели ***data flow***, а алгоритм управления реализуется не программно, а аппаратно. Особенностью МПУ является параллельная обработка потоков данных и параллельное формирование потоков управления.

Любая система управления, в том числе и основанная на МПУ, характеризуется моделью выполнения. Поскольку в основе МПУ лежат потоки, то модель выполнения, представляющая МПУ удобно рассмотреть с помощью диаграммы потоков данных *DFD* (*Data Flow Diagramming*). Диаграмма позволяет проанализировать информационные потоки, поступающие на вход системы управления и формируемые на ее выходе потоки управления. Кроме того *DFD* можно использовать для разработки спецификации требований при создании СУ. Классическая диаграмма *DFD* предназначена для структурного анализа и проектирования информационных систем [7]. Известны несколько широко используемых нотаций *DFD*, отличающихся синтаксисом. Диаграммы описывают источники и потоки данных, представляют процессы и память для хранения результатов обработки потоков данных в процессах. Данные

диаграммы нельзя напрямую использовать при анализе потоков систем управления по следующим причинам:

- Процессы обработки потоков данных должны быть строго детерминированы.
- Каждый процесс, как правило, запускается по определенному условию, поэтому на входе процесса необходимо определить логику условия, формирующую сигнал для запуска процесса.

Дадим определения ***событие, процесс, капсула*** с допущениями, описанными выше.

Под ***событиями*** в системе управления технологическим объектом будем понимать ограниченный набор именованных сигналов, активное состояние которых влияет на процессы. События не имеют протяженности во времени (если речь идет о каком-то действии), в противном случае можно говорить о двух событиях интервала действия: событии начала действия и событии его окончания [8]. События могут быть внешними по отношению к элементам диаграмм, или внутренними, если являются результатами выполнения процессов.

Определим ***процесс*** как набор P вида $P = (S,s^0,R)$, компоненты которого имеют следующий смысл [9]:

- S – множество, элементы которого называются состояниями процесса P,
- $s^0 \in S$ – специальное состояние, называемое начальным состоянием P,
- R – подмножество вида $R \subseteq S$ элементы которого называются переходами между состояниями.

Каждый процесс осуществляет преобразование входных потоков данных в выходные по заданному алгоритму, при этом формируются управляющие сигналы (воздействия). Преобразование потоков в процессах осуществляется на основе модели конечного автомата. Переход из одного состояния в другое обусловлен появлением события (внешнего или внутреннего).

Капсула – это структурная абстракция, которая объединяет процессы, реализующие алгоритм обработки входных данных и алгоритм управления. Можно говорить, что алгоритм инкапсулирован в эту структуру. Процессы в капсулах выполняются последовательно и запускаются через логику условия. Капсула может иметь вложенные капсулы, т.е. обладает иерархией. Все капсулы условно делятся на капсулы, в которых выполняются процессы по обработке потоков входных данных (капсула I типа) и на капсулы, в которых выполняются процессы по обработке алгоритма управления и формирования управляющих сигналов (капсула II типа). Капсулы можно сравнить с узлами *DFD*, но есть и существенные отличия.

Логика условия – это набор любых логических операций, объединенных в логические уравнения, решения которых запускают процессы.

При построении диаграммы должны выполняться следующие правила:

- алгоритм управления (реализованный аппаратно через модель конечных автоматов) размещается в капсулах (узлах) и выполняется через процессы;
- капсулы содержат только последовательные процессы;
- процессы в капсулах запускаются через логику условия;
- процессы в капсулах I типа не взаимодействуют с процессами аналогичных капсул;
- процессы в капсулах II типа взаимодействуют с процессами в аналогичных капсулах через события.

Реализация МПУ

Для проверки возможностей системы управления, реализованной на основе МПУ, был разработан специализированный модуль в конструктиве «Евромеханика». Особое внимание при разработке модуля было уделено большому числу быстрых входов, принимающих сигналы по LVDS линиям. Обработка данных осуществляется в ПЛИС Cyclone III фирмы Альтера, на основе которой можно решать достаточно сложные задачи управления с использованием программно-аппаратные ресурсов в виде IP-ядер. Для связи с верхним уровнем управления, в модуль встроен Ethernet порт. На рис.1 приведен внешний вид модуля.

Рис.1. Модуль для реализации МПУ

Основные характеристики модуля:

- Число входов -32;
- Число выходов -32;
- Максимальное число логических элементов (при фиксированной ПЛИС) - 39600;
- Максимальный объем встроенной в ПЛИС памяти, Мбит - 1,2;
- Количество быстрых умножителей в ПЛИС, (с разрядностью 18x18) - 126;
- Максимальная частота поступающих входных сигналов, МГц -200;
- Максимальная скорость Ethernet- порта, Мбит/сек - 100;
- Объем внешней памяти - 9 Мбит.

На базе разработанного модуля и метода потокового управления создана система управления распределенной технологической линией, представляющей собой учебно-исследовательский стенд [10], состоящий из следующих компонентов:

1. Транспортная система из двух управляемых конвейеров **(*К1* и *К2*)**, по которым перемещаются детали. Каждый конвейер имеет электропривод и систему датчиков. В состав конвейера ***К1*** входит сдвигатель детали.
2. Два промышленных робота-манипулятора ЦПР-1П, имеющие три степени подвижности руки (поворот, подъем, выдвижение) ***РМ1*** и ***РМ2***. Роботы управляются с помощью пневмоприводов и системы датчиков.
3. Автомат ***АП*** для покраски деталей с системой приема и перемещения детали.

Алгоритм работы технологической линии заключается в перемещении деталей по замкнутому контуру. Каждый компонент стенда независимо реализует алгоритм перемещения детали (или окраски и перемещения, в случае **Автомата**), аппаратно «зашитый» в FPGA. Взаимодействие отдельных компонент осуществляется через систему флагов (событий), формируемых по мере готовности принять деталь. Наличие или отсутствие детали на призмах технологической линии может вызывать различную реакцию системы управления для каждого компонента.

Определим диаграмму как кортеж $DFD = \{D1, D2, D3, D4, D5, P, F, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5\}$, где

$D1 = \{d_{11},d_{12},d_{13},d_{14}\}$ – множество входов, представляющих сигналы от датчиков ***РМ1***.

$D2 = \{d_{21},d_{22},d_{23},d_{24}\}$ – множество входов, представляющих сигналы от датчиков ***РМ2***.

$D3 = \{d_{31},d_{32},d_{33}\}$ – множество входов, представляющих сигналы от датчиков автомата ***АП***.

$D4 = \{d_{41},d_{42},d_{43}\}$ – множество входов, представляющих сигналы от датчиков ***К1***.

$D5 = \{d_{51},d_{52},d_{53}\}$ – множество входов, представляющих сигналы от датчиков ***К2***.

$P = \{p_1,p_2,p_3,p_4,p_5\}$ – множество процессов, реализующих алгоритм системы управления.

$F = \{f_{31},f_{32},f_{41},f_{52},f_{54},\}$ – множество флагов (событий), произведенных на множестве процессов P.

$Q1 = \{q_{11},q_{12},q_{13}\}$ – множество выходов, представляющих управляющие сигналы для ***РМ1***.

$Q2 = \{q_{21},q_{22},q_{23}\}$ – множество выходов, представляющих управляющие сигналы для ***РМ2***.

$Q3 = \{q_{31}, q_{32},q_{33}\}$ – множество выходов, представляющих управляющие сигналы для автомата ***АП***.

$Q4 = \{q_{41},q_{42},q_{43},q_{44}\}$ – множество выходов, представляющих управляющие сигналы для ***К1***.

$Q5 = \{q_{51},q_{52}\}$ – множество выходов, представляющих управляющие сигналы для ***К2***.

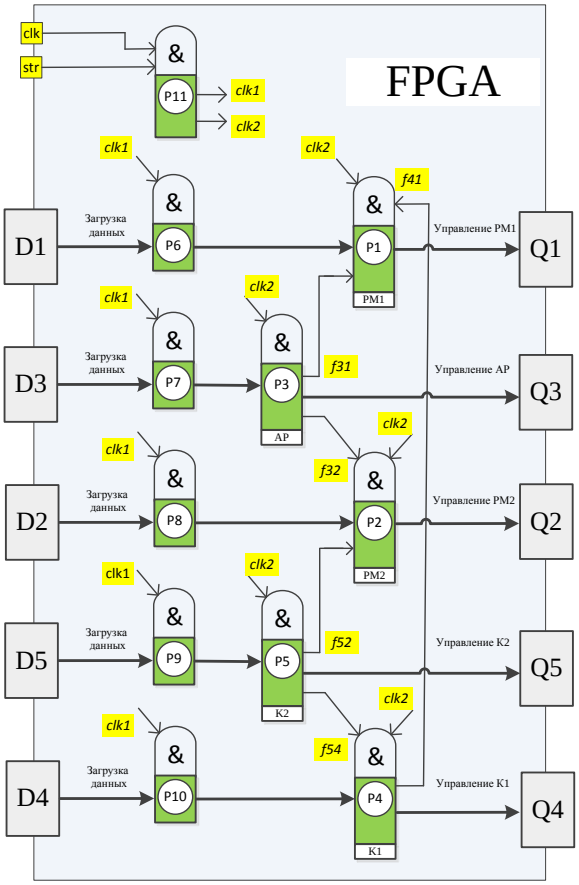


Рис. 2. Диаграмма потоков данных

Построим диаграмму потоков данных СУ исходя из приведенного определения всех переменных *DFD ={D1, D2, D3, D4, D5, P, F, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5}* и следующих правил:

- Каждый процесс P обрабатывает несколько потоков данных в *капсулах* (узлах);
- Число потоков, поступающих на узел, должно быть таким, чтобы процесс обработки состоял только из последовательных операций.

Запуск процессов P определяется *логикой условия* , представляющей собой уравнение логической функции, результат решения которого и запускает процесс.

Каждый процесс осуществляет преобразование входных потоков данных (синхронно фиксируемых во входных регистрах) в выходные по заданному алгоритму, при этом формируются управляющие сигналы Q на выходах диаграммы и флаги (события) F для других капсул. Каждая капсула может представлять собой иерархию капсул с вложенными процессами. Алгоритмически процессы P1..P5 (рис.2) определены в виде конечных автоматов, состояния которых соответствуют заданным состояниям компонент. Узлы диаграммы P6..P10 содержат элементы памяти, в которых периодически фиксируются состояния датчиков.

Выводы

Потоковая система управления, реализованная на базе МПУ имеет параллельное преобразование входных потоков данных в выходные, с формированием управляющих сигналов для исполнительных устройств технологической линии. Взаимодействие потоков разных компонентов осуществляется через флаги (события). Описанный подход построения СУ реального времени имеет преимущество при автоматизации технологических установок, требующих анализа большого объема данных и где время реакции является доминирующим требованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 1122-1131.
2. Увайсов С.У., Коковин В.А., Дягилев В.И. Диагностирование компонентов силовых преобразователей как средство повышения надежности их работы // Надежность и качество – 2013 : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 2т.- С. 400-403
3. Коковин В.А., Комаров В.В. Контроллер таймерной сети общей таймерной системы ускорительного комплекса ИФВЭ. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005.- №6.- С. 15-20.
4. Burks A. W., Goldstine H. H., Neumann J. Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument. — Institute for Advanced Study, Princeton, N. J., July 1946.
5. Dennis J. “Data flow ideas for supercomputers”. IEEE Society, 28th international conference, San Francisco, 1984, pp. 15-19.

6. Михайлов В.С. Теория управления.- К.: Выща школа, Головное издательство, 1988.- 312 с.
7. Дэвид А. Марка, Клемент Л. МакГоуэн Методология структурного анализа и проектирования (SADT). - М.: МетаТехнология, 1993.- 240 с.
8. Хоар Ч. Взаимодействующие последовательные процессы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989.-264 с., ил.
9. Миронов А.М. Теория процессов. *http://intsys.msu.ru*
10. Коковин В.А., Евсиков А.А. Потоковое управление устройствами распределенной технологической установки// Материалы VII международной науч.-практ. конф. «Информационные и коммуникационные технологии в образовании, науке и производстве», Протвино, 2013.

V.A. Kokovin, A.A. Evsikov

STREAMING TECHNIQUES USE MANAGEMENT AUTOMATION IN MANUFACTURING PLANTS

The Public Institution of Higher Education of Moscow Region the International University “Dubna” of Nature, Society and Man,
Branch “Protvino”, Protvino Russia

Abstract

The paper discusses the features of the method of streaming control with workflow automation. The advantages of this method for large volumes of information analyzed and high demands on the reaction time of the control system.

Key words: Streaming control, data flows, data flow diagrams.

REFERENCES

[1] Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaysov S.U. Postroenie silovogo preobrazovatelya s adaptivnoy sistemoy upravleniya dlya ultrazvukovyih tehnologicheskih ustanovok // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialyi 3-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. – P. 1122-1131. (rus.)
[2] Uvaysov S.U., Kokovin V.A., Dyagilev V.I. Diagnostirovanie komponentov silovyih preobrazovateley kak sredstvo povyisheniya nadezhnosti ih rabotyi // Nadezhnost i kachestvo – 2013 : tr.

Mezhdunar. simp. : v 2 t. / pod red. N.K. Yurkova. – Penza : Izd-vo PGU, 2013. – 2t.- P. 400-403. (rus.)
[3] Kokovin V.A., Komarov V.V. Kontroller taymernoy seti obschey taymernoy sistemyi uskoritelnogo kompleksa IFVE. Priboryi i sistemyi. Upravlenie, kontrol, diagnostika. 2005.- №6.- P. 15-20. (rus.)
[4] Burks A. W., Goldstine H. H., Neumann J. Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument. — Institute for Advanced Study, Princeton, N. J., July 1946.
[5] Dennis J. "Data flow ideas for supercomputers". IEEE Society, 28th international conference, San Francisco, 1984, pp. 15-19. (rus.)
[6] Mihaylov V.S. Teoriya upravleniya.- K.: Vyischa shkola, Golovnoe izdatelstvo, 1988.- 312 p. (rus.)
[7] Devid A. Marka, Klement L. MakGouen Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya (SADT). - M.: MetaTehnologiya, 1993.- 240 p. (rus.)
[8] Hoar Ch. Vzaimodeystvuyuschie posledovatelnyie protsessyi: Per. s engl. – M.: Mir, 1989.-264 p., il. (rus.)
[9] Mironov A.M. Teoriya protsessov. http://intsys.msu.ru (rus.)
[10] Kokovin V.A., Evsikov A.A. Potokovoe upravlenie ustroystvami raspredelennoy tehnologicheskoy ustanovki// Materialyi VII mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Informatsionnyie i kommunikatsionnyie tehnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve», Protvino, 2013. (rus.)

УДК 621.83

А.А. Суджаян

КИНЕТОСТАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО КУЛАЧКОВОГО МЕХАНИЗМА С ИЗМЕНЯЕМЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ

Суджаян Арам Александрович, аспирант
Сибирский государственный индустриальный университет
Россия, Новокузнецк
Тел.: (3843)465791, E-mail: aramzes@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена задача кинетостатического исследования новой конструкции кулачкового механизма. Результаты показали, что полная разрешимость задачи кинетостатического анализа является доказательством статической определимости четырехзвенного кулачкового механизма с изменяемым промежуточным звеном, обеспечивающим регулирование закона движение толкателя.

Ключевые слова: кулачковый механизм, кулачок, толкатель, кинетостатика.

Основным достоинством кулачковых механизмов является возможность получения заранее заданного закона движения толкателя при постоянном вращении кулачка. Из практики машиностроения известны различные кулачковые механизмы [1-10]. С целью решения проблемы регулирования закона движения толкателя предлагается кулачковый механизм [11, 12] с изменяемым промежуточным звеном (рисунок 1), состоящий из кулачка 1, промежуточного звена 2, толкателя 3 и стойки 0. Кулачок 1 образует со стойкой 0 вращательную кинематическую пару (0-1), толкатель 3 образует со стойкой 0 поступательную кинематическую пару (0-3), промежуточное звено 2, содержащее в своем составе клеммовые соединения (2-2') и (2-2''), входит с толкателем 3 во вращательную кинематическую пару (2-3) и с кулачком 1 в две высшие кинематические пары (2'-1) и (2''-1).

Работает такой четырехзвенный кулачковый механизм следующим образом. С помощью клеммовых соединений осуществляется регулирование и фиксация угла α между рычагами промежуточного звена и расстояния h между центрами роликов изменяемого. Кулачок поворачивается на некоторый угол φ относительно точки A, движение передается второму звену за счет высших кинематических пар.

Плоскопараллельно движущееся звено 2, в свою очередь, передает полученное движение толкателю, который в результате получает перемещение *S* вдоль оси *xx*. Таким образом, новая конструкция кулачкового механизма обеспечивает возможность регулирования угла и расстояния между рычагами промежуточного звена, что позволит управлять законом движения толкателя.

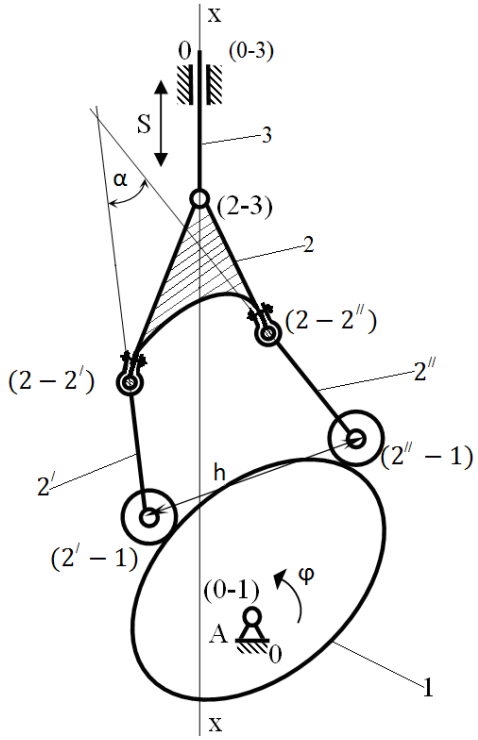


Рис. 1. Четырехзвенный кулачковый механизм с изменяемым промежуточным звеном

Предлагаемый механизм относится к механизмам третьего семейства по Артоболевскому И.И., т.е. к плоским механизмам, подвижность которых определяется развернутой формулой Чебышева П.Л. [1]

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \qquad (1)$$

где n – число подвижных звеньев механизма; p_5 – число кинематических пар пятого класса; p_4 – число высших кинематических пар четвертого.

В кулачковом механизме, изображенном на рисунке 1, n=3, p_5=3, p_4=2, тогда по формуле (1)

$$W = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 3 - 2 = 1, \qquad (2)$$

откуда следует, что если задать звену 1 движение, то все остальные звенья получат вполне определенные движения.

Обратимся к решению задачи кинетостатического исследования нового кулачкового механизма с изменяемым промежуточным звеном.

Пренебрегая силами трения и сопротивления, на данный четырехзвенный кулачковый механизм будут действовать силы инерции

$\overline{F}_{i2}$ и $\overline{F}_{i3}$ звеньев 2 и 3 соответственно; $\overline{G}_1$, $\overline{G}_2$, $\overline{G}_3$ – веса звеньев 1, 2, 3; M_{i2} – момент пары сил инерции звена 2 (рисунок 2).

Общую методику силового расчета механизмов с высшими кинематическими парами можно сформулировать следующим образом: разделив механизм на звенья, нужно рассматривать каждое звено в отдельности, переходя от звена к звену в направлении к первичному механизму, к которому приложен неизвестный внешний момент (или сила). При этом внутренние силы, найденные на предшествующих этапах силового расчета, при выполнении последующих этапов прикладываются к звеньям как уже известные. Переход от звена к звену следует делать в строго определенном порядке – от наиболее удаленного звена к первичному механизму.

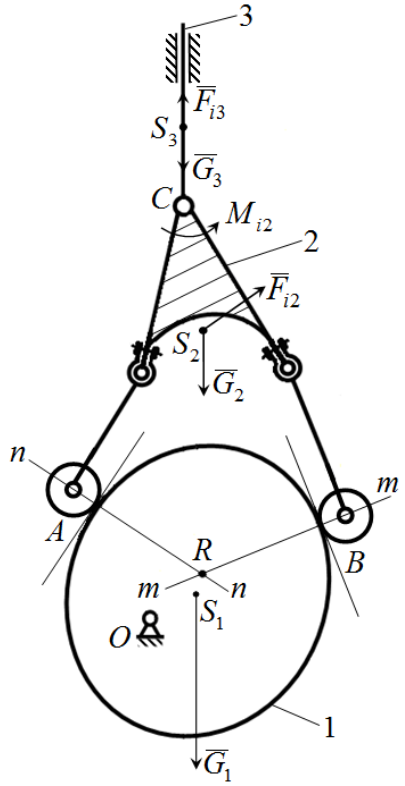


Рис. 2. Силы, действующие на четырехзвенный кулачковый механизм

Отсоединив от механизма кулачок, получим группу звеньев с нулевой подвижностью, группу Ассура (рисунок 3). Ассуром Л.В. было доказано, что группы нулевой подвижности являются статически определимыми. Следовательно, если к звеньям этой группы приложить задаваемые силы, нормальные реакции связей и силы инерции, то они будут находиться в равновесии. Рассмотрим отдельно звено 2 и действующие на него силы (рисунок 4).

Известны точки приложения и направления реакций $\overline{F}'_{12}$ и $\overline{F}''_{12}$. Эти силы направлены по нормалям к профилю кулачка, проведенным в точках касания звеньев 1 и 2. Известно также, что сила реакции $\overline{F}_{32}$ приложена в

точке C. На пересечении линий действия сил $\overline{F}'_{12}$ и $\overline{F}''_{12}$ находим точку R. Раскладываем силу реакции $\overline{F}_{32}$ на две взаимноперпендикулярные составляющие $\overline{F}^{\tau}_{32}$ и $\overline{F}^{n}_{32}$. Сила $\overline{F}^{n}_{32}$ совпадает с направлением отрезка RC_2. Направление силы $\overline{F}^{\tau}_{32}$ перпендикулярно отрезку RC_2.

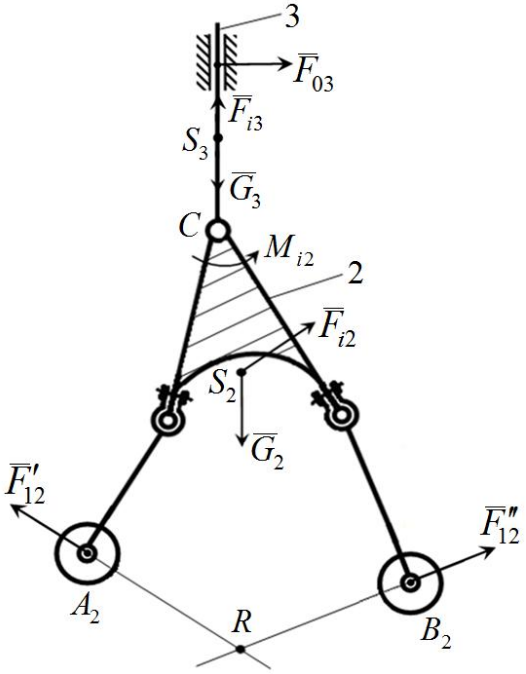


Рис. 3. Силы, действующие на группу Ассура

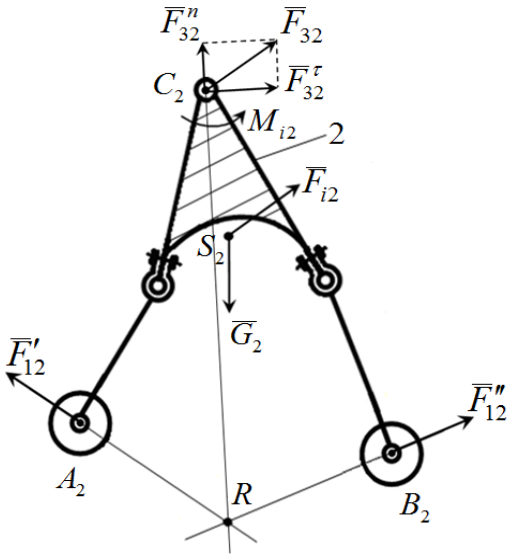


Рис. 4. Силы, действующие на звено 2

Уравнение моментов сил относительно точки R

$$\sum M_R = 0,\ -M_R(\overline{G}_2) - M_R(\overline{F}_{i2}) + M_{i2} - M_R(\overline{F}^{\tau}_{32}) = 0. \qquad (3)$$

Из условия определения величины момента силы находим

$$M_R(\overline{F}^{\tau}_{32}) = F^{\tau}_{32} \cdot l_{RC2}. \qquad (4)$$

С учетом формулы (3) из (4) получаем

$$F^{\tau}_{32} = \left[\frac{-M_R(\overline{G}_2) - M_R(\overline{F}_{i2}) + M_{i2}}{l_{RC2}} \right]. \qquad (5)$$

Проёизведем силовой расчет звена 3 (рисунок 5,а). Составим для него уравнение равновесия

$$\overline{F}_{03} + \overline{F}_{i3} + \overline{G}_3 + \overline{F}^{\tau}_{23} + \overline{F}^{n}_{23} = 0. \qquad (6)$$

Для сил $\overline{F}_{03}$ и $\overline{F}^{n}_{23}$ известны только направления, а силы $\overline{F}_{i3}, \overline{G}_3, \overline{F}^{\tau}_{23}$ – известны по величине и по направлению.

Силы реакции $\overline{F}_{23}$ и $\overline{F}_{32}$ равны по величине и противоположны по направлению $\overline{F}_{23} = -\overline{F}_{32}$. Построим план сил для звена 3 (рисунок 5,б). Величины сил $\overline{F}_{03}$ и $\overline{F}_{23}$ находятся из плана сил с учетом мастабного коэффициента μ_F.

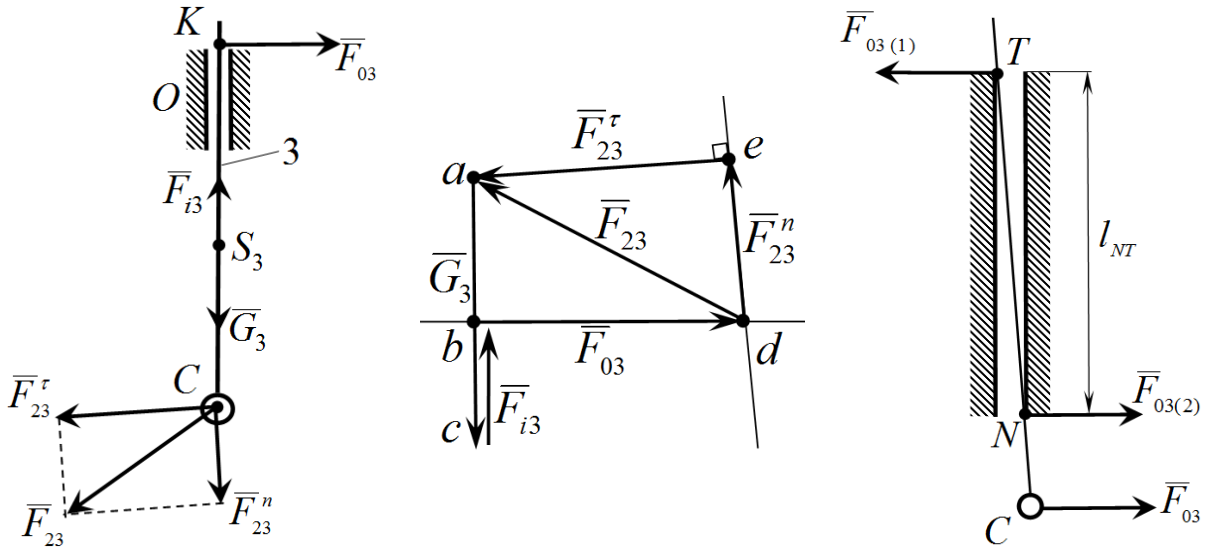


Рис. 5. Кинетостатика звена 3

Для того, чтобы найти точку K приложения силы $\overline{F}_{03}$, составляем уравнение моментов сил для звена 3 относительно точки C

$$\sum M_C = 0,\ M_C(\overline{F}_{03}) = F_{03} \cdot l_{CK} = 0, \tag{7}$$

откуда следует, что расстояние l_{CK} =0.

Так как стойка 0 показана схематично, то точка K приложения силы F_{03} оказалась лежащей как бы вне стойки (в шарнире C). В действительности же сила F_{03} должна быть приложена в зоне контакта звеньев 3 и 0. Момент $M_T(F_{03})$ силы F_{03} относительно точки T

$$M_T(F_{03}) = F_{03} \cdot l_{CT}. \tag{8}$$

Момент $M_T(F_{03})$ удобнее представить в виде момента пары сил $F_{03(1)}$ и $F_{03(2)}$, приложенных в крайних точках T и N ползуна (рисунок 5,в). Момент пары сил равен

$$M(F_{03(1)}; F_{03(2)}) = M_T(F_{03}) = F_{03(1)} l_{NT}. \tag{9}$$

Откуда находим, что величина сил

$$F_{03(1)} = F_{03(2)} = \frac{M_T(F_{03})}{l_{NT}} = \frac{F_{03} \cdot l_{CT}}{l_{NT}}. \tag{10}$$

Составим уравнение равновесия для звена 2

$$\overline{F}_{32} + \overline{F}_{i2} + \overline{G}_2 + \overline{F}'_{12} + \overline{F}''_{12} = 0. \tag{11}$$

План сил звена 2 показан на рисунке 7. Величины сил $|F'_{12}|$ и $|F''_{12}|$ находятся из плана сил с учетом мастабного коэффициента.

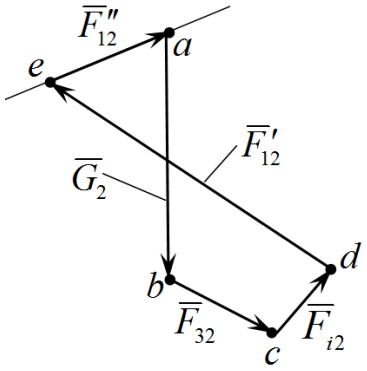
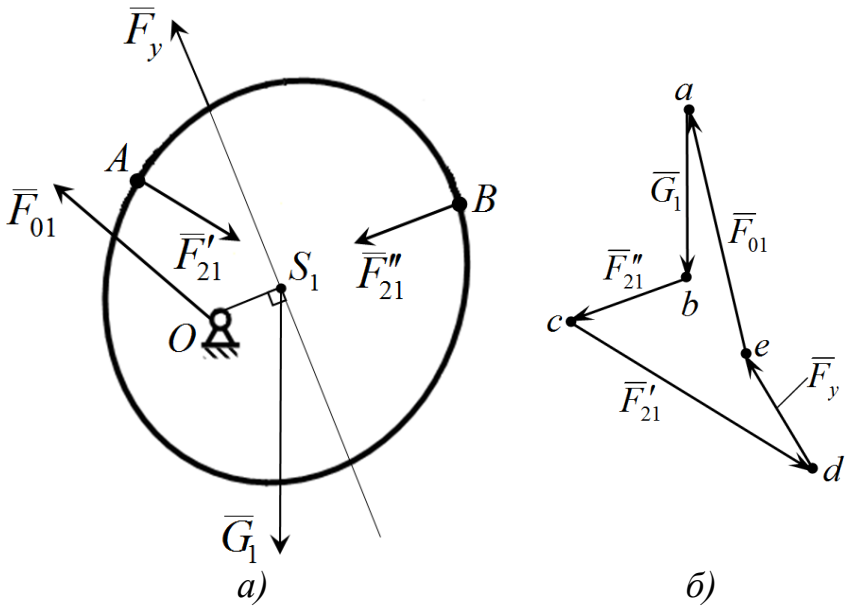


Рис. 7. План сил звена 2

Рассмотрим ведущее звено (кулачок) и силы действующие на него (рисунок 8,а). Известна точка приложения силы реакции $\overline{F}_{01}$ (точка O), но не известны ни линия действия этой силы, ни ее величина. Прямая yy является линией действия уравновешивающей силы $\overline{F}_y$.



а) *б)*

Рис. 8. Кинетостатика ведущего звена

Составим уравнение моментов сил относительно точки O

$$M_0(\overline{F}'_{21}) - M_0(\overline{F}''_{21}) - M_0(\overline{G}_1) + M_0(\overline{F}_y) = 0, \qquad (12)$$

где $M_O(\overline{F}_y)$ момент уравновешивающей силы $\overline{F}_y$ относительно точки O

$$M_O(\overline{F}_y) = F_y \cdot l_{OS1}. \qquad (13)$$

С учетом уравнения (13) из уравнения (12) получаем

$$F_y = -\left[\frac{M_0(\overline{F}'_{21}) - M_0(\overline{F}''_{21}) - M_0(\overline{G}_1)}{l_{OS1}}\right]. \qquad (14)$$

Величина и направление силы реакции $\overline{F}_{01}$ находится с учетом масштаба построения из плана сил, действующих на звено 1 (рисунок 8,б)

$$\overline{F}'_{21} + \overline{F}_y + \overline{F}''_{21} + \overline{F}_{01} + \overline{G}_1 = 0. \quad (15)$$

Таким образом, полная разрешимость задачи кинетостатического анализа является доказательством статической определимости четырехзвенного кулачкового механизма с изменяемым промежуточным звеном, обеспечивающим регулирование закона движение толкателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. Изд. 3-е. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
2. Левитский Н.И. Кулачковые механизмы. – М.: Наука, 1964. – 281 с.
3. Попов Н.Н. Расчет и проектирование кулачковых механизмов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 214 с.
4. Решетов Л.Н. Кулачковые механизмы. – М.: Машгиз, 1953. – 427 с.
5. Ротбарт Г.А. Кулачковые механизмы. – М.: Суд-промгиз, 1960. – 289 с.
6. Ярунов А.М. Кулачковые механизмы переменной структуры. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. – 160 с.
7. Фролов К.В. Теория механизмов и машин: Учебник для вузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 496 с.
8. Давыдов А.П. Анализ и синтез пространственного кулачкового механизма с использованием САПР T-Flex CAD / А.П. Давыдов, С.В. Стрыгин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – №6. – С. 45-46.
9. Нагибин А.В. Многоударные кулачковые механизмы и области их применения / А.В. Нагибин, Л.Т. Дворников // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – №1. – С. 40-43.
10. Леонов И.В. Проектирование и анализ кулачковых механизмов с помощью ЭВМ / И.В. Леонов, Н.Н. Барбашов // Известия вузов. Машиностроение. – 2014. – №2(647). – С. 25-32.
11. Суджаян А.А. Четырехзвенный кулачковый механизм с изменяемым законом движения толкателя // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ. – 2013. – С. 184-186.
12. Заявка на изобретение №2013105985. Четырехзвенный кулачковый механизм / Дворников Л.Т., Ермолаева Н.Ю., Суджаян А.А.– приоритет от 12.02.2013.

A.A. Sudjayan

KINETOSTATICS RESEARCH OF FOUR-LINK CAMS VARIABLE INTERMEDIATE

Siberian state industrial university, Russia

Abstract

The paper considers the problem kinetostatics research new design cams. The results showed that the full solvability of a problem kinetostatics analysis is proof static definability of four-link cams variable intermediate, providing regulation of the law of motion of the pusher.

Keywords: cam mechanism, cam, kinetostatics.

REFERENCES

[1] Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines. – M.: Science, 1975. – 640 p. (rus.)
[2] Levitsky N.I. Cams. – M.: Science, 1964. – 281 p. (rus.)
[3] Popov N.N. Calculation and design of cam mechanisms. – M: Machine-building, 1980. – 214 p. (rus.)
[4] Reshetov L.N. Cam mechanisms. – M.: Mashgiz, 1953. – 427 p. (rus.)
[5] Rothbart G.A. Cams. – M.: Court-Promgiz, 1960. – 289 p. (rus.)
[6] Frolov K.V. Theory of mechanisms and machines: Textbook for universities / K.V. Frolov, S.A. Popov, A.K. Musatov. – M.: MSTU named N.E. Bauman, 2002. – 496 p. (rus.)
[7] Yrunov A.M. Cams variable structure. – Irkutsk: Publishing house of Irkut. University, 1986. – 160 p. (rus.)
[8] Davydov A.P. Analysis and synthesis of spatial cams using CAD T-Flex / A.P. Davydov, S.V. Strygin // Bulletin of the Kuzbass state technical university. – 2010. – №6. – P. 45-46. (rus.)
[9] Nagibin A.V. Many percussions cams and their applications / A.V. Nagibin, L.T. Dvornikov // Mining machinery and electromechanics. – 2013. – №1. – P. 40-43. (rus.)
[10] Leonov I.V. Design and analysis of cam mechanisms by computer / I.V. Leonov, N.N. Barbashov // Izvestiya vuzov. Engineering. – 2014. – №2(647). – P. 25-32. (rus.)
[11] Sudjayan A.A. Four-links cam mechanism with variable law of motion of the pusher // Science and youth: problems, searches, solutions. – Novokuznetsk: SibSIU. – 2013. – P. 184-186. (rus.)
[12] Application for invention №2013105985. Four-link cam mechanism / Dvornikov L.T., Ermolaeva N.Yu., Sudjayan A.A. – priority from 12.02.2013. (rus.)