Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ 2025

Материалы 14-й Международной
научной конференции

18 июня 2025 года

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

УДК 378.1:621.01
ББК 34.4
С56

Современное машиностроение: наука и образование 2025 : материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 г. / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 1062 с.

В сборнике представлены материалы, отражающие опыт различных вузов в подготовке бакалавров, специалистов и магистров машиностроительного профиля. Представлены также результаты научно-исследовательских работ в области машиностроения.

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

© Евграфов А. Н., Попович А. А.,
научное редактирование, 2025
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2025

ISSN 2223-0807

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

PETER THE GREAT
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

MODERN MECHANICAL ENGINEERING: SCIENCE AND EDUCATION 2025

Proceedings of an 14th International Scientific Conference

Russia, June 18, 2025

POLYTECH PRESS
Peter the Great
St.Petersburg Polytechnic
University

Saint Petersburg
2025

Modern Mechanical Engineering: Science and Education 2025 : Proceedings of an 14th International Scientific Conference, Russia, June 18, 2025 / edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. – St. Petersburg : POLYTECH-PRESS, 2025. – 1062 p.

The collection contains materials reflecting the experience of different universities in training bachelors, specialists and masters in mechanical engineering. The results of research work in the field of mechanical engineering are also presented.

The collection is intended for university teachers who train bachelors, specialists and masters in mechanical engineering, as well as engineers and scientists working in the field of mechanical engineering.

© Evgrafov A. N., Popovich A. A., Scientific editing, 2025
© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025

ISSN 2223-0807

Научные редакторы

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

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

Программный комитет

Проф. Попович А.А., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия (председатель);
Проф. Евграфов А.Н., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия (сопредседатель);
Проф. Аксенов Л.Б., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
Проф. Волков А.Н., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
Проф. Гасюк Д.П., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Егорова О.В., Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия;
Проф. Егорова Ю.Б., Ступинский филиал МАИ, Россия;
Проф. Златанов В.Д., Университет Хранительных Технологий, г. Пловдив, Болгария;
Проф. Казаков Н. – к.н., доцент, Технически Университет, Машиностроителен факултет, София, Болгария;
Проф. Каразин В.И., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Манжула К.П., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Мацко О.Н., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Наумкин Н.И., Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Россия;
Проф. Пожбелко В.И., Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;
Проф. Радкевич М.М., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Райчик Я. – д. н., зав. кафедрой "Технологии строительных процессов и материалов". Честоховский политехнический университет, Польша;
Проф. Ramasubbu Sunder – Ph.D., Professor, Director Research, Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd, Индия;
Проф. Редько С.Г., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
Проф. Скотникова М.А., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
Проф. Старжинский В.Е., Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь.
Проф. Тимофеев Г.А., МГТУ, Москва, Россия

Предисловие

1-я Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование (MMESE) состоялась в Санкт-Петербурге 14-15 июня 2011 года. Организаторами конференции (сопредседателями оргкомитета) и редакторами сборника материалов конференции были проф. А.Н. Евграфов и М.М. Радкевич. С тех пор конференция стала проводиться ежегодно (за исключением 2015 г.):

2-я конференция 14-15 июня 2012 г.
3-я конференция 20-21 июня 2013 г.
4-я конференция 19-20 июня 2014 г.
5-я конференция 30 июня-01 июля 2016 г.
6-я конференция 22-23 июня 2017 г.
7-я конференция 29-30 мая 2018 г.
8-я конференция 20 июня 2019 г.
9-я конференция 25 июня 2020 г.
10-я конференция 24 июня 2021 г.
11-я конференция 23 июня 2022 г.
12-я конференция 22 июня 2023 г.
13-я конференция 20 июня 2024 г.
14-я конференция 18 июня 2025 г.

Тематика конференции:

1. Технологии преподавания;
2. Механика машин;
3. Зубчатые передачи и трансмиссии
4. Проектирование, моделирование и надежность трибосистем;
5. Мехатроника и робототехника;
6. Транспортные и технологические системы;
7. Технология машиностроения; Станкостроение;
8. Технология конструкционных материалов и материаловедение;
9. Проектная деятельность и инновации в промышленности

Доклады, отобранные к участию в конференции, публикуются в сборниках материалов конференции. Электронные версии этих сборников находятся в открытом доступе на сайте электронной библиотеки Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. С 2016 г. сборнику присваивается DOI (digital object identifier) – цифровой идентификатор объекта. Сборник включён в Российский индекс научного цитирования РИНЦ.

С 2013 г. избранные материалы конференции переводятся на английский язык и публикуются в сборнике издательства Springer «Advances in Mechanical Engineering» в серии «Lecture Notes in Mechanical Engineering», а в 2016-2019 гг. – в специальных выпусках журнала «International Review in Mechanical Engineering (IREME)».

Александр Евграфов

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ 1

Клиновицкий А.Д., Ананьевский М.С
Формирование лабораторной базы для обучения мобильной робототехнике в школе и вузе 3

Андриенко П.А., Евграфов А.Н., Ковалев П.В., Козликин Д.П.
Балльно-рейтинговая система в образовании: сравнительный анализ эффективности в разных вузах и дисциплинах 18

Солодилова Н.А., Маркова Т.В., Скрябнев А.Ю., Блинковский А.М.
Параметрическое моделирование в САПР как ключевая компетенция современного инженера-машиностроителя 33

Лагунова М.В., Иванова Л.А., Ежова Н.В.
Различные подходы к организации индивидуального обучения высшей математике студентов технических направлений 45

Петров Г.Н., Евграфов А.Н
Визуализация расчетов в программах Excel и Mathcad 55

Резепова И.В., Сульдин С.П., Наумкин Н.И.
Формирование у будущих инженеров проектного компонента инновационной компетенции при обучении в среде Компас-3D 71

Ситкин Д С., Скрябнев А.Ю.
Трансформация преподавания цифровых дисциплин 85

Теплухин В.Г.
Гибридный подход в оценке знаний по курсу «Материаловедение» 94

Ярошенко И.С.
Роль эксперимента в изучении химии ……108

Мохова Н.А., Ковалев П.В.
От теории к практике: партнёрство университетов и компаний в подготовке инженерных кадров 115

МЕХАНИКА МАШИН..... 125

Зиновьева Т. В., Галяутдинова А.Р., Беляев А.К.
Оценка распределения нагрузки и контактных напряжений внутри роликоподшипника в присутствии водорода 127

Иванов И.О., Ананьевский М.С., Керпелева С.Ю., Абрамчук М.В.
Разработка гироскопического испытательного стенда для БПЛА 141

Киселев Р.М.
Вычисление расщепления собственных частот колебаний кольцевого резонатора ММГ, вызванное отклонениям его геометрии 151

Мельников В.Г., Дударенко Н.А., Григоров А.М.
Проектирование линейных систем управления при ограничениях на устойчивость и колебательность 163

Мельников В.Г., Насонов М.Ю., Дударенко Н.А., Григоров А.М.
Разработка и исследование датчиков для оценки износа металлоконструкций при циклическом нагружении 174

Поляков Н.А., Чулкин С.Г.
Статическая балансировка сборного гребного винта через определение центра масс его составных элементов 189

Смирнов А.С., Смольников Б.А.
Диссипативные модели в задаче о глобальных движениях сферического маятника 206

Смирнов А.С., Снетков Д.А.
Колебания ортогонального двойного маятника со слабой нелинейностью 221

Стариков А.Н.
Самоторможение цангового механизма 234

Суханов А.А.
Метод интерполяционных разностей численного моделирования науглероживания стали 247

Филиппенко Г.В.
Гармонические колебания цилиндрической упругой оболочки с неоднородной плотностью. Учет инерции сечения оболочки при вычислении частот осесимметричных мод 267

Хрестина А.А., Исполов Е.М., Ларюшкин П.А.
Обобщенное решение обратной задачи о положениях параллельных механизмов *n*-PRR 280

Терешин В.А., Евграфов, А.Н. Каразин В.И., Хлебосолов И.О.
Двухступенчатая модель испытательного стенда для формирования ударного спектра 290

Хисамов А.В., Хлебосолов И.О.
Опрос каналов токосъема в процессе работы оборудования методом проверки состояния сухих контактов 302

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ И ТРАНСМИССИИ 313

Люминарский И.Е., Баласанян В.В., Люминарский С.Е.
Определение основных параметров сдвоенной волновой зубчатой передачи .. 315

Добрецов Р.Ю., Демидов Н.Н., Красильников А.А., Семенов А.Г.
Преселективная коробка передач для трансмиссий строительных и специальных транспортных машин 327

Добрецов Р.Ю., Красильников А.А., Демидов Н.Н., Семенов А.Г., Серов К.Н.
Особенности выбора параметров двухпоточного колесного редуктора портального моста для тракторов семейства «Кировец» 341

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ 353

Рудской А.И., Башкарев А.Я., Лебедева В.Ю.
Напряженное состояние антифрикционных полимерных покрытий в подшипниках скольжения 355

Волосова М.А., Митрофанов А.П., Мелешкин Я.Р., Федоров С.В.
Трибологические свойства покрытий диборида титана в условиях термомеханического воздействия 372

Скотникова М.А., Иванова Г.В., Цветкова Г.В., Куома Е.О., Мишарев Д.С.
Пластичные смазочные материалы для подшипниковых узлов трения 389

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА 401

Альвардт М.Я., Аль-Аражи Х.М.
Алгоритм управления в реальном времени для избегания препятствий и сингулярностей в роботизированном манипуляторе 403

Ассад А., Сериков С.А.
Разработка платформы «software-in-the-loop» для тестирования методов искусственного интеллекта, направленных на повышение точности оценки ориентации (БПЛА) 414

Бордюгов Д.В., Брискин Е.С., Шаронов Н.Г.
О формировании базовых траекторий движения «капсульноподобного» мобильного робота 422

Евсиков А.А., Коковин В.А., Леонов А.П., Сытин А.Н.
Об интеллектуальности и универсальности сервоприводов для систем управления промышленным оборудованием 432

Мусалимов В.М., Седакова Е.Б., Ерофеев М.А., Кузнецов А.О.
Моделирование реакций при ударно-фрикционном взаимодействии стопы с опорной поверхностью 447

Нелюбова А.В., Жога В.В.
Анализ кинематических и динамических характеристик манипулятора-трипода с дополнительной связью 460

Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В., Закатов В.В.
Математическая модель горизонтальной ударной машины с маятниковым инерционным блоком 471

Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В.
Анализ работы горизонтального стенда двунаправленного удара с маятниковым инерционным блоком 485

Чеканин В.А., Чеканин А.В.
Разработка алгоритма расстановки, учитывающего ограничения по минимальному расстоянию между особыми точками прямоугольных объектов 502

Чжан Цзиннянь, Волков А.Н., Янь Чуаньчао
Метод синтеза прямоугольного закона движения технологических машин для минимизации энергопотребления с учётом минимальной остаточной вибрации 517

Янь Чуаньчао, Волков А.Н., Чжан Цзиннянь, Ши Шуанюань
Мехатронные пневматические приводы с пружинными аккумуляторами и гибкими звеньями 537

Брянский А.А., Волков А.Н., Гусейнов К.М., Шабанов Д.В.
Зависимость энергопотребления двухзвенного ангулярного манипулятора от его размещения относительно траектории схвата 552

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 573

Никитин С.В.
Верификация динамической модели цепного конвейера с гусеничным приводом 575

Падалка М.А., Щеглов Д.К.
Теоретические и экспериментальные исследования тепловых процессов в технологических системах охлаждения с фазовым переходом 591

Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Сергушин П.А.
Технологическая система для калибровки магнитометров в условиях обсерватории 605

Соколов С.А., Грачев А.А.
Прогнозирование скорости развития усталостной трещины 614

Третьяков В.М.
Конструирование изделий машиностроения. Часть 1. Определение принципа действия 628

Третьяков В.М.
Конструирование изделий машиностроения. Часть 2. Построение конструкции 645

Григорьева Е.Д., Ушаков В.А.
Исследование статической модели распределения грузов по разнотипным транспортным средствам 661

Манжула К.П., Шлепетинский А.Ю.
Коэффициенты концентрации напряжений в сопряжении основного металла с наплавленным крестового сварного соединения при растяжении и изгибе 675

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ. СТАНКОСТРОЕНИЕ 695

Деева Е.Г., Гасюк Д.П.
Методика обоснования рационального состава средств измерения 697

Тимофеев С.П., Гринек А.В.
Технологическое и программно-аппаратное обеспечение механической обработки крупногабаритных тел вращения с нестационарной осью 704

Кудрявцев В.Н., Парамонова В.А.
Влияние подачи и твёрдости поверхности обрабатываемой заготовки из сталей и чугуна на скоростной режим резания резцами с пластинками из твёрдого сплава 719

Лопатов М.Г., Тимофеева О.С.
Перспективы применения аддитивных технологий для технологической подготовки листового штамповочного производства 737

Пьяе П.А., Помпеев К.П., Васильев О.С.
Перспективы создания лазерных установок на основе модульного принципа 751

Ковалев А.А., Рогов Н.В.
Выбор эффективного метода нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин с учетом их эксплуатационно-технических характеристик 770

Ткаченко М.Н., Помпеев К.П., Васильев О.С., Рамос-Веласкес А.
Модернизация лазерной сканирующей головки за счет использования блока изменения хода лазерного луча в пространстве 780

Ши Шуанюань, Шабалин Д.Н., Янь Чуаньчао, Лян Юаньцзе
Выбор рациональных значений подачи при токарной обработке для стали 40Х за счет объединения износа режущих инструментов и стружкодробления 796

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ 807

Кункин С.Н., Платонова А.С., Аксенов Л.Б.
Разработка групповой технологии торцевой раскатки с использованием нейросети 809

Лебедева В.Ю., Лазарев Ю.Г., Башкарев А.Я.
О прогнозировании долговечности композиционных полимерно-минеральных материалов 824

Буляница А.Л., Есикова Н.А., Евстрапов А.А.
Быстрое прототипирование многослойных полимерных микрофлюидных устройств 836

Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Белова С.Б., Егоров Е.Н.
Исследование ударной вязкости отожженных прутков из титанового сплава ВТ6 с разной структурой 847

Кутьин А.Ю., Щербакова Л.В., Мусалимов В.М.
Оптимизация процесса изготовления композитных полимерных оболочек вращения с использованием лазерной термообработки 859

Кузнецова Е.В., Мелешкин Я.Р., Курмышева А.Ю., Струневич Д.В.
Влияние добавления оксида графена на механические свойства наполненных керамикой полимерных филаментов для 3D печати 872

Дамаскинская Е.Е., Нефедьев Е.Ю., Стояновский Л.О., Фролов Д.И.
Определение момента страгивания трещины в сталях методом акустической эмиссии 882

Пищов М.Н., Бельский С.Е.
Изучение усталостных характеристик конструкционных сталей с упрочненными слоями и покрытиями 897

Кузнецов П.А., Лепетан К.В., Просторова А.О., Третьяков В.П., Теплухин В.Г.
Опыт применения двухкомпонентных полиуретанов при эластостатическом прессовании металлических порошков 911

Радкевич М.М., Кузьмичев И.С.
Электролитно-плазменное полирование наружных и внутренних поверхностей сложного профиля 922

Арсентьева К.С., Мамутов В.С., Просторова А.О., Третьяков В.П.
Технология и компьютерный расчет комбинированной электрогидроимпульсной штамповки 940

Третьяков Д.А., Куатхина Д.Б.
Неразрушающий ультразвуковой контроль упруго-пластических деформаций в алюминии путем измерения акустоупругого эффекта 955

Бадиков К.А., Савкин А.Н., Лебедев А.И., Седов А.А.
Исследование роста усталостных трещин в титановом сплаве в различном структурном состоянии при нерегулярном нагружении 978

Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И.
Экспериментальное исследование кавитационной эрозии плазменного композитного покрытия 988

ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ИННОВАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 997

Крыжевич Г.Б.
Конструирование основных несущих связей блок-модуля электрохимического генератора на основе топологической оптимизации 999

Ермаков С.П., Помпеев К.П.
Построение эскиза детали с использованием макросов и учетом технологии ее изготовления для проведения размерного анализа ТП 1011

Помпеев К.П., Тимофеев М.К.
Автоматизация размерно-точностного анализа ТП по элементам вращения при изготовлении осесимметричной детали из проката 1021

Веремейчик А.И.
Моделирование температурного поля при лазерной закалке сталей 1033

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 1045

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 004.896, 004.3, 372.862
doi:10.18720/SPBPU/2/id-95

А. Д. Клиновицкий[1], М.С.Ананьевский[2]

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ В ШКОЛЕ И ВУЗЕ



[1]Андрей Дмитриевич Клиновицкий,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (995)596-2767, E-mail: adk160501@gmail.com.



[2]Михаил Сергеевич Ананьевский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Институт проблем машиноведения РАН, Россия, Санкт-Петербург, E-mail: msaipme@gmail.com.

Аннотация

В работе, на основе опыта преподавания в школах, кружках и вузах, излагаются подходы к формированию лабораторной базы для решения задачи обучения будущих инженеров мобильной робототехнике. Рассматриваются типичные проблемы и предлагаются апробированные варианты их решения. Представлено несколько опорных учебных задач, моделирующих реальные промышленные приложения. Представлены результаты ОКР для создания лабораторной базы и перечень необходимого оборудования.

Ключевые слова: робототехника, обучение робототехнике, колесные роботы, управление роботами.

Введение

Сегодня сложно найти отрасль промышленности, в которой не использовались бы робототехнические решения. Роботы используются повсеместно: роботизированные склады [1], беспилотники для

мониторинга местности [2] и грузоперевозок [3], манипуляторы на конвейерном производстве [4] и т. д. Нарастающий кадровый голод уже привел к тому, что робототехнику ввели как обязательный модуль в школьный предмет «Труд» в 5-9 классах (273-й Федеральный закон «Об образовании»). Постепенно формируется лабораторная база для обучения робототехники в школах, как в Российской Федерации, так и за рубежом [5-9]. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта, происходящее в последнее десятилетие, добавляет новые требования к содержанию учебных курсов, которые, в свою очередь, создают требования к лабораторной базе.

Роботы из подручных материалов

Несмотря на кажущуюся простоту и несовершенство, роботы собранные «на коленке» из подручных материалов обладают большим потенциалом и способны показывать хорошие результаты на студенческих соревнованиях: так, например, робот изображенный на рисунке 1, победил на соревнованиях "Кубок РТК Высшая Лига: Доставка лекарств 2024" оставив далеко позади хорошо спроектированных роботов. В изображенном роботе используется Raspberry Pi, что расширяет его возможности с точки зрения обучения в вузах.

Робот, полностью собранный обучающимся из недорогих и доступных ресурсов, позволяет учащимся освоить основы робототехники без необходимости в сложных технических навыках и дорогостоящем оборудовании.

К примеру, в таком роботе можно использовать в качестве шасси систему питания робота, а именно готовый повербанк. Это удешевляет конструкцию и убирает необходимость в создании корпуса. Шасси включает два приводных и одно флюгерное колесо. На шасси легко внедрить любые датчики по необходимости, без дополнительного оборудования, используя двусторонний скотч. Датчики повышают интерактивности роботов, к примеру, датчик линии или датчики расстояния. В качестве микроконтроллера также используется Arduino.

Список минимальных комплектующих:

Повербанк – в качестве шасси и АкБ.

2 сервопривода MG996 и колес для него, в качестве приводных колес.

Флюгерное колесо, сделанное из шарика от подшипника.

Набор датчиков, включающих датчики линии и расстояния по необходимости.

Для создания робота с нуля не требуются какое-либо оборудование, все части закупаются готовыми и соединяются посредством двустороннего скотча.

Стимулирование учащихся к экспериментированию с материалами и конструкциями для развития инженерного мышления, а возможность создания уникальных деталей при помощи 3D-принтера (опционально) расширяет возможности образовательного процесса.

Недостатками такого решения являются:

1) Длительный процесс сборки — каждый робот уникален, что требует дополнительного времени преподавателю на поиск ошибок у обучающихся.

2) Ограниченная надежность — использование подручных материалов (например, двустороннего скотча) может привести к нестабильности конструкции

Преимущества:

1) Образовательная ценность — обучающиеся осваивают основы робототехники, микроэлектроники и программирования.

2) Низкая себестоимость — используются доступные материалы, что делает проект бюджетным.

3) Стимул для экспериментов — возможность использовать 3D-печать для уникальных деталей развивает инженерное мышление.

4) Междисциплинарность — интеграция механики, электроники и программирования в одном проекте.

5) Доступность для начинающих — отсутствие сложных инструментов позволяет сосредоточиться на творчестве и логике решения задач.



Рис. 1. Пример самодельного робота

Готовые решения

Главным преимуществом готовых роботов, это отсутствие необходимости в их разработке и сборке, настройки или поиска компонентов. Их можно использовать сразу после распаковки, что

экономит время и позволяет сосредоточиться на программировании, алгоритмах и решении задач, а не на технических нюансах конструкции.

Рассматривая готовые робототехнические решения с коммерчески доступными аналогами, доминирующими на отечественном рынке образовательной робототехники, такие как OmegaBot, представленный на рисунке 2, и Lego Mindstorms EV3, изображенный на рисунке 3.



Рис. 2. OmegaBot [10]



Рис. 3. Lego Mindstorms EV3 [11]

OmegaBot легко оперировать роботом, благодаря Arduino на борту, но с ограниченным количеством заданий из-за малого количества датчиков. Два датчика линии не позволяют обучающемся изучать сложные регуляторы движения, а магнитные крепления для датчиков не позволяет легко модифицировать платформу своими силами. Наличие Bluetooth

модуля позволяет использовать данного робота в режиме телеуправления, а возможность модификации с техническим зрением – использовать его для обучения в вузе. В производственном процессе используется лазерная резка, фрезеровка и 3D-печать.

Lego Mindstorms EV3 демонстрирует высокую эффективность в интеграции конструкторских и программно-алгоритмических аспектов обучения. Его модульная архитектура, основанная на стандартизированных элементах крепления, обеспечивает быстрое прототипирование и адаптацию под разноуровневые учебные задачи. Однако EV3 обладает рядом ограничений, главным из которых является закрытая экосистема, а именно совместимость только с оригинальными датчиками и актуаторами Lego, что повышает стоимость расширения функционала. В производственном процессе используется термопластавтомат, лазерная резка.

Преимуществом готовых решений является:

1) Модульность и скорость сборки.

2) Поддержка образовательных программ.

Недостатками является:

1) Ограниченный функционал и трудности в его расширении.

2) Высокая стоимость.

3) Закрытая экосистема.

4) Узкая специализация.

При проектировании образовательных программ по робототехнике ключевым вопросом становится выбор платформы, которая обеспечивает не только решение текущих учебных задач, но и формирует навыки, актуальные для будущей профессиональной деятельности. К примеру, следует отдавать предпочтения платформам на основе STM32 или Arduino, по сравнению с проприетарными микроконтроллерами.

Собственные разработки

Собственные разработки с одной стороны позволяют построить робототехническую базу под задачи, под которые обучают студентов, возможно продиктованные индустриальным партнером, с другой – позволяют расширить подготовку студентов с точки зрения конструирования и разработки робототехнических систем.

Для лабораторной базы был разработан мобильный робот, спроектированный для максимальной гибкости и адаптивности в обучении. В основном, робот разрабатывался как платформа, которую легко модифицировать под необходимые задачи в обучении, показанный на рисунке 4. Его базовая конструкция включает:

Шасси: состоит из двух опорных колес с независимым управлением и флюгерное колесо, обеспечивающих устойчивость и маневренность.

Микроконтроллер: используется микроконтроллер Arduino Uno, являющийся легким в освоении и не требующим специализируемых навыков для работы с ним [12].

Датчики:

Модуль движения по линии, состоящий из 4 оптопар TCRT5000 и датчика цвета TCS3200, позволяющий распознавать оттенки, что актуально для задач сортировки и логистики. Наличие больше двух датчиков позволяет создавать сложные регуляторы, на подобии ПИД. Датчик движения по линии показан на рисунке 5.

Лазерные дальномеры VL53L0X для измерения расстояний и решения задач навигации в лабиринтах.

Датчик освещенности (фоторезисторы), расширяющий возможности навигации в изменяющихся условиях.

Движители: два сервопривода постоянного вращения (MG996), выбранные за их преимущества перед традиционными двигателями постоянного тока, благодаря интеграции энкодера, двигателя и драйвера в одном корпусе [13]. Возможность плавного регулирования скорости и момента без дополнительных схем управления делают их лучшим выбором в качестве движителей для робототехнических платформ в обучении.

Визуализация: Две индикаторные полосы на адресных светодиодах (по 9 элементов каждая), отображающие стрелки и поддерживающие цветовые сигналы. Это не только упрощает отладку, но и имитирует интерфейсы промышленных роботов, позволяя выводить информацию от робота пользователю.

Модульность: Возможность интеграции дополнительных датчиков (например, гироскопов) или манипуляторов через универсальные интерфейсы (UART, I2C), либо цифровые или аналоговые пины.

Для создания робота с нуля необходимо использовать 3D-принтер, CO2 лазерный станок, паяльную станцию и иметь базовые навыки в САПР, к примеру, в Компас-3D. Для подключения всей электроники используется схема, показанная на рисунке 6, с указанными интерфейсами подключения устройств.

Преимуществами собственных решений является:

1) Образовательная ценность.
2) Стимул для экспериментов.
3) Междисциплинарность.

Недостатками является:

1) Необходимость в станках.
2) Длительный процесс разработки и тестирования.
3) Необходимость в многопрофильных преподавателях.



Рис. 4. Платформа для обучения

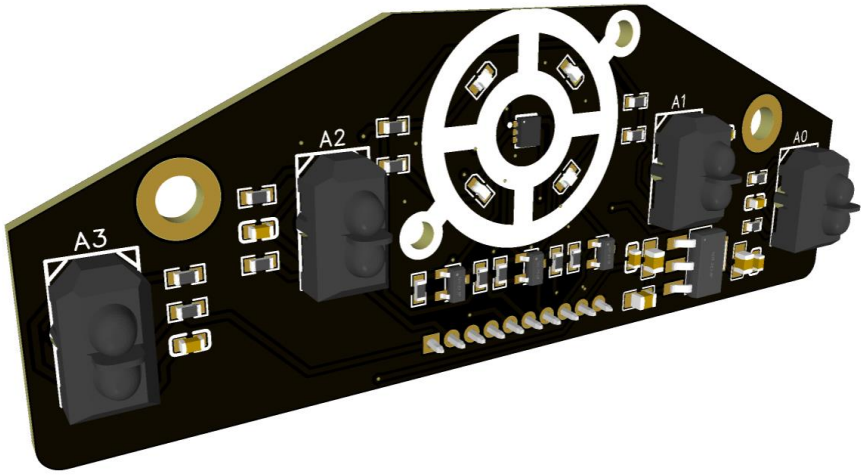


Рис. 5. Датчик движения по линии

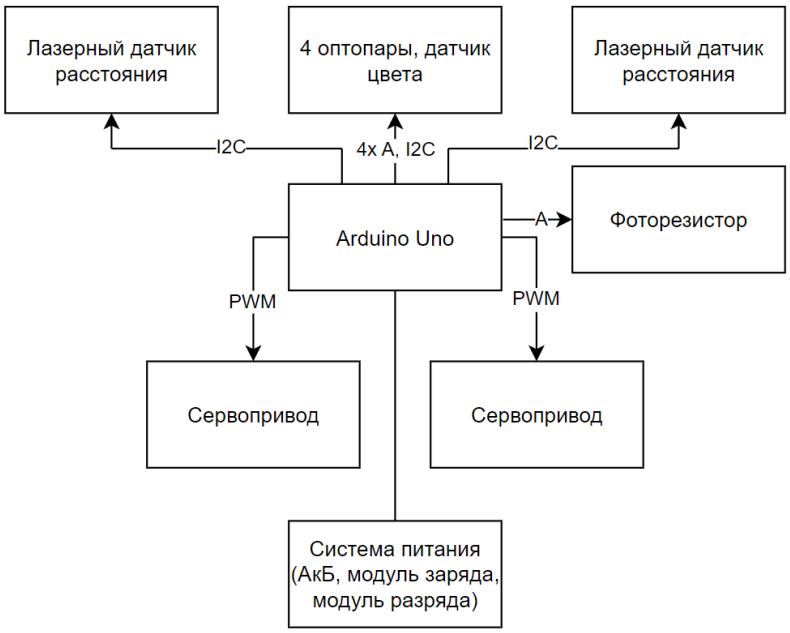


Рис. 6. Схема управляющей платы

В образовательном процессе ключевыми модельными задачами, отражающими реальные инженерные задачи, являются движение по линии и телеуправление роботом.

Первая задача имитирует навигацию складских роботов, требующую разработки алгоритмов следования по траектории (например, ПИД-регуляторы) и интеграции систем локализации (датчики линии, ИК-камеры). Ее усложненная версия включает координацию группы роботов, что актуально для изучения распределенных систем управления и предотвращения коллизий.

Вторая задача — телеуправление — направлена на освоение дистанционного взаимодействия с роботом через Bluetooth, Wi-Fi или радиоканалы. Она охватывает сценарии исследования труднодоступных зон: прохождение лабиринта (наземный робот), картографирование морского дна (подводный дрон) или мониторинг территорий (квадрокоптер).

Такие задачи развивают навыки работы с системами «робот-оператор», обработки данных с сенсоров и адаптации к изменяющимся условиям среды. Обе задачи служат основой для междисциплинарного обучения, объединяя механику, электронику и программирование, а также готовят студентов к решению прикладных проблем в логистике, экологическом мониторинге и роботизированной разведке.

Проблемы современного образования

В современных образовательных системах наблюдается тенденция приобретения высокотехнологичных образовательных роботов, которые не

интегрируются в учебный процесс. Основными барьерами выступают высокая стоимость оборудования и риски его повреждения, что приводит к его хранению в не распакованной упаковке. Данная практика усугубляется отсутствием гарантированного сервисного обслуживания, что возлагает на педагогический персонал ответственность за сохранность устройств без предоставления инструментов для их восстановления, а образовательные наборы выходят из строя примерно в течение 6-18 месяцев активной эксплуатации. Как следствие, образовательные организации сталкиваются с ситуацией, когда инвестиции в новые технологии не повышают качество обучения, а полученное оборудование превращается в актив, используемый преимущественно для демонстрации технологической оснащенности учреждения.

Ключевым решением обозначенной проблемы является использование робототехнических комплексов с модульной архитектурой и открытой элементной базой, представленные выше. Такие устройства обладают значимым преимуществом: их ремонтопригодность обеспечивается за счет замены компонентов стандартными инструментами и доступными материалами, что исключает зависимость от необходимости в постоянном дорогостоящем обслуживании. В условиях школы, где отсутствуют специализированные станки для технического обслуживания, а из оборудования есть обычно только 3D-принтер, эта характеристика становится критически важной. Упрощенная конструкция позволяет учащимся самостоятельно участвовать в восстановлении работоспособности устройств, превращая поломку в образовательный процесс.

Таким образом, выбор простых роботов не только снижает эксплуатационные риски, но и способствует формированию практических инженерных навыков, обеспечивая устойчивое внедрение технологий в учебный процесс без страха их преждевременного выхода из строя.

Результаты

В результате работы можно выделить преимущества и недостатки обсужденных решений, показанные в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение образовательных робототехнических платформ

Вариант робота	Преимущества	Недостатки
Робот из подручных средств	1) Образовательная ценность 2) Низкая себестоимость 3) Стимул для экспериментов 4) Междисциплинарность 5) Доступность для начинающих	1) Длительный процесс сборки 2) Ограниченная надежность

Готовое решение	1) Модульность и скорость сборки 2) Поддержка образовательных программ	1) Ограниченный функционал и трудности в его расширении 2) Высокая стоимость 3) Закрытая экосистема 4) Узкая специализация
Самодельный робот	1) Образовательная ценность 2) Стимул для экспериментов 3) Междисциплинарность	1) Необходимость в станках 2) Длительный процесс разработки и тестирования 3) Необходимость в многопрофильных преподавателях

Использование самодельных роботов в обучении продемонстрировало значительное повышение интереса обучающихся к робототехнике. Апробация методики проходила на обучающихся 10-11 и 5-9 классов. В результате у обучающихся возросла мотивация (по сравнению с обучением на существующих робототехнических наборах) благодаря возможности самостоятельно собрать робота из доступных компонентов, который остается у обучающихся, а не у учебного заведения. Низкая стоимость комплектующих и отсутствие необходимости в специализированном оборудовании сделали возможным модифицировать робота после окончания обучения.

Ключевые результаты включают:

- Повышение вовлеченности. Многие из обучающихся не встречались в жизни с робототехникой, а возможность оставить робота себе повысила их мотивацию и вовлеченность в процесс.
- Улучшение практических навыков. Обучающиеся освоили базовые навыки, такие как 3D-моделирование и базовое программирование C/C++.
- Креативность и адаптивность. Обучающиеся экспериментировали с конструкциями, используя подручные материалы (например, картон для корпусов), что подтвердило гипотезу о важности гибкости в инженерном проектировании.

Обсуждение

Требуется формирование лабораторной базы, которая позволит создавать роботов как «на коленке», так и профессиональным уровнем, в зависимости от образовательного учреждения и какого специалиста готовят и подобные вещи должны централизовано финансироваться.

Также инженерных компетенций могут формироваться как при изучении базовых профессиональных дисциплин (к примру инженерная графика, начертательная геометрия), так и при комплексных, таких как робототехника [14], [15].

Полученные результаты согласуются с исследованиями, подчеркивающими роль доступности ресурсов в образовательной робототехнике. Например, в работах [16], [17] указывают, что снижение финансовых и технических барьеров повышает вовлеченность учащихся из менее обеспеченных регионов. Использование дешевых роботов дополняет эти выводы, предлагая конкретный алгоритм действий.

Значимость результатов:

- Доступность дополнительного образования. Подход устраняет зависимость от дорогостоящих наборов (например, LEGO Mindstorms), делая робототехнику доступной для школ и учеников с ограниченным бюджетом.
- Формирование инженерного мышления. Акцент на экспериментировании развивает навыки решения реальных задач, что соответствует трендам STEM-образования [18].
- Подготовка кадров. Упрощение начальных этапов обучения создает базу для углубленного изучения робототехники, что критически важно в условиях цифровой трансформации промышленности [19].

Ограничением исследования является фокус на базовых проектах. Однако, даже простые системы служат эффективным инструментом для формирования системного мышления.

Заключение

В статье рассмотрены различные робототехнические наборы, используемые в образовании и предложена методика обучения робототехнике с использованием доступных компонентов, которая доказала свою эффективность в повышении мотивации и практических навыков учащихся. Ключевые преимущества подхода включают низкую стоимость, простоту реализации и акцент на творчестве обучающихся, что позволяет интегрировать его в учебные программы школ и вузов без значительных ресурсных затрат, а также для индивидуального обучения.

Практическим применением методики может быть:

- Внедрение в курсы технологии и информатики для формирования базовых компетенций.
- Использование в программах дополнительного образования для профориентации.

Перспективы методики:

- Расширение функциональности роботов за счет интеграции IoT и машинного обучения.
- Разработка открытых библиотек 3D-моделей для печати деталей для роботов такого типа.

- Исследование долгосрочного влияния методики на профессиональный выбор учащихся.

Предложенный подход не только расширяет доступ к робототехнике, но и увеличивает количество обучающих, способных мыслить нестандартно и адаптироваться к быстро меняющимся технологическим реалиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Мельников С. Е., Панюшкина А. А., Чертовских А. С. Преимущества и недостатки роботизированных складов //Тенденции развития науки и образования. – 2021. – №. 75-1. – С. 133-136.

[2] Никитина А. А., Уланов С. И. Обнаружение объектов на местности интеллектуальными роботами в быстроменяющейся обстановке //Проблемы искусственного интеллекта. – 2023. – №. 3 (30). – С. 36-43.

[3] Хайбуллина Э. Э., Мазуренко О. И., Русинов И. В. Применение современных информационных технологий в транспортной логистике и их влияние на эффективность грузоперевозок //Транспортное дело России. – 2021. – №. 1. – С. 130-134.

[4] Ахметзянов К. Р. Нейро-сетевые методы и алгоритмы самообучения при обработке данных в системе автоматизации процесса сортировки бытовых отходов. – 2021.

[5] Пустыльник П. Н. Инженерное образование и робототехника в школе: профессиональная ориентация школьников //Инженерное образование. – 2023. – №. 33. – С. 49-61.

[6] Topalov A. et al. Analysis of Software for Development and 2D/3D Modeling of Robotic Systems in Academia and Industry //International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 109-120.

[7] Tzagkaraki E., Papadakis S., Kalogiannakis M. Exploring the Use of Educational Robotics in primary school and its possible place in the curricula //Educational Robotics International Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – С. 216-229.

[8] Darmawansah D. et al. Trends and research foci of robotics-based STEM education: A systematic review from diverse angles based on the technology-based learning model //International Journal of STEM Education. – 2023. – Т. 10. – №. 1. – С. 12.

[9] Chaidi E. et al. Educational robotics in Primary Education. A case in Greece //Research, Society and Development. – 2021. – Т. 10. – №. 9. – С. e17110916371-e17110916371.

[10] Базовый набор OmegaBot [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://robotbaza.ru/product/bazovyy-nabor-omegabot (дата обращения: 1.04.2025).
[11] Конструктор Lego Mindstorms EV3 (31313) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.banggood.com/601-Pieces-LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313-Robot-Kit-with-Remote-Control-for-Kids-Educational-STEM-Toy-for-Programming-and-Learning-How-to-Code-p-1732619.html?cur_warehouse=CN (дата обращения: 1.04.2025).
[12] Hurtuk J., Chovanec M., Ádam N. The Arduino platform connected to education process //2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). – IEEE, 2017. – С. 000071-000076.
[13] Елесеев И. М., Турлубеков Д. Т. Основы управления движением сервопривода //Рецензент. – 2023. – С. 286.
[14] Маркова Т. В., Третьяков В. П. Формирование инженерных компетенций при изучении базовых профессиональных дисциплин. – 2024.
[15] Толстова Н. А., Бондаренко Д. А., Ганьшин К. Ю. Образовательная робототехника как составляющая инженерно-технического образования //Наука. Инновации. Технологии. – 2013. – №. 3. – С. 171-177.
[16] Наумов А. Социокультурный барьер и доступность дополнительного образования //Образовательная политика. – 2022. – №. 3 (91). – С. 84-94
[17] Filmer D. P., Rogers F. H. World Development Report 2018: Learning to Realize Education's Promise. – 2019.
[18] Каримова Б. Т. STEM-обучение-инновационный подход в современном образовании //Innovation Management and Technology in the Era of Globalization. – 2018. – С. 107-111.
[19] Акбердина В. В., Пьянкова С. Г. Методологические аспекты цифровой трансформации промышленности //Научные труды Вольного экономического общества России. – 2021. – Т. 227. – №. 1. – С. 292-313.

A.D.Klinovitskiy[1], M.S.Ananyevskiy [2]

FORMATION OF A LABORATORY BASE FOR TEACHING MOBILE ROBOTICS IN SCHOOLS AND UNIVERSITIES

[1,2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences.

Abstract

In this work, based on the experience of teaching in schools, clubs, and universities, approaches to the formation of a laboratory base for training future engineers in mobile robotics are presented. Typical problems are discussed, and proven solutions are suggested. Several foundational educational tasks modeling real industrial applications are presented. The results of R&D for the creation of a laboratory base and a list of necessary equipment are also provided.

Key words: robotics, robotics education, wheeled robots, robot control.

REFERENCES

[1] Melnikov S. E., Panyushkina A. A., Chertovskikh A. S. Advantages and Disadvantages of Robotic Warehouses // Trends in the Development of Science and Education. – 2021. – No. 75-1. – P. 133-136.
[2] Nikitina A. A., Ulanov S. I. Detection of objects in the environment by intelligent robots in a rapidly changing situation // Problems of Artificial Intelligence. – 2023. – No. 3 (30). – P. 36-43.
[3] Khaibullina E. E., Mazurenko O. I., Rusinov I. V. Application of modern information technologies in transport logistics and their impact on the efficiency of cargo transportation // Transport Business of Russia. – 2021. – No. 1. – P. 130-134.
[4] Akhmetzyanov K. R. Neural network methods and self-learning algorithms for data processing in the automation system of household waste sorting process. – 2021.
[5] Pustylnik P. N. Engineering Education and Robotics in Schools: Career Guidance for Students // Engineering Education. – 2023. – No. 33. – pp. 49-61.
[6] Topalov A. et al. Analysis of Software for Development and 2D/3D Modeling of Robotic Systems in Academia and Industry //International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 109-120.
[7] Tzagkaraki E., Papadakis S., Kalogiannakis M. Exploring the Use of Educational Robotics in primary school and its possible place in the curricula //Educational Robotics International Conference. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – С. 216-229.
[8] Darmawansah D. et al. Trends and research foci of robotics-based STEM education: A systematic review from diverse angles based on the technology-based learning model //International Journal of STEM Education. – 2023. – Т. 10. – №. 1. – С. 12.

[9] Chaidi E. et al. Educational robotics in Primary Education. A case in Greece //Research, Society and Development. – 2021. – Т. 10. – №. 9. – С. e17110916371-e17110916371.
[10] OmegaBot Basic Kit [Electronic resource]. – Access mode: https://robotbaza.ru/product/bazovyy-nabor-omegabot (accessed: April 1, 2025).
[11] Lego Mindstorms EV3 (31313) Kit [Electronic resource]. – Access mode: https://ru.banggood.com/601-Pieces-LEGO-MINDSTORMS-EV3-31313-Robot-Kit-with-Remote-Control-for-Kids-Educational-STEM-Toy-for-Programming-and-Learning-How-to-Code-p-1732619.html?cur_warehouse=CN (accessed: April 1, 2025).
[12] Hurtuk J., Chovanec M., Ádam N. The Arduino platform connected to education process //2017 IEEE 21st International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). – IEEE, 2017. – С. 000071-000076.
[13] Yeleseyev I. M., Turlubekov D. T. BASICS OF SERVO DRIVE MOTION CONTROL // Reviewer. – 2023. – P. 286.
[14] Markova T. V., Tretyakov V. P. Formation of engineering competencies in the study of basic professional disciplines. – 2024.
[15] Tolstova N. A., Bondarenko D. A., Ganshin K. Yu. Educational Robotics as a Component of Engineering and Technical Education // Science. Innovations. Technologies. – 2013. – No. 3. – pp. 171-177.
[16] Naumov A. Sociocultural Barrier and Accessibility of Additional Education // Educational Policy. – 2022. – No. 3 (91). – pp. 84-94.
[17] Filmer D. P., Rogers F. H. World Development Report 2018: Learning to Realize Education's Promise. – 2019.
[18] Karimova B. T. STEM education - an innovative approach in modern education // Innovation Management and Technology in the Era of Globalization. – 2018. – P. 107-111.
[19] Akberdina V. V., P'yankova S. G. Methodological aspects of the digital transformation of industry // Scientific Works of the Free Economic Society of Russia. – 2021. – Vol. 227. – No. 1. – P. 292-313.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.146
doi:10.18720/SPBPU/2/id-96

П.А. Андриенко[1], А.Н. Евграфов[2], П.В. Ковалев[3], Д.П. Козликин[4]

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА В ОБРАЗОВАНИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ В РАЗНЫХ ВУЗАХ И ДИСЦИПЛИНАХ



[1]Павел Александрович Андриенко,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: andrienko-p@mail.ru



[2]Александр Николаевич Евграфов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: alexevgrafov@mail.ru.



[3]Павел Валерьевич Ковалев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: kovalev_pv@spbstu.ru



[4]Денис Петрович Козликин,к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел. +7 (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com

Аннотация

В статье проведён комплексный анализ балльно-рейтинговой системы (БРС) в сравнении с традиционными и альтернативными методами оценивания. На основе данных российских и зарубежных вузов (МГУ, НИУ ВШЭ, МГТУ, СПбПУ, MIT, Harvard, Stanford и др.) выявлены особенности

применения БРС в технических, гуманитарных и естественно-научных дисциплинах. Использованы методы систематического обзора, анкетирования студентов и анализа успеваемости за 2020–2023 гг. Результаты показывают, что БРС повышает успеваемость на 12–18% в технических дисциплинах, но менее эффективна в творческих предметах. Обсуждаются рекомендации по адаптации системы для разных направлений подготовки.

Ключевые слова: балльно-рейтинговая система, методы оценивания, технические дисциплины, гуманитарные науки, академическая успеваемость.

Введение

Современная система высшего образования сталкивается с необходимостью постоянного совершенствования методов оценивания учебных достижений студентов. Одним из таких методов является балльно-рейтинговая система (БРС), которая заменила традиционные экзаменационные подходы во многих вузах мира. БРС основана на накопительном принципе, что позволяет студентам постепенно формировать свою итоговую оценку в течение семестра, снижая стресс от финальных экзаменов и повышая мотивацию к регулярной работе. Однако, несмотря на очевидные преимущества, эффективность БРС варьируется в зависимости от дисциплины, что требует детального изучения и адаптации системы под различные направления подготовки.

Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа эффективности БРС в технических, гуманитарных и естественно-научных дисциплинах на примере ведущих российских и зарубежных вузов. В работе рассматриваются ключевые аспекты внедрения БРС, её преимущества и недостатки, а также предлагаются рекомендации по оптимизации системы для разных областей знаний.

Методы

Целью работы является сравнительный анализ эффективности балльно-рейтинговой системы (БРС) в разных типах дисциплин (технических, гуманитарных и естественно-научных) на примере ведущих российских и зарубежных вузов; оценить влияние БРС на успеваемость студентов в технических, гуманитарных и естественно-научных дисциплинах; сравнить результаты внедрения БРС в российских (МГУ, НИУ ВШЭ, СПбПУ, МГТУ) и зарубежных (MIT, Stanford) вузах. Проанализировать объективность, мотивацию студентов и нагрузку на преподавателей при использовании БРС; изучить проблемы, связанные с формализацией оценивания в творческих дисциплинах. Предложить

адаптированные модели БРС для разных направлений подготовки. Рассмотреть возможности цифровизации и автоматизации процессов оценивания для снижения нагрузки на преподавателей.

На основании нормативных документов [4, 22] можно сформулировать назначение БРС следующим образом:

1. Стимулирование регулярной работы – студенты получают баллы за каждое выполненное задание, что снижает роль "одноразовых" экзаменов.
2. Прозрачность оценивания – критерии начисления баллов известны заранее, что уменьшает субъективность.
3. Дифференциация уровня подготовки – система позволяет точнее оценить активность и знания каждого студента.

Анализируя сведения, опубликованные в источниках [5-10], можно выделить следующие преимущества БРС:

1. Повышение мотивации за счёт пошагового накопления баллов.
2. Снижение стресса перед итоговыми экзаменами, так как оценка формируется в течение семестра.
3. Возможность самоконтроля для студентов благодаря открытой системе подсчёта баллов.
4. Гибкость системы, позволяющая учитывать разные виды учебной деятельности (посещение, активность, контрольные работы).

В то же время авторы отмечают и недостатки БРС:

1. Увеличение нагрузки на преподавателей из-за необходимости постоянного мониторинга и подсчёта баллов.
2. Риск «натаскивания» на баллы, когда студенты фокусируются только на формальных критериях, а не на глубине знаний.
3. Неравномерное распределение баллов может вызывать конфликты между студентами и преподавателями.
4. Ограниченная эффективность в некоторых дисциплинах, где важнее творческий подход, а не пошаговая оценка.

Структура и принципы работы балльно-рейтинговой системы

БРС, как правило, представляет накопительную систему оценивания**,** в которой академические достижения студента измеряются в баллах, начисляемых за различные виды учебной деятельности.

Выделяют следующие основные компоненты БРС:

1. Модульная структура – курс разбивается на блоки (темы, разделы), каждый из которых оценивается отдельно.
2. Виды оцениваемой деятельности (примеры):
   - Посещение лекций и семинаров (5–10% от общего рейтинга).
   - Активность на занятиях (10–15%).
   - Контрольные работы, тесты (20–30%).

- Домашние задания и проекты (15–25%).
- Итоговый экзамен/зачёт (20–40%).

3. Шкала перевода баллов в оценку (пример):
   - 85–100 баллов → "отлично",
   - 70–84 → "хорошо",
   - 55–69 → "удовлетворительно",
   - менее 55 → "неудовлетворительно".
4. Принципы начисления баллов:
   - Прозрачность – все критерии оглашаются в начале курса.
   - Накопительный эффект – баллы суммируются в течение семестра.
   - Дифференциация – сложные задания оцениваются выше.
   - Гибкость – возможность пересдачи или дополнительных заданий для повышения рейтинга.
5. Объективность начисления баллов

БРС считается более объективной, чем традиционная система, поскольку:

- минимизирует субъективность преподавателя за счёт чётких критериев;
- позволяет студенту контролировать свой прогресс;
- снижает влияние случайных факторов (например, стресса на экзамене).

Однако остаются риски:

- неоднородность требований разных преподавателей;
- возможные технические ошибки при подсчёте баллов;
- манипуляции со стороны студентов (например, "натаскивание" на определённые задания).

Результаты

Сравнение БРС с другими методами оценивания проводилось на основании статистического анализа успеваемости в 3 вузах: МГУ им. М.В. Ломоносова, НИУ ВШЭ и СПбПУ (с 2024 года в СПбПУ используется балльная система оценивания – БСО):

- МГУ (естественные науки) – данные по 500 студентам физфака (2021–2023) [1].
- НИУ ВШЭ (гуманитарные науки) – опрос 200 студентов по курсам истории и философии [2].
- СПбПУ (технические дисциплины) – сравнение среднего балла групп с БРС и без неё (n=300) [3].

Результаты сравнения сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение БРС с другими методами оценивания

Критерий	БРС	Традиционная система	Портфолио	ECTS
Объективность	Высокая (80–90%)*	Низкая (50–60%)	Средняя (70%)	Высокая (85%)
Мотивация	+++	+	++	+++
Нагрузка на преподавателей	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя
Гибкость	Да	Нет	Да	Да

*Данные опроса преподавателей НИУ ВШЭ, 2022 [2].

Эффективность БРС в разных дисциплинах

a. Технические дисциплины (математика, программирование).

В СПбПУ внедрение БРС институте компьютерных наук и технологий (ИКНТ) повысило средний балл с 3.8 до 4.2 (2020–2023) [3].

Причины успеха:

- Чёткие критерии выполнения задач (например, баллы за каждую решённую задачу).
- Возможность накопления баллов за лабораторные работы.

b. Гуманитарные дисциплины (история, философия):

В НИУ ВШЭ 45% студентов отметили, что БРС не учитывает творческие эссе [2].

Проблемы:

- Субъективность оценки дискуссий.
- Избыточная формализация (например, баллы за «количество слов в работе»).

c. Естественно-научные дисциплины (физика, химия):

В МГУ БРС сократила доля "случайных двоек" на экзаменах с 15% до 7% [1].

Внедрение БРС в СПбПУ: структура и статистика

В институте компьютерных наук и технологий СПбПУ начали внедрение элементов балльно-рейтинговой системы в 2019 году.

Ключевые параметры системы:

- Модульность: каждый семестр разбит на 3–4 модуля (теория, практика, лабораторные работы).
- Распределение баллов:
    - Лабораторные работы — 40% (автоматическая проверка через GitLab/JudgeSystem).
    - Контрольные точки — 30% (тесты на платформе Moodle).
    - Проектная работа — 20%.
    - Активность (посещение, участие в семинарах) — 10%.
- Порог для допуска к экзамену: 60+ баллов.

Сравнение успеваемости за 2020-2023 гг. сведено в таблицу 2.

Таблица 2. Статистика успеваемости (2020–2023 гг.) [5]

Показатель	До БРС (2018)	После БРС (2023)	Изменение
Средний балл	3.8	4.2	+10.5%
Доля оценок «неудовлетворительно»	12%	5%	–58%
Сроки сдачи лабораторных	3.5 недели	2.1 недели	–40%

Сравнение БРС с традиционной (на примере дисциплины «Алгоритмы и структуры данных») приведено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение БРС с традиционной системой

Критерий	БРС (2023)	Традиционная система (2018)
Глубина усвоения	4.1/5 (по тестам)	3.6/5
Количество пересдач	8%	22%
Удовлетворённость студентов*	78%	54%

*Данные анкетирования 150 студентов (шкала 1–5, где 5 — максимум).

Причины улучшений:

- Автоматизация проверки (например, система CodeReview в курсе программирования).
- Постепенное накопление баллов снизило "авральную" нагрузку перед экзаменом.
- Прозрачность**:** студенты видят свой рейтинг в реальном времени через LMS Canvas.

Выявленные недостатки:

- Перегрузка преподавателей:
  - Ручная проверка проектов занимает на 25% больше времени, чем при традиционной системе.
  - Решение: внедрение AI-ассистентов для первичной оценки кода (пилот в 2024 г.).
- Гонка за баллами:
  - 15% студентов фокусируются только на "лёгких" заданиях, игнорируя сложные темы.
  - Решение: введение минимальных порогов по каждому модулю (например, 50% баллов за алгоритмы).
- Технические сбои:
  - в 2022 году 7% баллов были начислены ошибочно из-за багов в системе.
  - Решение: двойная верификация оценок ассистентами.

Рекомендации для других технических вузов

1. Для программирования:
   - Использовать автоматические тесты (например, Unit-тесты в Java/Python-курсах).
   - Добавить баллы за «чистоту кода» и документацию.
2. Для инженерных дисциплин:
   - Оценивать не только результат, но процесс (например, черновики расчётов в CAD).
   - Ввести групповые баллы за проекты (по аналогии с MIT [17]).
3. Для математики:
   - Разделить баллы за решение и обоснование (например, 70/30 %).
   - Разрешить частичный зачёт (накопление баллов из разных задач).

Один из ведущих технических вузов России – МГТУ им. Н.Э. Баумана, поэтому авторы сравнили реализацию БРС в СПбПУ [5] с МГТУ [6]. Результаты сравнения приведены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение БРС в СПбПУ и МГТУ им. Н.Э. Баумана

Параметр	СПбПУ (ИКНТ, 2020–2023)	МГТУ им. Баумана (Факультет ИУ, 2019–2023)
Структура баллов	40% – лабы, 30% – тесты, 20% – проект, 10% – активность	50% – практика, 30% – экзамен, 20% – курсовые
Автоматизация	GitLab/JudgeSystem + Moodle	1С:Университет + внутренняя СДО
Допуск к экзамену	60+ баллов	70+ баллов (жёсткий порог)
Средний балл	4.2 (↑10.5% с 2018)	4.0 (↑8% с 2018)
Доля отчислений	5% (↓58%)	7% (↓45%)

Выводы:

- В МГТУ выше доля экзаменационной оценки (30% против 0% в СПбПУ), что сохраняет элементы традиционной системы.
- В СПбПУ успех связан с гибкостью (пересдачи лабораторных работ без штрафа).
- В МГТУ строгая система «70+ баллов → экзамен» мотивирует готовиться непрерывно [6].

Общие проблемы:

- Ручная проверка: в МГТУ 35% времени преподавателей тратится на оценку чертежей (vs 25% в СПбПУ) [6].
- Студенческий стресс: в МГТУ 40% студентов отмечают высокую нагрузку из-за жёстких дедлайнов [3].

Уникальные решения:

- СПбПУ: внедрение AI-ассистента для проверки кода (пилот 2024).
- МГТУ: «бонусные баллы» за участие в олимпиадах (до +10% к рейтингу) [7].

Для сравнения с зарубежным опытом авторы выбрали Massachusetts Institute of Technology (MIT), компьютерные науки, и Stanford University, технические науки

MIT (компьютерные науки):

- Аналог БРС — "Point System" с жёсткими дедлайнами (-20% баллов за опоздание).
- Доля самостоятельных работ — 50% (против 20% в СПбПУ) [17].

Stanford (технические науки):

- Используется «Mastery Learning»: студенты пересдают темы до достижения порога в 80% [18].

Вывод: БРС в СПбПУ близка к зарубежным аналогам, но требует большей гибкости в инженерных курсах.

Обсуждение

Для технических направлений рекомендуется акцент на автоматизированный контроль (тесты, программируемые задания).

В гуманитарных науках целесообразно комбинировать БРС с экспертной оценкой эссе.

В естественно-научных курсах важно балансировать между теорией (баллы за расчёты) и практикой (эксперименты).

Культурные различия: в зарубежных вузах (например, University of Helsinki) БРС чаще дополняется peer-assessment [13, 15].

Технические сложности: 30% преподавателей МГУ отмечают трудности с ведением цифровых журналов [1].

Рекомендации для технических вузов

1. Гибридная модель: комбинировать БРС (60%) и экзамен (40%) как в МГТУ.
2. Цифровизация: внедрять автоматические проверки (СПбПУ → код, МГТУ → CAD-модели).
3. Индивидуальные траектории: бонусные баллы за исследования/ стартапы.

Балльно-рейтинговая система демонстрирует значительный потенциал в повышении качества образования за счёт непрерывного контроля и прозрачности оценивания. Однако её внедрение требует тщательной адаптации под специфику дисциплин и баланса между формальными и содержательными критериями. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию БРС с учётом цифровых технологий (например, автоматизированный подсчёт баллов) и психологических аспектов мотивации студентов.

Этот анализ показывает, что БРС в технических дисциплинах работает эффективно, но требует постоянной адаптации под цифровые инструменты и специфику предметов.

Заключение

БРС демонстрирует высокую эффективность в технических дисциплинах, повышая успеваемость на 12–18% и сокращая количество неудовлетворительных оценок. Например, в СПбПУ средний балл вырос с 3.8 до 4.2 после внедрения системы.

В гуманитарных науках БРС менее эффективна из-за субъективности оценки творческих работ и избыточной формализации.

БРС превосходит традиционные методы по объективности (80–90% против 50–60%) и мотивации студентов, но требует больших временных затрат от преподавателей.

Зарубежный опыт (MIT, Stanford) показывает, что гибкость и автоматизация являются ключевыми факторами успеха БРС.

Для технических дисциплин можно предложить внедрение автоматизированных систем проверки (например, Unit-тестов), сделав акцент на процесс выполнения заданий. Для гуманитарных дисциплин более адекватной представляется комбинация БРС с экспертной оценкой и peer-assessment. Для естественно-научных дисциплин рекомендуется соблюдение разумного баланса между теоретическими и практическими компонентами оценивания.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию БРС с использованием цифровых технологий (AI-ассистенты, LMS) и учётом психологических аспектов мотивации студентов.

Таким образом, балльно-рейтинговая система представляет собой перспективный инструмент для повышения качества образования, однако её успешное внедрение требует учёта специфики дисциплин и постоянной адаптации к современным образовательным реалиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] МГУ им. Ломоносова (2023). Отчёт по эффективности БРС на физическом факультете.

[2] НИУ ВШЭ (2022). Опрос студентов гуманитарных направлений. — URL: hse.ru/brs_survey

[3] Иванов А.А. (2021). Стрессовые факторы в технических вузах. Высшее образование в России, 30(3), 45–59.

[4] Минобрнауки РФ (2021). Методические рекомендации по внедрению БРС. — URL: minobrnauki.gov.ru/standards

[5] СПбПУ (2023). Анализ успеваемости на ФКН за 2020–2023 гг. — URL: spbstu.ru/brs_report
[6] МГТУ им. Баумана (2022). Реализация БРС на факультете ИУ. — URL: bmstu.ru/iu_rating
[7] Петрова С.К. (2020). Мотивация студентов инженерных специальностей. Инженерный вестник, 15(2), 112–130.
[8] Сидоров В.П. (2019). Балльно-рейтинговая система: теория и практика. М.: Изд-во МГТУ.
[9] Кондратьева С. Ю., Ковалева М. В. Характеристика целостной педагогической системы профориентационной работы с обучающимися / С.Ю. Кондратьева, М.В. Ковалева // Современные векторы развития специального и инклюзивного образования. - Ярославль, 2024. - с. 205-210.
[10] Кондратьева С. Ю., Ковалева М. В. Характеристика целостной педагогической системы профориентационной работы с обучающимися разных уровней обучения / С.Ю. Кондратьева, М.В. Ковалева // Вестник педагогических инноваций. Новосибирск, 2024. – № 2 (74). – С. 5–12.
[11] Козлова Е.М. (2018). Сравнительный анализ БРС и ECTS. Педагогика, 12(4), 88–102.
[12] МФТИ (2021). Отчёт по цифровизации оценивания. — URL: mipt.ru/digital_report
[13] Smith, J. (2019). Grading Systems in Higher Education: A Global Review. Journal of Educational Studies, 8(4), 77–89.
[14] Johnson, L. (2020). Automated Assessment in STEM. MIT Press.
[15] University of Helsinki (2021). Peer Assessment in BRS.
[16] Brown, K. (2022). Stress and Grading Systems. Harvard Educational Review, 91(2), 210–225.
[17] MIT EECS (2022). Grading Policies for CS Courses. — URL: eecs.mit.edu/grading
[18] Stanford Engineering (2021). Mastery-Based Assessment.
[19] OECD (2020). Digital Tools for Education. — URL: oecd.org/education
[20] Кузнецов Д.И. (2022). Оптимизация БРС в технических вузах. Дисс. … канд. пед. наук. СПб.: СПбПУ.
[21] Garcia, M. (2021). Bologna Process and Grading. PhD Thesis. University of Berlin.
[22] Приказ Минобрнауки №124 (2020). О внедрении БРС.
[23] Росстат (2023). Данные по отчислениям в вузах. — URL: rosstat.gov.ru
[24] QS Rankings (2023). Global University Rankings. — URL: topuniversities.com
[25] IEEE EDUCON (2022). Proceedings: Digital Assessment in Engineering. — DOI: 10.1109/EDUCON.2022

[26] Всероссийская конференция по педагогике (2021). Сборник докладов. М.: МГУ.
[27] Moodle (2023). Официальная документация. — URL: docs.moodle.org
[28] GitLab (2022). Education Toolkit. — URL: about.gitlab.com/solutions/education
[29] ETH Zurich (2021). Grading System for Engineering. — URL: ethz.ch
[30] University of Tokyo (2020). BRS in STEM Fields.
[31] Lee, S. (2023). The Downsides of Point-Based Systems. Journal of Critical Education, 14(1), 33–47.
[32] Васильев П.О. (2022). Риски формализации в БРС. Высшее образование сегодня, 5, 18–25.
[33] UNESCO (2022). Global Education Monitoring Report. — URL: unesco.org/gem
[34] World Bank (2021). Digital Transformation in Education.
[35] Евграфов А.Н., Егорова О.В. Особенности преподавания дисциплины "История науки и техники". В сборнике: Будущее инженерного образования. Под редакцией А.А. Александрова, В.К. Балтяна. Москва, 2016. Сс. 162-170.
[36] Egorova O., Evgrafov A., Rayushkina V. Modern view on "history of science" teaching at technical universities. В сборнике: Mechanisms and Machine Science. 1. 2014. Сс. 137-144.
[37] Evgrafov A., Khisamov A., Egorova O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg State Polytechnical University. В сборнике: Mechanisms and Machine Science. 1. 2014. Сс. 239-247.
[38] Коловский М.З., Евграфов А.Н. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1 (1). Сс. 3-29.
[39] Алексеев П.В., Евграфов А.Н., Полищук М.Н. Информационные технологии. основы интернета. Лабораторный практикум / Санкт-Петербург, 2000.
[40] Андриенко П.А., Каразин В.И., Козликин Д.П., Терешин В.А., Хисамов А.В., Хлебосолов И.О. Применение нейронных сетей для решения задач теории механизмов и машин. Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. № 12. Сс. 175-188.

P.A. Andrienko, A.N. Evgrafov, P.V. Kovalev, D.P. Kozlikin

POINT-RATING SYSTEM IN EDUCATION: COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFECTIVENESS IN DIFFERENT UNIVERSITIES AND DISCIPLINES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of the point-rating system (PRS) in comparison with traditional and alternative methods of assessment. Based on the data of Russian and foreign universities (Moscow State University, National Research University Higher School of Economics, Moscow State Technical University, St. Petersburg State Technical University, MIT, Harvard, Stanford, etc.), the specifics of the BRS application in technical, humanities and natural sciences disciplines are revealed. The methods of systematic review, student questionnaires and analysis of academic performance for 2020-2023 were used. The results show that BRS improves academic performance by 12-18% in technical disciplines, but is less effective in creative subjects. Recommendations for adapting the system for different training directions are discussed.

Key words: point-rating system, evaluation methods, technical disciplines, humanities, academic performance.

REFERENCES

[1] Lomonosov Moscow State University (2023). Report on the effectiveness of the BRS at the Faculty of Physics. (in rus.)
[2] NIU VSE (2022). Survey of students in the humanities. - URL: hse.ru/brs_survey. (in rus.)
[3] Ivanov A.A. (2021). Stress factors in technical universities. Higher education in Russia, 30(3), 45-59. (in rus.)
[4] Ministry of Education and Science of the Russian Federation (2021). Methodical recommendations for the implementation of the BRS. - URL: minobrnauki.gov.ru/standards. (in rus.)
[5] SPbPU (2023). Analysis of academic performance at the FKN for 2020-2023. - URL: spbstu.ru/brs_report. (in rus.)
[6] Bauman Moscow State Technical University (2022). Realization of BRS at the Faculty of IS. - URL: bmstu.ru/iu_rating. (in rus.)
[7] Petrova S.K. (2020). Motivation of students of engineering specialties. Engineering Bulletin, 15(2), 112-130. (in rus.)
[8] Sidorov V.P. (2019). Score-rating system: theory and practice. Moscow: Izd-vo MSTU. (in rus.)
[9] Kondratyeva, S. Yu. V. Characteristics of the integral pedagogical system of career guidance work with students / S.Y. Kondratyeva, M.V. Kovaleva // Modern vectors of development of special and inclusive education. - Yaroslavl, 2024. - pp. 205-210. (in rus.)
[10] Kondratyeva S. Yu. V. Characteristics of the integral pedagogical system of career guidance work with students of different levels of education / S.Y.

Kondratyeva, M.V. Kovaleva // Vestnik of pedagogical innovations. Novosibirsk, 2024. - № 2 (74). - pp. 5-12. (in rus.)
[11] Kozlova E.M. (2018). Comparative analysis of BRS and ECTS. Pedagogika, 12(4), 88-102. (in rus.)
[12] MFTI (2021). Report on the digitalization of assessment. - URL: mipt.ru/digital_report. (in rus.)
[13] Smith, J. (2019). Grading Systems in Higher Education: A Global Review. Journal of Educational Studies, 8(4), 77–89.
[14] Johnson, L. (2020). Automated Assessment in STEM. MIT Press.
[15] University of Helsinki (2021). Peer Assessment in BRS.
[16] Brown, K. (2022). Stress and Grading Systems. Harvard Educational Review, 91(2), 210–225.
[17] MIT EECS (2022). Grading Policies for CS Courses. — URL: eecs.mit.edu/grading
[18] Stanford Engineering (2021). Mastery-Based Assessment.
[19] OECD (2020). Digital Tools for Education. — URL: oecd.org/education
[20] Kuznetsov D.I. (2022). Optimization of BRS in technical universities. Diss. ... kand. ped. nauk. SPb.: SPbPU. (in rus.)
[21] Garcia, M. (2021). Bologna Process and Grading. PhD Thesis. University of Berlin.
[22] Order of the Ministry of Education and Science No. 124 (2020). On the implementation of the BRS. (in rus.)
[23] Rosstat (2023). Data on dropouts in higher education institutions. - URL: rosstat.gov.ru. (in rus.)
[24] QS Rankings (2023). Global University Rankings. — URL: topuniversities.com
[25] IEEE EDUCON (2022). Proceedings: Digital Assessment in Engineering. — DOI: 10.1109/EDUCON.2022
[26] All-Russian Conference on Pedagogy (2021). Collection of reports. Moscow: Moscow State University. (in rus.)
[27] Moodle (2023). Official documentation. - URL: docs.moodle.org (in rus.)
[28] GitLab (2022). Education Toolkit. — URL: about.gitlab.com/solutions/education
[29] ETH Zurich (2021). Grading System for Engineering. — URL: ethz.ch
[30] University of Tokyo (2020). BRS in STEM Fields.
[31] Lee, S. (2023). The Downsides of Point-Based Systems. Journal of Critical Education, 14(1), 33–47.
[32] Vasiliev, P. O. (2022). Risks of formalization in BRS. Higher Education Today, 5, 18-25. (in rus.)
[33] UNESCO (2022). Global Education Monitoring Report. — URL: unesco.org/gem
[34] World Bank (2021). Digital Transformation in Education.

[35] Evgrafov A.N., Egorova O.V. Features of teaching the discipline “History of Science and Technology”. In Collection: The Future of Engineering Education. Edited by A.A. Aleksandrov, V.K. Baltyan. Moscow, 2016. Pp. 162-170. (in rus.)
[36] Egorova O., Evgrafov A., Rayushkina V. Modern view on "history of science" teaching at technical universities. In: Mechanisms and Machine Science. 1. 2014. Pp. 137-144.
[37] Evgrafov A., Khisamov A., Egorova O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg State Polytechnical University. In: Mechanisms and Machine Science. 1. 2014. Pp. 239-247.
[38] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N. About some directions of modernization of TMM course. Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. № 1 (1). Pp. 3-29. (in rus.)
[39] Alekseev P.V., Evgrafov A.N., Polishchuk M.N. Information technologies. Basics of the Internet. Laboratory workshop / St. Petersburg, 2000. (in rus.)
[40] Andrienko P.A., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Tereshin V.A., Khisamov A.V., Khlebosolov I.O. Application of neural networks for solving problems of the theory of mechanisms and machines. Modern Engineering. Science and Education. 2023. № 12. Pp. 175-188. (in rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-97

Н.А. Солодилова[1], Т. В. Маркова[2], А.Ю. Скрябнев[3], А.М.Блинковский[4]

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР КАК КЛЮЧЕВАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ СОВРЕМЕННОГО ИНЖЕНЕРА-МАШИНОСТРОИТЕЛЯ



[1]Наталья Алексеевна Солодилова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: solodilova_na@spbstu.ru



[2]Татьяна Владимировна Маркова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-75-14, E-mail: markova_tv@spbstu.ru



[3]Артём Юрьевич Скрябнев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: scarts@mail.ru



[4]Анатолий Михайлович Блинковский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-95-64, E-mail: blinkovskij_am@spbstu.ru

Аннотация

В работе исследуется роль параметрического моделирования в машиностроении. Анализ современных трендов и требований рынка подтверждает растущую значимость параметризации. Рассмотрено ключевое значение этого подхода в проектировании, а также вопросы подготовки специалистов. Отмечены существующие проблемы внедрения и предложены пути их решения через модернизацию образовательного процесса.

Ключевые слова: параметрическое моделирование, инженерное проектирование, профессиональные компетенции, САПР, инженерная геометрия и компьютерная графика, машиностроение, инженерное образование.

Введение

Современная машиностроительная отрасль переживает период глубокой технологической трансформации, связанной с процессами цифровизации производства. В условиях глобальной конкуренции и сокращения жизненных циклов изделий традиционные подходы к инженерному проектированию претерпевают существенные изменения, требуя от специалистов освоения новых инструментов и методов работы. Одним из наиболее значимых аспектов этой трансформации стало повсеместное внедрение параметрического моделирования в системах автоматизированного проектирования (САПР), которое из вспомогательного инструмента превратилось в ключевую компетенцию современного инженера-машиностроителя.

Преимущества и эффективность параметрического подхода определяются гибкостью разрабатываемых моделей. В отличие от традиционных, параметрические модели представляют собой систему взаимосвязанных элементов, и благодаря математическим зависимостям между ними автоматически обновляются при изменении конструкции, не требуя ручной корректировки. Это ускоряет проектирование, упрощает тестирование вариантов и оптимизацию конструкций под производственные задачи.

Особое значение параметрическое моделирование приобретает в контексте подготовки инженерных кадров. Современные образовательные стандарты в области машиностроительного образования все больше смещаются в сторону формирования у студентов не только теоретических знаний, но и практических навыков работы с передовыми инструментами цифрового проектирования. В этой связи анализ роли и места параметрического моделирования в учебном процессе представляет собой важную и актуальную задачу.

Методы исследования

Для всестороннего изучения роли параметрического моделирования в современном машиностроении было проведено комплексное исследование, включающее несколько взаимодополняющих методических подходов. Основу методологической базы составил системный анализ, позволивший рассмотреть параметрическое моделирование как целостную систему взаимосвязанных элементов.

Для оценки востребованности навыков параметрического моделирования на рынке труда был проведен контент-анализ более 200 вакансий для инженеров-конструкторов, опубликованных за последние два года [1, 2] предприятиями Северо-Западного региона России. Анализировалось не только формальное наличие требований к владению инструментами параметризации, но и степень детализации этих требований.

Научная составляющая исследования базировалась на анализе современных публикаций в рецензируемых научных журналах и материалах международных конференций по тематике параметрического моделирования и смежным направлениям [3–9]. Особое внимание уделялось работам, опубликованным за последние пять лет, что позволило выявить актуальные тенденции в развитии этой технологии [3, 4, 10–13].

Дополнительным источником данных стали интервью с экспертами — специалистами машиностроительных предприятий и преподавателями технических вузов. Кроме того, проведен анализ учебных программ дисциплин, изучаемых студентами различных направлений подготовки Института металлургии, машиностроения и транспорта (ИММиТ) на предмет включения в них технологий параметрического моделирования.

Обсуждение результатов

Результаты проведенного исследования позволяют сделать ряд выводов о современном состоянии и перспективах развития параметрического моделирования в машиностроении и образовании. Прежде всего, следует отметить, что параметрический подход к проектированию из узкоспециализированного инструмента постепенно превращается в базовую технологию современного машиностроения. Это подтверждается как анализом требований работодателей, так и тенденциями развития САПР-систем, в которых параметрические возможности занимают все более важное место.

Анализ вакансий показал, что 87% объявлений для инженеров-конструкторов в Северо-Западном регионе содержат явные требования к владению параметрическим моделированием. При этом в 15% случаев эти требования конкретизированы и включают указание на необходимость умения создавать параметрические зависимости, использовать уравнения и таблицы параметров. Особенно показательно, что в вакансиях с более высокой заработной платой (от 120 тыс. руб.) требования к навыкам параметрического моделирования формулируются более детально.

Практические эксперименты по сравнению эффективности параметрического и традиционного подходов дают однозначные результаты. В среднем, использование грамотно построенных параметрических моделей позволяет сократить время на внесение типовых изменений в проект на 65–75%. При этом качество проектных решений

(оцениваемое по количеству выявляемых на последующих этапах ошибок) повышается на 40–50%. Особенно значительный выигрыш параметрический подход демонстрирует при работе над семействами однотипных изделий и при выполнении итерационных расчетов [3, 14–16].

Однако, как показывают экспертные оценки, внедрение новых технологий в промышленности сталкивается с рядом проблем, связанных, в основном, со сложностью интеграции в существующие системы управления данными, сопротивлением опытных конструкторов, привыкших к традиционным методам, и нехваткой специалистов, действительно глубоко понимающих принципы параметризации, а не просто умеющих работать с конкретными САПР.

Одну из причин трудностей выявил анализ действующих образовательных программ бакалавров-машиностроителей: параметрическому моделированию в учебном процессе уделяется лишь фрагментарное внимание. Знакомство с САПР начинается во втором семестре в рамках курса инженерной графики, однако изучаются при этом, в основном, инструменты плоского черчения. Работа с трёхмерными моделями и параметризацией рассматривается в отдельных группах. Студенты выполняют комплекс упражнений, тематически согласованных с теоретической частью курса, что помогает ее освоению и позволяет поэтапно изучать возможности системы проектирования [17]. В конце первого семестра, в рамках расчетно-графической работы по начертательной геометрии, студенты разрабатывают свою первую параметрическую модель (рис. 1), налагая связи и устанавливая зависимости между геометрическими параметрами объекта, во втором семестре — на основе 3D-моделей формируют комплект конструкторских документов (КД) на сборочную единицу, приближенную к реальному техническому объекту. На занятиях акцентируется внимание на том, что эскизы для формообразующих операций должны быть определены, рассматриваются возможности управления степенями свободы точек. Ставится задача исследовательского характера: в процессе параметризации эскиза выявить минимальное, но достаточное для изготовления количество размеров, которые следует нанести на чертеже детали (рис. 2).

Эффективность параметризации показал опыт ее применения при решении задач по начертательной геометрии, в частности задач интернет-олимпиады. Требуемая при этом точность ответов недостижима без использования компьютерных средств построений, и наиболее удобным инструментом, позволяющим не только задать условие и найти решение, но и исследовать задачу на предмет полноты условия и возможности множества решений, стала параметризация.

Заметим, что студенты, владеющие инструментами параметризации, с успехом используют ее при решении задач и выполнении расчетно-графических и курсовых работ по целому ряду дисциплин, причем

используют не только при разработке 3D-моделей. Большинство заданий курсов «Детали машин», «Теория механизмов и машин», «Метрология» и других подразумевает работу с плоскими изображениями, которые могут быть построены точнее, проще и быстрее с помощью параметризации. Пример модели пространственного пятизвенного кривошипно-коромыслового механизма, позволяющей, благодаря наложенным зависимостям, выполнять исследования кинематики, рассмотрен в статье [18]. Опытные студенты понимают преимущества такого подхода, и на вопрос «нужна ли параметризация и где она нужна?» уверенно отвечают: «Параметризация нужна «всегда, когда надо что-то начертить», «это самый быстрый и правильный способ, если с ним хорошо освоиться».

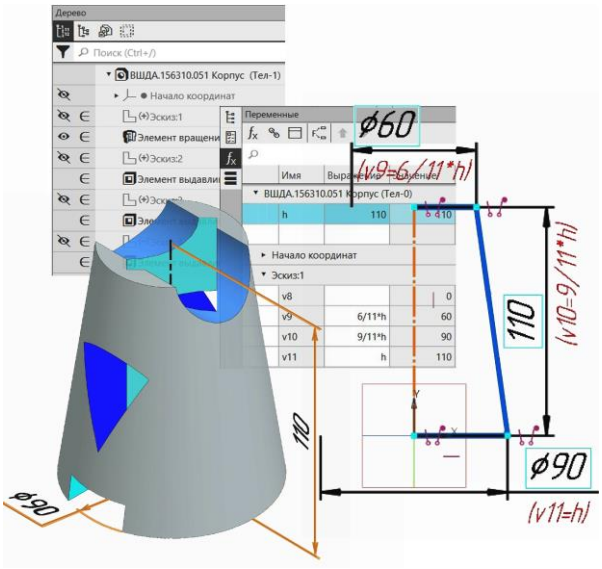


Рис. 1. Первое упражнение с использованием параметризации

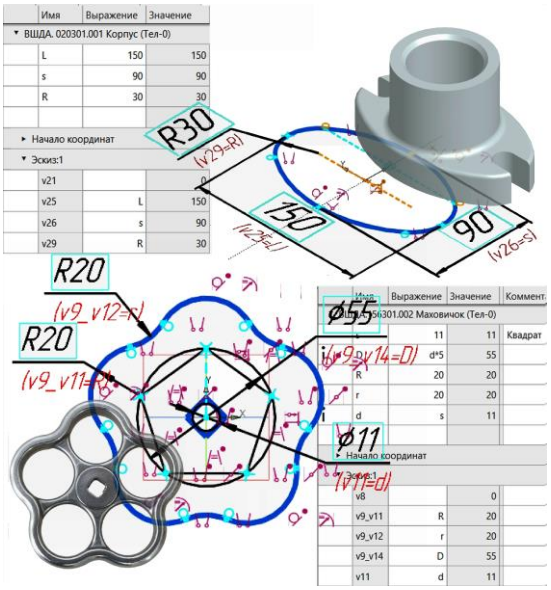


Рис. 2. Параметризация и размеры на чертеже. Исследование

Следует отметить, что пространственные параметрические модели позволяют проводить не только геометрические, но и силовые расчеты, тестирование прочности, тепловых или аэродинамических характеристик объектов при изменении состояния, генерировать модели с заданным набором параметров и механизмы, где параметры влияют на взаимодействие компонентов и т. д., но знакомство с этими инструментами, как правило, происходит гораздо позже и в соответствии с выбранной специализацией.

Таким образом, параметрическое моделирование — одна из наиболее востребованных общеобразовательных и профессиональных компетенций. Однако, на текущий момент единственной дисциплиной для большинства студентов машиностроительного профиля, где системно изучаются методы параметризации, остается курс "САПР в машиностроении" [19, 20].

В структуре лекционного курса технологии параметрического моделирования занимают важное место, формируя методологическую основу для современных подходов к компьютерному проектированию. Теоретический блок, посвященный параметризации, предусматривает детальное рассмотрение различных видов параметрических зависимостей:

– табличную параметризацию, основанную на использовании таблиц параметров и уравнений, обеспечивающую четкую структуризацию данных проектирования. Рассматриваются методики создания и управления параметрическими таблицами, включая особенности их интеграции в проектные процессы;

– вариационную параметризацию, как инструмент создания адаптивных моделей, способных автоматически изменять свою структуру в зависимости от заданных условий. Разбираются принципы построения вариационных зависимостей и их влияние на гибкость проектных решений;

– иерархическую параметризацию, позволяющую эффективно управлять сложными многокомпонентными системами. Подробно рассматриваются методы организации иерархических структур параметров, обеспечивающие логичную взаимосвязь между отдельными элементами проекта;

– геометрическую параметризацию — с точки зрения создания устойчивых геометрических зависимостей, формирующих основу для построения корректных и легко модифицируемых моделей.

Анализ параметрического и прямого моделирования (direct modeling) на примерах машиностроения показывает ключевые преимущества параметризации: автоматическое обновление моделей, удобство итераций и оптимизации, эффективность для однотипных изделий. Однако отмечаются и её недостатки: высокие требования к навыкам проектировщиков, необходимость продумывать структуру модели заранее и сложности при работе с заимствованной геометрией.

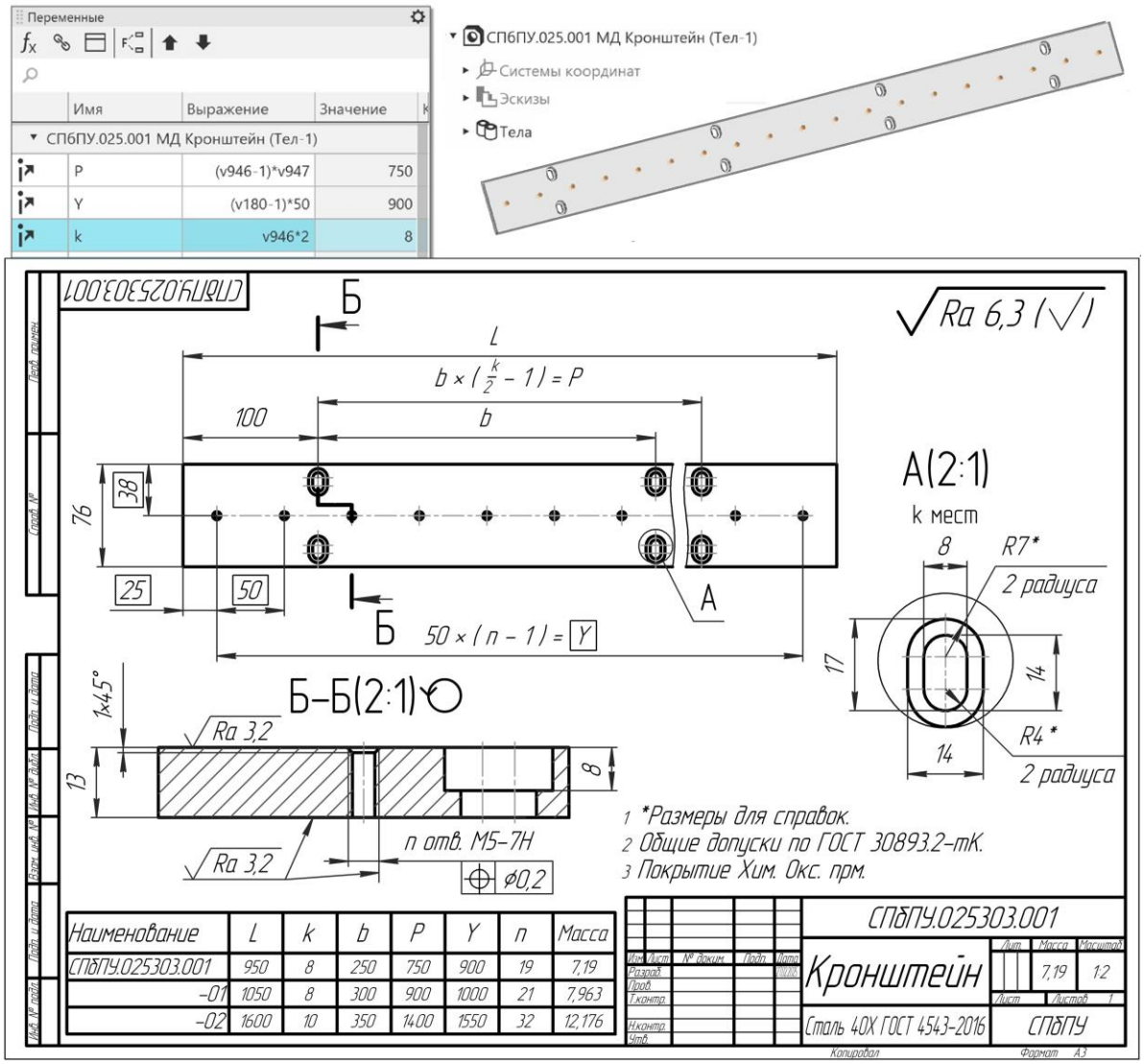
Теоретические положения курса иллюстрируются примерами из практики ведущих машиностроительных предприятий, демонстрирующими эффективность параметрического проектирования типовых узлов. Особое внимание уделяется анализу реальных кейсов, где использование параметризации позволило существенно сократить сроки проектирования и повысить качество конструкторских решений.

В практической части курса значительное время отводится на освоение методики наложения связей и ограничений, где последовательно рассматриваются особенности работы с параметрическими зависимостями на разных уровнях проектирования.

В контексте работы с фрагментами и эскизами детально разбираются типы геометрических и размерных зависимостей, их влияние на поведение модели при изменениях. При изучении моделирования деталей акцент

делается на установлении межэлементных связей, обеспечивающих целостность конструкции при модификациях (рис. 3).

В разделе, посвященном сборкам, подробно анализируются методы создания параметрических взаимозависимостей между компонентами, включая особенности управления позиционированием и сопряжением деталей. Для студентов, демонстрирующих высокий уровень освоения материала, предусмотрена возможность выполнения заданий повышенной сложности, позволяющих глубже изучить принципы параметрического моделирования (рис. 4). Подобные задания не только способствуют формированию у студентов продвинутых навыков работы с инструментами САПР, но и развивают системное инженерное мышление, необходимое для решения сложных производственных задач.



Наименование	L	k	b	P	Y	n	Масса
СПбПУ.025303.001	950	8	250	750	900	19	7,19
-01	1050	8	300	900	1000	21	7,963
-02	1600	10	350	1400	1550	32	12,176

Рис. 3. Модель детали с параметрическими связями и её ассоциативный чертёж

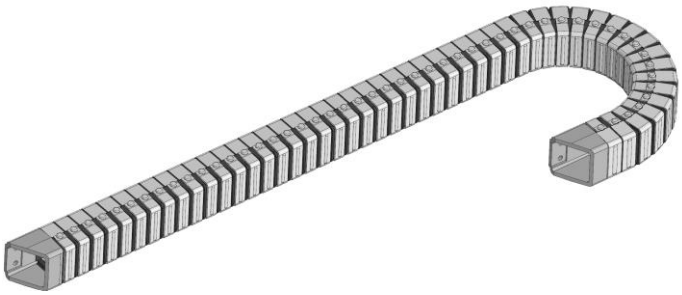


Рис. 4. Параметрическая модель гибкого кабель-канала
(изгиб, количество звеньев и их профиль можно изменять)

Выводы

Проведенное исследование подчеркивает значимость интеграции параметрического моделирования в профессиональную деятельность инженеров-машиностроителей и указывает на необходимость пересмотра образовательных программ в этой сфере. Ключевой задачей обучения должно стать не просто освоение функционала конкретных САПР-программ, а формирование у студентов понимания логики и методологии параметрического подхода как такового. Это требует разработки новых методик обучения, основанных на решении комплексных проектных задач и понимании математических основ параметризации. Для эффективного освоения параметрического моделирования предлагается внедрить сквозной учебный проект на 2–3 курсах с постепенным усложнением — от отдельных деталей до узлов средней сложности. Хорошим дополнением станут лабораторные работы, посвященные сравнению эффективности параметрического и традиционного подходов по объективным критериям: времени выполнения, количеству ошибок и соответствию техническим требованиям. Такая система позволит студентам на практике оценить преимущества параметризации при решении реальных инженерных задач.

В заключение следует отметить, что параметрическое моделирование принципиально меняет подход к проектированию, и будущее машиностроения принадлежит тем предприятиям и специалистам, которые смогут в полной мере освоить потенциал этих технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] HeadHunter: работа в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс]. – URL: https://spb.hh.ru/ (дата обращения: 13.04.2025).
[2] SuperJob: работа и вакансии в России [Электронный ресурс]. – URL: https://www.superjob.ru/ (дата обращения: 13.04.2025).

[3] Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // Automation in Construction. – 2008. – Vol. 17, № 4. – P. 439–449.
[4] Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 109. – P. 383–388.
[5] Krol O. Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes / O. Krol, V. Sokolov // Advances in Manufacturing II : Volume 4 - Mechanical Engineering, Poznan, Poland, 19–22 мая 2019 года. – Cham: Springer, 2019. – P. 122–130.
[6] Sunarya W., Seputra J.A.P., Zakariya A.F. Parametric Modeling Practice for the First-Year Architecture Students Learning // ARTEKS: Jurnal Teknik Arsitektur. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 293–304.
[7] Абрамян К.В., Помпеев К.П., Тимофеева О.С., Яблочников Е.И. Применение систем моделирования при формировании инженерных компетенций в области цифрового производства // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции / под ред. А.Н. Евграфова, А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 52.
[8] Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I., Volosatova E.E. Methods of parts digital models design for problems resolving in technological preparation of production // In: Evgrafov A.N. (ed.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME). – Cham: Springer, 2022. – P. 129–139.
[9] Ко А. Т. Проектирование единого информационного пространства технологической подготовки производства // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2019. – № 8. – С. 565–576.
[10] Куликов Д.Д., Яблочников Е.И., Абышев О.А., Чукичев А.В. Проектирование технологических процессов в информационно-управляющей среде // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 487–508.
[11] Zou Q., Feng H.-Y., Gao S. Variational Direct Modeling: A Framework Towards Integration of Parametric Modeling and Direct Modeling in CAD // Computer-Aided Design. – 2023. – Vol. 157. – Art. 103465.
[12] Zhu Q., He X., Liu Y. [et al.] A Spline Based Parametric Modeling Method for Ladder like Facilities // Frontiers in Computing and Intelligent Systems. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 46–52.
[13] Yakovenko A.L., Shatrov M.G., Alekseev I.V., Bogdanov S.N., Predein A.A. The Use of 3D Parametric Modeling for Internal Combustion Engine Design Automation // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – Vienna, Austria, 2020. – P. 1–5.

[14] Reddy E.J., Rangadu V.P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57, No. 4. – P. 3139–3149.
[15] Wang P., Rui X., Gu J., Huang K., Zhou L., Jiang M. Fast parametric modeling of visualized simulation and design for tracked vehicle system // Advances in Engineering Software. – 2025. – Vol. 201. – P. 103852.
[16] Aranburu A., Cotillas J., Justel D., Contero M., Camba J.D. How Does the Modeling Strategy Influence Design Optimization and the Automatic Generation of Parametric Geometry Variations? // Computer-Aided Design. – 2022. – Vol. 151. – Art. 103364.
[17] Markova T., Shirokova S., Rostova O., Misbakhova C. Possibilities of Using Computer-Aided Design Systems to Improve the Quality of Technical Specialists Training // In: Devezas T.C., Berawi M.A., Barykin S.E., Kudryavtseva T. (eds) Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham: Springer, 2024. – Vol. 951.– P. 93–105.
[18] Кокорин, М. С. Проектные задачи в курсе начертательной геометрии / М. С. Кокорин, Т. В. Маркова, Т. А. Никитина // Геометрия и графика. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 32–45.
[19] Солодилова, Н. А. Автоматизация машиностроительного проектирования. Разработка конструкторской документации в САПР КОМПАС-3D : Учебное пособие / Н. А. Солодилова, С. В. Мещеряков, Т. В. Маркова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 89 с.
[20] Мещеряков, С. В. Автоматизация машиностроительного проектирования в САПР КОМПАС-3D. Том 2 / С. В. Мещеряков, Н. А. Солодилова.. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – 107 с.

N.A. Solodilova, T.V. Markova, A.Yu. Skryabnev, A.M. Blinkovsky

PARAMETRIC CAD MODELING AS A KEY COMPETENCY OF A MODERN MECHANICAL ENGINEER

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This research investigates parametric modeling's role in mechanical engineering, highlighting its growing importance through current market trends. The study addresses its design applications, specialist-training challenges, and proposes educational improvements to overcome implementation barriers.

Key words: parametric modeling, engineering design, professional skills, CAD (Computer-Aided Design), engineering geometry & computer graphics, mechanical engineering, engineering education.

REFERENCES

[1] HeadHunter: Jobs in St. Petersburg [Online]. Available: https://spb.hh.ru/ (Accessed: Apr. 13, 2025).
[2] SuperJob: Jobs and Vacancies in Russia [Online]. Available: https://www.superjob.ru/ (Accessed: Apr. 13, 2025).
[3] Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // Automation in Construction. – 2008. – Vol. 17, № 4. – P. 439–449.
[4] Aranburu A., Justel D., Contero M., Camba J.D. Geometric Variability in Parametric 3D Models: Implications for Engineering Design // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 109. – P. 383–388.
[5] Krol O. Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes / O. Krol, V. Sokolov // Advances in Manufacturing II : Volume 4 - Mechanical Engineering, Poznan, Poland, 19–22 мая 2019 года. – Cham: Springer, 2019. – P. 122–130.
[6] Sunarya W., Seputra J.A.P., Zakariya A.F. Parametric Modeling Practice for the First-Year Architecture Students Learning // ARTEKS: Jurnal Teknik Arsitektur. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 293–304.
[7] Abramyan K.V., Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. Application of modeling systems in developing engineering competencies for digital manufacturing // Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference / ed. by A.N. Evgrafov, A.A. Popovich. - St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic Univ. Publ., 2019. - P. 52. (in Russian)
[8] Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I., Volosatova E.E. Methods of parts digital models design for problems resolving in technological preparation of production // In: Evgrafov A.N. (ed.) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME). – Cham: Springer, 2022. – P. 129–139.
[9] Ko A.T. Designing a single information space of technological preparation of production. // Modern Mechanical Engineering: Science and Education. – 2019. – № 8. – P. 565–576. (in Russian)
[10] Kulikov D.D., Yablochnikov E.I., Abyshe, O.A., Chukichev A.V. Design of technological processes in the information and control system // Modern Mechanical Engineering: Science and Education. – 2021. – № 10. – P. 487–508. (in Russian)

[11] Zou Q., Feng H.-Y., Gao S. Variational Direct Modeling: A Framework Towards Integration of Parametric Modeling and Direct Modeling in CAD // Computer-Aided Design. – 2023. – Vol. 157. – Art. 103465.
[12] Zhu Q., He X., Liu Y. [et al.] A Spline Based Parametric Modeling Method for Ladder like Facilities // Frontiers in Computing and Intelligent Systems. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 46–52.
[13] Yakovenko A.L., Shatrov M.G., Alekseev I.V., Bogdanov S.N., Predein A.A. The Use of 3D Parametric Modeling for Internal Combustion Engine Design Automation // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). – Vienna, Austria, 2020. – P. 1–5.
[14] Reddy E.J., Rangadu V.P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57, No. 4. – P. 3139–3149.
[15] Wang P., Rui X., Gu J., Huang K., Zhou L., Jiang M. Fast parametric modeling of visualized simulation and design for tracked vehicle system // Advances in Engineering Software. – 2025. – Vol. 201. – P. 103852.
[16] Aranburu A., Cotillas J., Justel D., Contero M., Camba J.D. How Does the Modeling Strategy Influence Design Optimization and the Automatic Generation of Parametric Geometry Variations? // Computer-Aided Design. – 2022. – Vol. 151. – Art. 103364.
[17] Markova T., Shirokova S., Rostova O., Misbakhova C. Possibilities of Using Computer-Aided Design Systems to Improve the Quality of Technical Specialists Training // In: Devezas T.C., Berawi M.A., Barykin S.E., Kudryavtseva T. (eds) Understanding the Digital Transformation of Socio-Economic-Technological Systems. Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham: Springer, 2024. – Vol. 951.– P. 93–105.
[18] Kokorin M.S., Markova T.V., Nikitina T.A. Project tasks in descriptive geometry course // Geometry and Graphics. – 2024. – Vol. 12, No. 3. – P. 32–45. (in Russian)
[19] Solodilova N.A., Meshcheryakov S.V., Markova T.V. Automation of mechanical engineering design. Development of design documentation in CAD KOMPAS-3D: Textbook. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024. – 89 p. (in Russian)
[20] Meshcheryakov S.V., Solodilova N.A. Automation of mechanical engineering design in CAD KOMPAS-3D. Volume 2. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022. – 107 p. (in Russian)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.147
doi:10.18720/SPBPU/2/id-98

М.В. Лагунова[1], Л.А. Иванова[2], Н.В. Ежова[3]

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКЕ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ



[1]Лагунова Марина Витальевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (931)256-2995, E-mail: lagunova_mv@spbstu.ru



[2]Иванова Любовь Алексеевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)953-5039, E-mail: ivanova_la@spbstu.ru



[3]Ежова Наталья Владимировна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)709-6699, E-mail: ezhova_nv@spbstu.ru

Аннотация

В работе освещаются различные подходы к индивидуальному обучению студентов, апробированные на различных направлениях подготовки студентов СПбПУ. Оцениваются преимущества и недостатки каждого метода обучения.

Ключевые слова: балльная система оценки (БСО), электронное обучение, дистанционное обучение, индивидуальный подход к обучению, distance learning, тест, Moodle.

Вступление

В настоящее время, в связи с постепенным отходом от болонской системы, перед преподавателями всех дисциплин, и таких

фундаментальных, как математика и физика, встает вопрос как о новых, так и хорошо забытых старых методах обучения. При этом напрямую возникает вопрос о том, как организовать процесс обучения в больших потоках студентов так, чтобы каждый студент нашел свой способ освоения материала. Поэтому так важен индивидуальный подход к обучению студентов [1]. Мы предлагаем студентам выбирать собственную траекторию получения знаний, при этом, безусловно, устанавливая уровень, которого надо достичь, чтобы получить положительную оценку, согласно принятым методическим советом Санкт-Петербургском Политехническом Университете Петра Великого (СПбПУ) нормам В соответствии с опубликованным в марте 2024 года приказе № 639 СПбПУ, вводится балльная система оценки знаний (БСО) [2]. Такая система позволяет в течение семестра отслеживать работу каждого студента большого (иногда порядка 250 человек) потока студентов. В этом случае аттестация ставится не только за ответ на экзамене, но и, учитывается работа студента в течение семестра, а также выполнение дополнительных, более сложных заданий и участие в конференциях и олимпиадах.

Методы

Для обеспечения индивидуального подхода к обучению высшей математике в СПбПУ в 2024-2025 году были применены следующие методы.

- Проведён эксперимент с разделением студентов на потоки в соответствии с баллами, полученными ими на ЕГЭ.
- Практиковались различные способы общения со студентами.
- Создавались и обновлялись методические материалы разного плана для освоения материала, учитывающие требования выпускающих кафедр.
- По каждой пройденной теме предлагались дополнительные, более сложные задания, не обязательные для получения положительной оценки за курс.
- В первом семестре были организованы факультативы двух уровней: для отстающих студентов и для тех, кто хочет изучить дополнительный материал.
- Отдельно оценивается участие в конференциях и олимпиадах.
  За успешное выступление на математических олимпиадах также добавляются баллы в личный рейтинг студента.

Все перечисленные методы (кроме первого, о котором речь пойдет дальше) и критерии оценивания излагаются на первой лекции, а также дублируются письменно на навигационном сайте системы дистанционного обучения (СДО), который создается для каждого преподавателя СПбПУ (к

сожалению, не все преподаватели пользуются этими курсами). Кроме того, создается таблица Excel, называемая шаблоном, в которой четко прописаны баллы, которые можно получить за то или иное задание. Вводя полученные баллы за каждое выполненное задание, студент может автоматически оценить свой текущий рейтинг. Подробно про систему оценивания, обработку и хранение информации о работах студентов мы писали в статье [2].

Обсуждения

- Начнем с обсуждения того, какие плюсы и минусы в разделении потоков по результатам ЕГЭ. Насколько нам известно, аналогичный метод был применен для изучения курса физики студентами ИММиТ, а также в группах по английскому языку в ИКНК. В 2024-2025 учебном году, по распоряжению учебного отдела СПбПУ аналогичный эксперимент был проведен на ИКНК для изучения высшей математики. Суть его в том, что всех студентов, поступивших на разные направления подготовки, а всего было набрано примерно 1000 первокурсников, разделили на 6 потоков к разным преподавателям высшей математики. В результате группы были кардинально перемешаны, и пока студенты осознали, к какому преподавателю им надо приходить, прошло немало времени. При этом каждый студент числился в двух группах – по специальности и по математике. Чтобы удержаться в рамках расписания, приходится все лекции и практики ставить в одно время. То есть в случае болезни преподавателя заменить его будет крайне сложно. И даже страшно подумать, что придется предпринять, если вдруг в какой-то группе будет объявлен карантин.

С одной стороны, конечно, если студенты имеют приблизительно одинаковый уровень подготовки, то это хорошо и правильно. С ними проще работать, изучать предмет, возможно, чуть больше и глубже. Но проблемы, связанные с составлением расписания, заполнением ведомостей, посещаемостью студентов разных направлений подготовки, решаются с большим трудом. В результате в расписании возникают окна, некоторые студенты вынуждены ждать по 2 – 4 часа следующего занятия.

При таком подходе важно учитывать и психологические аспекты. В каждой группе должны быть ведущие студенты, так называемые «звездочки», на которых хотелось бы равняться остальным. Сложно представить, что может быть в группе, в которой все студенты «отстающие». На кого им равняться?

Нам достался второй поток из примерно 200 студентов с баллами по ЕГЭ в диапазоне 88 – 94. Первый поток состоит из студентов, набравших 95 – 100 баллов, их в ИКНК насчитывается 100. Так что возникает еще одна проблема – неодинаковые по численности потоки. В последнем – пятом –

потоке уже 270 студентов. Причем, все иностранные студенты, к которым, по-видимому, стоит проявлять больше внимания, оказались именно там. В шестом потоке был проведен эксперимент по гибридному способу обучения, где лекции и часть практик проводились дистанционно.

В прошлом году мы провели анализ уровня знаний поступивших студентов на основе входного тестирования, которое было проведено в самом начале первого семестра [3]. Было проверено также, насколько полученные результаты коррелировали с баллами, полученными на ЕГЭ. Честно говоря, прямой зависимости не обнаружилось. А поскольку мы сами являлись и являемся экспертами по ЕГЭ, то есть основания предполагать, что результаты ЕГЭ могут сильно зависеть от года выпуска и от региона. Было время, когда нас назначали экспертами федерального уровня, и мы перепроверяли работы других регионов. Поэтому было бы логичнее разделить студентов по результатам именно входного тестирования, но сама процедура переоценки баллов и последующего разделения групп была бы просто невозможна за короткий промежуток времени.

Насколько нам известно, в следующем году этот эксперимент продолжится только для второкурсников, то есть для тех студентов, для которых он и был организован, поскольку подключать к нему еще 1000 вновь поступивших студентов абсолютно нецелесообразно. Возможно, выделят в отдельный поток иностранных студентов. В этом случае, учитывая часто их плохое знание русского языка, очевидно, нужны будут специальные адаптированные методические материалы.

- Несмотря на единую рабочую программу дисциплины (РПД) Высшей математики внутри полигруппы, необходимо понимать, что каждый преподаватель имеет свое виденье реализации программы и действует в своем ключе. Реализуя в течение более 10 лет [4 - 8] БСО с использованием онлайн курса, мы убедились, что такой подход дает хорошие результаты. Мы получаем положительные отклики как от самих учащихся, так и от преподавателей специальных дисциплин, которым необходима математическая грамотность студентов при их дальнейшем обучении.
- При реализации такого подхода требуется постоянно находиться на связи со студентами. Для этого мы используем всевозможные доступные мессенджеры. В связи с проводимым экспериментом, круг общения пришлось существенно расширить. Если до эксперимента достаточно было общаться только со старостами академических групп, то на данный момент времени, например, в чате Vkontakte общается почти весь поток и все преподаватели, ведущие лекции и практики. На вопросы приходится отвечать и в других мессенджерах, поскольку у студентов возникают вопросы в режиме 24/7. Минусы данного подхода как раз в том, что приходится тратить на ответы довольно много личного времени и при этом стараться все же соблюдать дистанцию.

- Методические материалы, доступные студенту, также должны быть разнообразны: кому-то приятно листать материальную книгу, кто-то предпочитает электронные версии. Студенты довольно неплохо посещают аудиторные лекции и практики, а в случае пропуска (надеемся, по уважительной причине) им доступны видеолекции, презентации лекций, а также интерактивные практические занятия в формате Lecture на сайте СДО и тесты для самопроверки. При изучении каждой новой темы на сайте открываются все вышеупомянутые практические занятия, а также контрольные домашние тесты. Учащийся может при желании работать в своем темпе, иногда опережая изучение материала на аудиторных занятиях.
- Ежегодно мы стараемся дополнять и корректировать базу домашних заданий, тестов, дополнительных заданий. В создании новых материалов нам очень помогают сами студенты, выискивая неточности в формулировках или в ответах к заданиям. К сожалению, от ошибок и опечаток никто не застрахован. Иногда на этой почве возникают интересные дискуссии. Студент думает, что он нашёл неточность, а на самом деле ее нет или наоборот. Отстоять свою позицию бывает интересно как с одной, так и с другой стороны.
- Дополнительные задания по каждой пройденной теме составляются для студентов, рассчитывающих получить высокие баллы. Для студентов, которым достаточно просто как-нибудь сдать сессию, они не являются обязательными. Но стоит отметить, что больше 2/3 студентов все же берутся за их выполнение. Правда, не у всех получается, но сам факт участия уже приятен. Дополнительные задания также усовершенствуются и обновляются, но общее их количество остается неизменным – сколько тем, столько и заданий. Во втором семестре, например, обновлено задание по приведению уравнения кривой второго порядка к каноническому виду с помощью поворота и параллельного переноса координатных осей. Новые задания были сгенерированы с помощью искусственного интеллекта (ИИ) (к счастью, обратную задачу ИИ пока решать не научился). Обновить пришлось по той причине, что предыдущее задание давалось несколько лет подряд и, скорее всего, готовые решения уже общедоступны.
- По результатам входного тестирования, которое проводится для всех первокурсников, студентам инженерной полигруппы в качестве эксперимента были предложены на выбор факультативы двух уровней: для отстающих студентов и для тех, кто хочет изучить дополнительный материал. Как показал опыт, для слабых студентов актуальнее проводить занятия по текущему материалу. Надо отметить, что весьма востребованным оказался факультатив с изучением дополнительного материала. Как правило студенты, записавшиеся на этот факультатив, имеют хорошую школьную подготовку и проявляют интерес к изучению математики, но не хотят или не могут участвовать в олимпиадах. Возможно,

проведение факультативов по такой схеме, имеет смысл продлить и на второй семестр, но решение этого вопроса связано как с дополнительной нагрузкой для преподавателей, так и для студентов.

- Участие в олимпиадах также важно при индивидуальном подходе в обучении. В этом учебном году наш университет был зарегистрирован как одна из площадок проведения Всероссийской математической олимпиады MathCat, в которой приняли участие многие студенты потока. За баллы, полученные на этой олимпиаде, они также смогли повысить свой рейтинг.

Результаты

Как показали результаты зимней сессии, особой разницы в успеваемости студентов, разделенных по результатам ЕГЭ или нет, мы не почувствовали. Баллы за итоговый тест в прошлом году (до разделения на потоки) отражены на рисунке 1. На рисунке 2 отображены результаты итогового теста за 1 семестр студентов, обучающихся в потоке студентов с результатами по ЕГЭ в диапазоне 88 – 94 балла.



Рис. 1. Результаты итогового теста за 1 семестр 23-24 учебного года.

На первый взгляд может показаться, что результаты на рис. 2 лучше, чем на рис. 1, но надо отметить, что студенты, которые хорошо успевали в течение семестра, имели возможность пройти итоговый тест досрочно. В первом семестре 23-24 учебного года таких студентов было примерно 30%. И почти все они хорошо справились с итоговым тестом. В этом учебном году по объективным причинам досрочно итоговый тест проходило лишь 10% студентов. Во всем остальном, что касается индивидуального подхода к обучению студентов, учащиеся были в одинаковых условиях.



Рис. 2. Результаты итогового теста за 1 семестр 24-25 учебного года (после разделения по рейтингу ЕГЭ).

Выводы

В целом индивидуальный подход к обучению высшей математике дает положительные результаты, особенно в этом помогают дистанционные курсы СДО и БСО. Студент может выбрать способ изучения материала и уровень, которого он хочет достичь. Деление на потоки по баллам, полученным на ЕГЭ, по-видимому, не имеет большого смысла. Очень много сложностей с организацией учебного процесса, при этом особых изменений по результатам сессии не замечено. Существенная разница наблюдалась только в первом потоке стобалльников. Конечно, имеет смысл выделить в отдельный поток студентов, изучающих русский язык. Это тем более целесообразно, поскольку и по русскому языку их объединяют в группы по уровню владения им. В этом потоке необходимо наличие специально разработанных материалов, помогающих студенту не только освоить пройденный на лекции материал, но и усовершенствовать свои языковые навыки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Медведева Н.А. Важность индивидуального подхода при обучении высшей математике в техническом вузе // Строительство: наука и образование. 2015. No 1. Ст. 1. Режим доступа: http://nso-journal.ru

[2] Лагунова М.В., Иванова Л.А., Ежова Н.В. Балльная система оценки знаний и индивидуальный подход при обучении высшей математике //

Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. № 13. С. 15-24
[3] Ежов Е.И., Ежова Н.В., Лагунова М.В. Входное тестирование как средство анализа уровня математической подготовки первокурсников// В сборнике: Физико-математическое образование в современном обществе: проблемы, пути решения, перспективы развития. Материалы Международной научно-практической конференции. Псков, 2023
[4] В.Е. Васильев, М.В. Лагунова, Н.В. Ежова. Дистанционное обучение студентов-заочников механико-машиностроительного отделения ИММиТ. //Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. –С. 72-81.
[5] М.В. Лагунова, Н.В. Ежова. Интерактивный подход в дистанционном преподавании курса математики студентам механико-машиностроительного направления. //Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. –С. 67-71
[6] 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.
[7] М.В. Лагунова, Л.А. Иванова, Н.В. Ежова. О курсе высшей математики для студентов механического направления, обучающихся заочно. // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы Междунар. науч.-практ. конференции. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2023. –С.3-12.
[8] Marina V. Lagunova, Liubov A. Ivanova, Natalja V. Ezhova/ Blended Learning of Higher Mathematics in the Century of the Digitalization of Education. Lecture Notes in Mechanical Engineering – Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, SPb., June 2021: - Advances in Mechanical Engineering. Springer. 2022. – pp.1-8

M.V.Lagunova, L.A.Ivanova, N.V.Ezhova

VARIOUS APPROACHES TO ORGANIZING INDIVIDUAL TRAINING IN HIGHER MATHEMATICS FOR STUDENTS OF TECHNICAL SCIENCES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper highlights various approaches to individual student training, tested in various areas of SPbPU student training. The advantages and disadvantages of each teaching method are assessed.

Key words: point assessment system (PAS), e-learning, distance learning, individual approach to learning, distance learning, test, Moodle.

REFERENCES

[1] Medvedeva N.A. The Importance of an Individual Approach in Teaching Higher Mathematics in a Technical University // Construction: Science and Education. 2015. No. 1. Article 1. Access mode: http://nso-journal.ru

[2] Lagunova M.V., Ivanova L.A., Ezhova N.V. Point system of knowledge assessment and individual approach in teaching higher mathematics // Modern mechanical engineering. Science and education. 2024. No. 13. P. 15-24

[3] Ezhov E.I., Ezhova N.V., Lagunova M.V. Entrance testing as a means of analyzing the level of mathematical training of first-year students // In the collection: Physics and Mathematics Education in Modern Society: Problems, Solutions, Development Prospects. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Pskov, 2023

[4] V.E. Vasiliev, M.V. Lagunova, N.V. Ezhova. Distance education of correspondence students of the mechanical engineering department of IMMiT. // Modern engineering. Science and Education: Materials Intern. scientific-practical conferences. –SPb .: Polytechnic Publishing House. University, 2016. –pp. 72-81.

[5] M.V. Lagunova, N.V. Ezhova. An interactive approach in the distance teaching of a mathematics course to students in the mechanical engineering field. // Modern engineering. Science and Education: Materials Intern. scientific-practical conferences. –SPb .: Polytechnic Publishing House. University, 2014. –pp. 67-71

[6] M.V. Lagunova, N.V. Ezhova, D.V. Ketov. The use of Internet technologies in teaching a mathematics course for students of the mechanical engineering field of IMMiT // Modern Engineering. Science and Education: Materials Intern. scientific-practical conferences. –SPb.: Polytechnic Publishing House. University, 2013. –pp.118-123.

[7] Lagunova M.V., Ezhova N.V. The distribution of time in the course of mathematics and the organization of independent work of students. // Modern engineering. Science and education: materials of the International scientific-practical conference. - SPb.: Publishing house of the Polytechnic. University, 2017 – pp.41-49

[8] Marina V. Lagunova, Liubov A. Ivanova, Natalja V. Ezhova/ Blended Learning of Higher Mathematics in the Century of the Digitalization of Education. Lecture Notes in Mechanical Engineering – Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, SPb., June 2021: - Advances in Mechanical Engineering. Springer. 2022. – pp.1-8

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621 + 531.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id-99

Г.Н. Петров[1], А.Н. Евграфов[2]

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ В ПРОГРАММАХ EXCEL И MATHCAD



[1]Геннадий Николаевич Петров,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: gnpet@mail.ru.



[2]Александр Николаевич Евграфов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: alexevgrafov@mail.ru.

Аннотация

Для расчёта геометрии механизмов используются не только (и не всегда) специальные компьютерные программы, но и широко распространённые универсальные, такие, как *Excel* из офисного пакета от *Microsoft* или *MathCAD* фирмы *PTC*. Причём возможности визуализации результатов расчётов, имеющиеся в этих программах и весьма полезные с точки зрения удобства пользования, используются далеко не в полной мере. В предлагаемой статье рассматриваются способы создания анимации диаграмм (например, кинематических схем механизмов).

Ключевые слова: MathCAD, Excel, визуализация, кинематическая схема, механизм.

Введение

В условиях цифровизации инженерного образования возрастает потребность в эффективных методах визуализации расчетов, которые позволяют студентам технических специальностей глубже понимать сложные математические модели, физические процессы и алгоритмы

численных методов. Традиционные подходы, основанные на ручных вычислениях и статических графиках, уступают место интерактивным компьютерным технологиям, обеспечивающим наглядность и динамическое представление данных [1-5].

Среди наиболее распространенных программных решений выделяются Microsoft Excel и Mathcad от PTC, которые, несмотря на различия в подходах, широко применяются в различных областях — от экономики до машиностроения [6, 7].

Excel, благодаря своей универсальности и доступности, остается стандартом для обработки табличных данных и построения базовых графиков [8]. Однако его возможности ограничены при работе с аналитическими вычислениями и динамической визуализацией [9]. В то же время Mathcad предлагает интерактивную среду для символьной математики [10], инженерных расчетов [11] и наглядного представления зависимостей [12], что делает его предпочтительным инструментом в технических дисциплинах [13-15].

Известны аналитические методы геометрического и кинематического анализа плоских рычажных [например, 16, 17] и пространственных [18, 19] механизмов. В работах [20-23] рассмотрены аналитические методы силового расчета механизмов с учетом сил трения, в том числе самотормозящих, а в работах [24-26] – методы расчета динамики управляемых машин. При выполнении подобных расчетов удобно сразу видеть их результаты, например, анимацию кинематической схемы механизма, попадание механизма в особое положение, траекторию характерных точек механизма, изменение сил, действующих в кинематических парах, и т.д.

В данной статье рассматриваются методы визуализации расчетов в Excel и Mathcad, проводится анализ их возможностей и удобства применения при обучении студентов технических специальностей. Особое внимание уделяется динамической визуализации, включая анимацию параметров, что актуально для задач оптимизации и численного моделирования.

Постановка задачи

Целью данного исследования является анализ и разработка методов визуализации расчетов в универсальных программных пакетах Excel и MathCAD, применяемых для моделирования и анализа механических систем. Основные задачи исследования включают:

Исследование возможностей визуализации в Excel и MathCAD, включая создание анимации кинематических схем и других динамических представлений данных.

Применение методов визуализации для анализа конкретных механических систем

Сравнение эффективности использования Excel и MathCAD для задач визуализации в инженерном образовании и научных исследованиях.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей потребностью в цифровизации инженерного образования и необходимостью наглядного представления сложных математических моделей и физических процессов.

Визуализация в MS Excel

В работе [6] приведен код макроса, который позволяет анимировать схемы и графики, построенные в программе MS Excel. Однако в последних версиях Excel анимация не происходит, поскольку программа не успевает прорисовать схему на каждом шаге расчета. Для исправления этого дефекта предлагаем немного изменить код макроса, добавив в него перед выполнением расчета на очередном шаге команду DoEvents.

DoEvents – функция, которая позволяет системе операционной среды выполнить ожидающие операции во время выполнения макроса [27]. При вызове DoEvents выполнение макроса прерывается и выполняются все ожидающие операции, в нашем случае это прорисовка схемы (например, кинематической схемы механизма), потом макрос возобновляет свою работу.

Тогда код, приведенный в [6], будет выглядеть следующим образом:

```
Sub Cycle()
  Dim i As Integer
   Dim Stp As Integer
   Stp = Worksheets("Лист1").Cells(3, 2)
   Calculate
   For i = 0 To 360 / Stp – 1
DoEvents
   Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) = Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) + Stp
   Calculate
   Next
End Sub
```

Рис. 1. Макрос «Cycle»

Этот макрос изменяет один независимый параметр, от которого зависят все остальные параметры. Например, это может быть обобщённая координата, определяющая положение входного (ведущего) звена. Изменив эту координату, мы увидим, как изменилось положение входного звена и всех остальных звеньев. Если организовать цикл, т.е. изменение этой координаты от начального положения до конечного, то мы получим

визуализацию движения механизма из начального положения в конечное. Для организации цикла в [6] использована конструкция *For…Next*. Независимый параметр (например, *q*) содержится в ячейке, находящейся на второй строке второго столбца (т.е. в ячейке *B*2) листа с именем «Лист1». Шаг изменения независимого параметра назван переменной Stp. Её численное значение берётся из ячейки *B3*, т.е. третьей строки второго столбца. При выполнении макроса независимый параметр, содержащийся в ячейке *B2* листа с именем «Лист1», изменится на значение переменной Stp. При выполнении функции DoEvents прорисуется изображение ведущего звена, который переместился на величину шага, вызывая перемещение всех остальных подвижных звеньев.

На рис. 2 представлена нарисованная в Excel схема механизма Тео Янсена [28] при пяти разных значениях входной обобщённой координаты. Сам механизм (или «кинетическая скульптура», как его называет автор) является одноподвижным: к входному звену присоединено восемь структурных групп Ассура типа BBB. Группы построены так, что их внешний облик напоминает лошадь. При изменении положения входного звена все остальные звенья (структурные группы) приходят в движение, создавая иллюзию скачущей лошади.

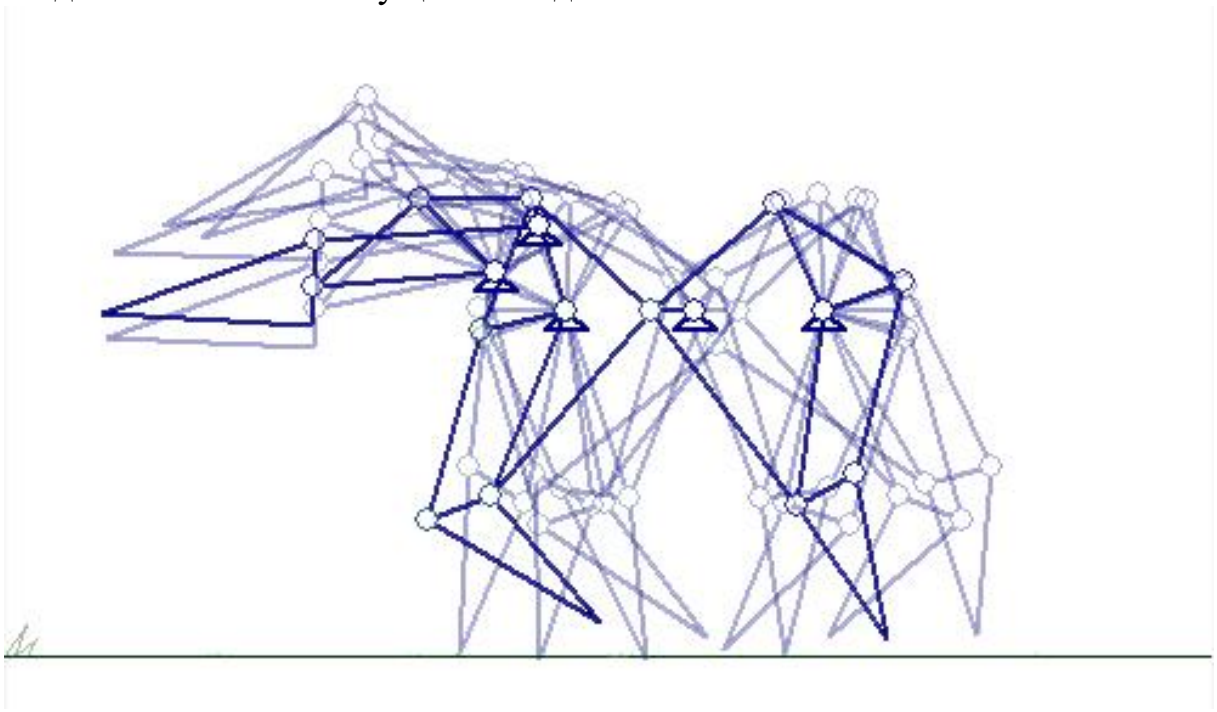


Рис. 2. Схема механизма Тео Янсена при пяти значениях входной координаты

Положение каждого звена и каждой характерной точки этого механизма описывается системой тригонометрических уравнений, результат решения которых можно наглядно наблюдать с помощью диаграммы Excel. Меняя входные параметры (размеры звеньев), можно добиться наибольшей выразительности получившейся фигуры. Используя

макрос конструкции «Cycle» (см. рис. 1), можно до проведения эксперимента увидеть механизма в движении.

В механизме Тео Янсена все многочисленные звенья приводятся в движение от одного движущего звена. В современном машиностроении наметилась тенденция использования более простых по структуре механизмов, добиваясь получения нужного движения рабочего звена за счет увеличения числа приводов [29]. На рис. 3 показана нарисованная в Excel схема автовышки с тремя гидроприводами. Положение звеньев такого механизма определяется заданием не одной, а трёх обобщённых координат, которые обозначены q_1, q_2 и q_3. Эти координаты задают перемещение поршней внутри цилиндров. Для пошагового изменения этих координат достаточно использовать макрос конструкции Step (рис. 4). В этом макросе переменная Stp обозначает шаг изменения обобщённой координаты, значение шага задаётся в ячейке *B*3. Значение обобщённой координаты, находящейся на второй строке второго столбца (т.е. ячейки *B*2) листа с именем «Лист1» увеличивается на величину шага Stp.

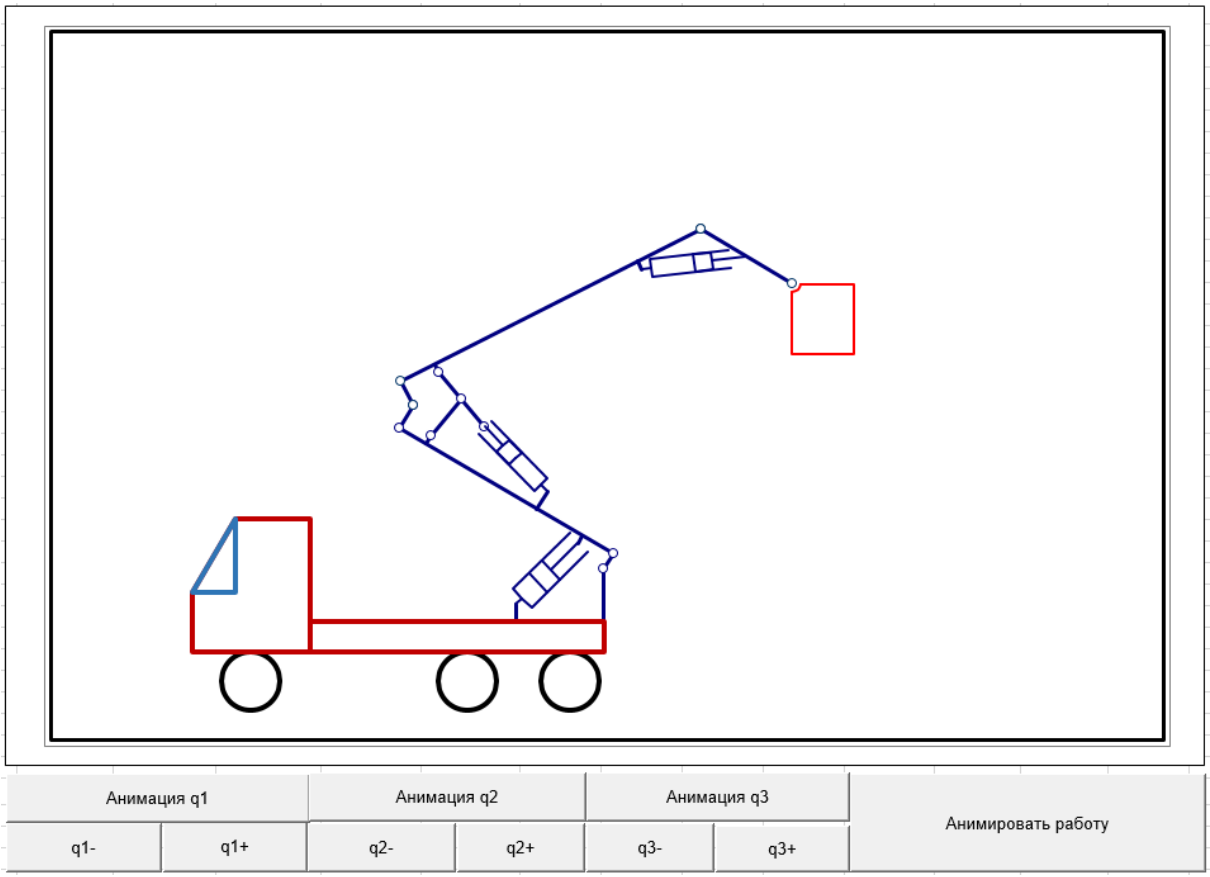


Рис. 3. Схема механизма автовышки с тремя приводами

Увеличивая или уменьшая значение обобщённых координат q_1, q_2 или q_3, можно наблюдать за изменением конфигурации механизма. При этом

очень быстро приходится убедиться в том, что произвольное изменение обобщённых координат приводит к потере устойчивости всей конструкции.

```
Sub Step()
Stp = Worksheets("Лист1").Cells(3, 2)
Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) = Worksheets("Лист1").Cells(2, 2) + Stp
End Sub
```

Рис. 4. Макрос «Step»

Впечатляющую наглядность с помощью диаграмм Excel можно придать способам получения тех кривых, по которым описываются профили зубьев зубчатых колёс: эвольвент, гипоциклоид, эпициклоид и др. Циклоида – самая популярная кривая XVII века. В 1674 г. Ф. Лагир предложил выполнять профиль зубьев зубчатых колес по циклоиде: головка зуба описывается эпициклоидой, а ножка – гипоциклоидой. Визуализировать получение этих кривых можно, если придать анимацию вспомогательным окружностям, которые перекатываются снаружи и внутри основной окружности. На рисунке 5, *а* соотношение радиусов основной R и вспомогательной r окружности равно 3; гипоциклоида представляет собой треугольник с дугообразными сторонами. Если соотношение R/r дробное, то появляются изумительные узоры (рис. 5, *б*).

При соотношении радиусов $R/r = 2$ гипоциклоида обращается в отрезок прямой, длина которой равна диаметру основной окружности (рис. 5, *в*). Каждая точка вспомогательной окружности, которая перекатывается внутри основной окружности, движется по диаметру основной окружности. Получилась анимированная схема планетарной передачи, в которой диаметр начальной окружности сателлита (планетного колеса) в два раза меньше диаметра начальной окружности внешнего колеса. Такой механизм использовал Дж. Уатт для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное.

Если соотношение R/r немногим больше единицы, например, $R/r = 1{,}1$, то получаем анимированную схему, иллюстрирующую работу циклоидного редуктора (рис. 5, *г*). У внутреннего колеса (сателлита) диаметр и число зубьев немногим меньше, чем у внешнего колеса. В анимированной схеме видно, что центр внутреннего колеса движется по дуге окружности, причём направление его вращения противоположно направлению вращения сателлита, а скорость вращения в 10 раз больше. Таким образом, анимированная схема наглядно показывает, что циклоидный редуктор с неподвижным внешним колесом, обладающий небольшими габаритами, воспроизводит большое отрицательное передаточное отношение.

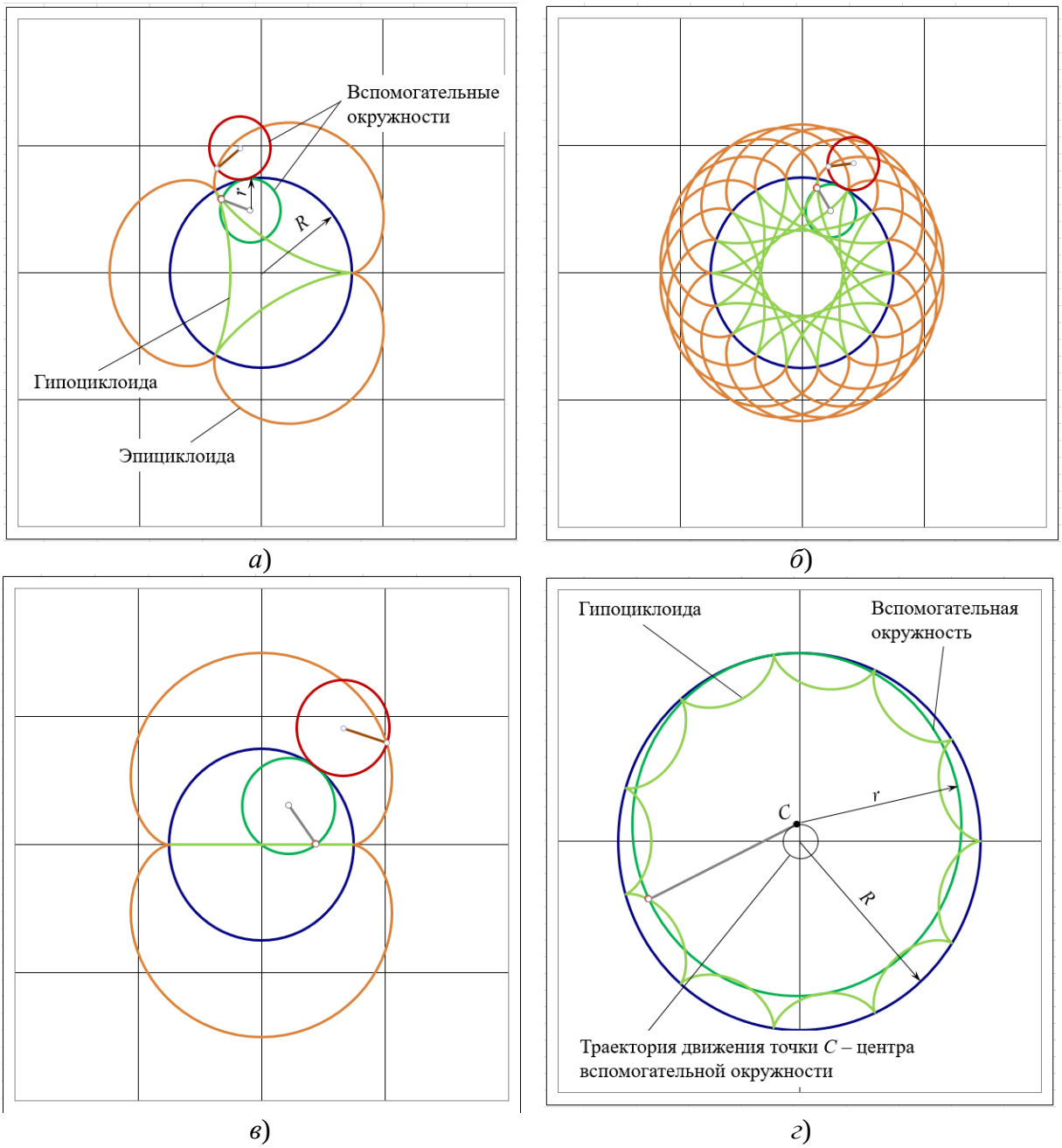


Рис. 5. Эпициклоиды и гипоциклоиды: *а*) $R/r = 3$; *б*) $R/r = 3{,}6$; *в*) $R/r = 2$; *г*) $R/r = 1{,}1$

Визуализация в программе *MathCAD*

Рассмотрим создание анимации замкнутого шестизвенного механизма (рис. 6) с помощью пакета *MathCAD*.

Механизм имеет пять подвижных звеньев и состоит из трех структурных групп (кривошипа *OA* и двух групп Ассура). На первой странице протокола введем все необходимые размеры:

- первая структурная группа
  длина кривошипа (*OA*) $L0:=0.1$
- вторая структурная группа (первая группа Ассура)
  длины звеньев (*AB*,O_2B) $L1:=0.25$, $L2:=0.275$
  координаты присоединения к стойке (x_{O2}, y_{O2}) $XF1:=0.24$, $YF1:=0.3$
  сборка, звено присоединения $M1:=-1$, $NP:=2$
  локальные координаты точки присоединения
  следующей структурной группы ($X_C^Л$, $Y_C^Л$) $X1:=0.14$, $Y1:=0.1$
- третья структурная группа (вторая группа Ассура)
  длина звена (*CD*) $L3:=0.375$
  координаты присоединения к стойке (y_D*, φ*) $QF2:=0.1$, $FF2:=15$
  сборка $M2:=1.$

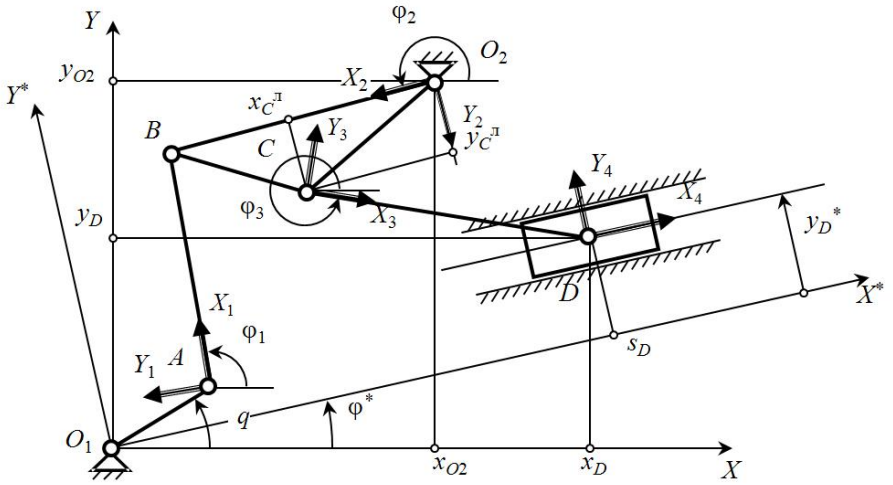


Рис. 6. Кинематическая схема шестизвенного механизма

Эти исходные данные однозначно определяют положение механизма для любой входной координаты q (угол поворота кривошипа *OA*). Зададим число точек $n:=60$, для которых будем проводить геометрический расчет. Введем массивы $k:=0 \ldots n-1$ и $q_k:=2\pi k/n$ (массив углов поворота кривошипа). Определим координаты всех точек:

$$XYO_k := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$ – столбец координат точки *O*,

$$XYA_k := \begin{pmatrix} L1 \cdot \cos(q_k) \\ L1 \cdot \sin(q_k) \end{pmatrix}$$ – столбец координат точки *A*,

$$XYO2_k := \begin{pmatrix} XF1 \\ YF1 \end{pmatrix}$$ – столбец координат точки O_2.

По известному алгоритму [16] можно найти аналогичные массивы для точек *B, C, D* (*XYb*$_k$, *XYcb*$_k$, *XYd*$_k$). Сведём все полученные координаты в два массива:

$x_{nk.k}, y_{nk,k}$ – массивы координат всех точек в проекциях на оси *X* и *Y*,

где n_k:=0 .. 5 – массив точек,

k:=0 … *n*-1 – массив положений кривошипа.

Получаем:

$$\begin{pmatrix} x_{0,k} \\ y_{0,k} \end{pmatrix} := XYO_k, \begin{pmatrix} x_{1,k} \\ y_{1,k} \end{pmatrix} := XYa_k, \begin{pmatrix} x_{2,k} \\ y_{2,k} \end{pmatrix} := XYO2_k, \begin{pmatrix} x_{3,k} \\ y_{3,k} \end{pmatrix} := XYc_k, \begin{pmatrix} x_{4,k} \\ y_{4,k} \end{pmatrix} := XYd_k, \begin{pmatrix} x_{5,k} \\ y_{5,k} \end{pmatrix} := XYb_k .$$

Определим массивы косинусов (*Cf*$_{mk,k}$) и синусов (*Sf*$_{mk,k}$) углов, связывающих локальные и неподвижные системы координат(*mk*:=0 ... 4 – массив звеньев). Для кривошипа (нулевое звено) можно записать:

$Cf_{0,k} := \cos(q_k)$, $Sf_{0,k} := \sin(q_k)$,

для ползуна (четвертое звено) – $Cf_{4,k} := \cos(\frac{FF\,2 \cdot \pi}{180})$, $Sf_{4,k} := \sin(\frac{FF\,2 \cdot \pi}{180})$.

Рисование кинематической схемы в *MathCAD*'е происходит аналогично тому, как описано для среды *Excel*. Для каждого из 60 положений *k* можно построить с помощью диаграммы кинематическую схему механизма, определив предварительно характерные точки (точки опор и ползуна).

Чтобы создать анимацию, воспользуемся переменной *FRAME* (по умолчанию *FRAME*=0). Нарисуем кинематическую схему для угла кривошипа q_{FRAME}=0 (рис. 7).

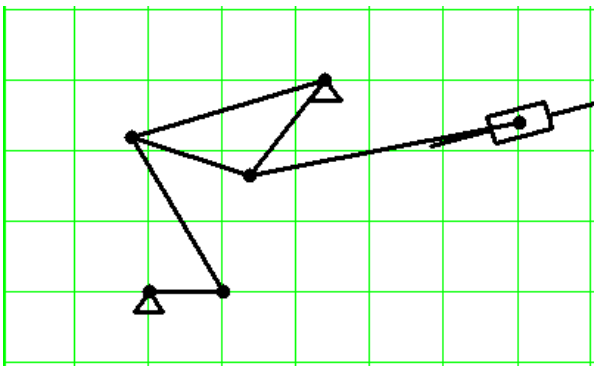


Рис. 7. Кинематическая схема механизма для угла qFRAME=0

Чтобы заставить схему двигаться, необходимо менять переменную *FRAME*. Для этого на вкладке Инструменты выбираем Анимация > Запись (рис. 8).

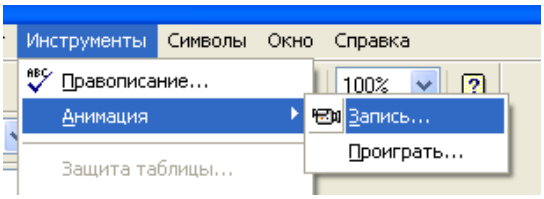


Рис. 8. Создание анимации

Появится окно Запись анимации (рис. 9).

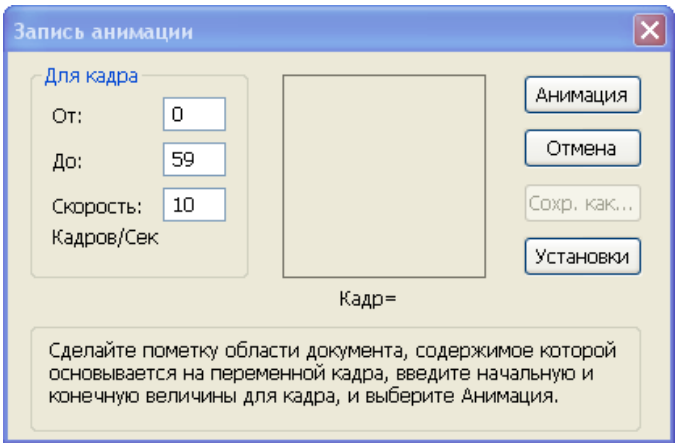


Рис. 9. Запись анимации

Выделяем область протокола, на которой расположена диаграмма (см. рис. 7), для переменной *FRAME* в окне Запись анимации (рис. 9) задаем диапазон изменения От: 0 До: 59 Скорость: 10 Кадров/Сек. Таким образом, меняя переменную *FRAME*, мы будем видеть изменение положения механизма с заданной скоростью смены кадров в секунду. Полученный файл (*.*avi*) можно сохранить и в дальнейшем воспроизвести с помощью любого проигрывателя независимо от протокола *MathCAD*.

Обсуждение

Excel показал себя как универсальный инструмент для базовой визуализации, особенно удобный для работы с табличными данными и простыми графиками. Однако его возможности ограничены при работе с аналитическими вычислениями.

MathCAD предоставляет более широкие возможности для символьной математики и динамической визуализации, что делает его предпочтительным для сложных инженерных расчетов.

MathCAD предоставляет более мощные инструменты для динамической визуализации, включая запись анимации, что особенно полезно для образовательных целей.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что даже универсальные программные пакеты, такие как Excel и MathCAD, могут быть эффективно использованы для визуализации инженерных расчетов. Это открывает новые возможности для преподавания технических дисциплин.

Исследование демонстрирует, что сочетание доступности и функциональности Excel и MathCAD делает их ценными инструментами для преподавателей, способствуя более глубокому пониманию механических систем и процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Иванов, Г.С. Компьютерная графика в инженерном анализе. М.: Машиностроение, 2021.

[2] Mayer, R. E. Multimedia Learning. Cambridge University Press, 2020.

[3] Мкртычев О.В. Компьютерные технологии в преподавании ТММ - цель или средство? Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. сс. 96-102.

[4] Коловский М.З., Евграфов А.Н. О некоторых направлениях модернизации курса ТММ. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1 (1). сс. 3-29.

[5] Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «ModelVision» // Теория механизмов и машин. - 2004. - № 1. - Том 2. - сс. 75-79.

[6] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Компьютерная анимация кинематических схем в программах Excel и Mathcad. Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 1 (11). сс. 71-80.

[7] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2017. pp. 45-56.

[8] Walkenbach, J. Excel 2019 Bible. Wiley, 2018.

[9] Евграфов А.Н. Программа расчета динамики однодвигательной машины. Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1 (1). сс. 83-91.

[10] Чигарев, А.В. Визуализация в математике с Mathcad. СПб: БХВ, 2019.

[11] Brent, R. Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations. Elsevier, 2006.

[12] Chen, K., & Zhang, Y. Data Visualization and Graphical Reporting in Scientific Computing. Springer, 2021.

[13] Мацюк И.Н., Третьяков В.М., Шляхов Э.М. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов высоких классов в программе Mathcad. Теория механизмов и машин. 2012. Т. 10. № 1 (19). сс. 65-70.

[14] Sorby, S. Visualization in Engineering Education. IJEE, 2019.
[15] Norton, R.L. Design of Machinery. McGraw-Hill, 2020.
[16] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2 (2). сс. 50-63.
[17] Андриенко П.А., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Хисамов А.В. Математическое определение конфигурации плоских рычажных механизмов со внутренним входом при геометрическом анализе. Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. № 13. сс. 81-93.
[18] Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 2 (123). сс. 170-176.
[19] Евграфов А.Н., Петров Г.Н., Терешин В.А. Использование дополнительных входов рычажных механизмов при приближении к особым положениям. Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. сс. 82-90.
[20] Egorova O.V., Samoilova M.V., Timofeev G.A., Evgrafov A.N. Force loading analysis of a cylindrical self-braking inverse gearing. International Review of Mechanical Engineering. 2020. Т. 14. № 2. сс. 73-78.
[21] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. сс. 75-82.
[22] Semenov Yu., Semenova N., Egorova O. Dynamic Mesh Forces in Accounting of the Time Variable Mesh Stiffness of a Gear Train. International Review of Mechanical Engineering, 2018, Vol. 12, №9, pp. 736-741.
[23] Semenov Yu. A., Semenova N. S. Study of Mechanisms with Allowance for Friction Forces in Kinematic Pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. pp. 169-180.
[24] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of multidirectional mechanism with excess inputs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016, Pp. 31-37.
[25] 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.
[26] Евграфов А.Н., Петров Г.Н., К вопросу о динамике машин с программным управлением//Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. № 12. сс. 65-80.

[27] Комолова, Н. В. Программирование на VBA в Excel 2019. / Н.В. Комолова, А В. Клименко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. - 496 с.: ил. ISBN 978-5-9775-6593-6
[28] Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism / Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. // Mechanisms and Machine Science. 2022. Т. 108 MMS. pp. 141-149.
[29] Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
[30] Степанов А.В., Степанов И.Ю. О Компьютерном воспроизведении сателлитных кривых планетарных зубчатых механизмов. Современные проблемы теории машин. 2015. № 3. Сс. 83-86.
[31] Сенчурин Л.П., Черенкова С.В., Иванова М.А. Компьютерная анимация схемы цевочно-циклоидального дифференциала. Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 8. Сс. 274-288.

G.N. Petrov, A.N. Евграфов

VISUALIZATION CALCULATIONS IN EXCEL AND MATHCAD PROGRAMS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Not only (and not always) special computer programs are used to calculate the geometry of mechanisms, but also widespread universal programs, such as Excel from the Microsoft office suite or MathCAD from PTC. Moreover, the possibilities of visualization of calculation results, available in these programs and very useful from the point of view of usability, are not fully used. In the proposed article, the methods of creating animation of diagrams (for example, kinematic diagrams of mechanisms) are considered.

Keywords: MathCAD, Excel, visualization, kinematic diagram, mechanism.

REFERENCES

[1] Ivanov, G.S. Computer graphics in engineering analysis. Moscow: Mashinostroenie, 2021. (in rus.)

[2] Mayer, R. E. Multimedia Learning. Cambridge University Press, 2020. (in rus.)
[3] Mkrtychev O.V. Computer technologies in teaching TMM - a goal or a means? Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. 2012. No. 2. pp. 96-102. (in rus.)
[4] Kolovskiy M.Z., Evgrafov A.N. About some directions of modernization of TMM course. Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 1 (1). pp. 3-29. (in rus.)
[5] Petrov G.N. Computer modeling of mechanical systems in the environment “ModelVision” // Theory of mechanisms and machines. - 2004. - № 1. - Vol. 2. - pp. 75-79. (in rus.)
[6] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer animation of kinematic schemes in Excel and Mathcad programs. Theory of mechanisms and machines. 2008. T. 6. No. 1 (11). pp. 71-80. (in rus.)
[7] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Computer simulation of mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2017. pp. 45-56.
[8] Walkenbach, J. Excel 2019 Bible. Wiley, 2018.
[9] Evgrafov A.N. Program of calculation of dynamics of a single-motor machine. Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 1 (1). pp. 83-91. (in rus.)
[10] Chigarev, A.V. Visualization in mathematics with Mathcad. SPb: BHV, 2019. (in rus.)
[11] Brent, R. Engineering with Mathcad: Using Mathcad to Create and Organize your Engineering Calculations. Elsevier, 2006.
[12] Chen, K., & Zhang, Y. Data Visualization and Graphical Reporting in Scientific Computing. Springer, 2021.
[13] Matsyuk I.N., Tretiakov V.M., Shlyakhov E.M. Kinematic analysis of plane lever mechanisms of high classes in Mathcad program. Theory of mechanisms and machines. 2012. T. 10. No. 1 (19). pp. 65-70. (in rus.)
[14] Sorby, S. Visualization in Engineering Education. IJEE, 2019.
[15] Norton, R.L. Design of Machinery. McGraw-Hill, 2020.
[16] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometrical and kinetostatic analysis of the flat lever mechanisms of the second class. // Theory of mechanisms and machines. 2003. T. 1. No. 2 (2). pp. 50-63. (in rus.)
[17] Andrienko, P.A.; Evgrafov, A.N.; Kozlikin, D.P.; Khisamov, A.V. Mathematical definition of the configuration of the flat lever mechanisms with an internal input at the geometrical analysis. Modern Engineering. Science and Education. 2024. No. 13. pp. 81-93. (in rus.)

[18] Khrostitskiy A.A., Evgrafov A.N., Teryoshin V.A. Geometry and kinematics of a spatial hexagon with redundant links. Scientific and Technical Vedomosti of St. Petersburg State Polytechnic University. 2011. No. 2 (123). pp. 170-176. (in rus.)
[19] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Tereshin V.A. Utilization of additional inputs of lever mechanisms at approach to special positions. Sovremennoe mashinostroenie. Science and education. 2022. No. 11. pp. 82-90. (in rus.)
[20] Egorova O.V., Samoilova M.V., Timofeev G.A., Evgrafov A.N. Force loading analysis of a cylindrical self-braking inverse gearing. International Review of Mechanical Engineering. 2020. T. 14. № 2. pp. 73-78.
[21] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. В сборнике: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. pp. 75-82.
[22] Semenov Yu., Semenova N., Egorova O. Dynamic Mesh Forces in Accounting of the Time Variable Mesh Stiffness of a Gear Train. International Review of Mechanical Engineering, 2018, Vol. 12, №9, pp. 736-741.
[23] Semenov Yu. A., Semenova N. S. Study of Mechanisms with Allowance for Friction Forces in Kinematic Pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. pp. 169-180.
[24] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Drive selection of multidirectional mechanism with excess inputs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016, Pp. 31-37.
[25] Kolovskiy M.Z., Petrov G.N., Sloush A.V. About motion control of closed lever mechanisms with several degrees of freedom // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2000, № 4. (in rus.)
[26] Evgrafov A.N., Petrov G.N., To a question about the dynamics of the machines with the program control//Sovremennoe mashinostroenie. Science and education. 2023. No. 12. pp. 65-80. (in rus.)
[27] Komolova, N. V. Programming in VBA in Excel 2019. / N.V. Komolova, A.V. Klimenko. - SPb.: BHV-Peterburg, 2020. - 496 p.: ill. ISBN 978-5-9775-6593-6 (in rus.)
[28] Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism / Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. // Mechanisms and Machine Science. 2022. T. 108 MMS. pp. 141-149.

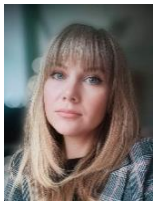
[29] Aleksandrov M.P. Load-lifting machines: Textbook for universities. - M.: Izd-vo MSTU named after N.E. Bauman - Higher School, 2000. - 552 p. (in rus.)
[30] Stepanov A.V., Stepanov I.Yu. On Computer Reproduction of Satellite Curves of Planetary Gear Mechanisms. Modern problems of the theory of machines. 2015. № 3. Pp. 83-86. (in rus.)
[31] Senchurin L.P., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Computer animation of the scheme of the chain-cycloidal differential. Modern Engineering. Science and Education. 2019. № 8. Pp. 274-288. (in rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id-100

И.В. Резепова[1], С.П. Сульдин[2], Н.И. Наумкин[3]

ФОРМИРОВАНИЕ У БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ ПРОЕКТНОГО КОМПОНЕНТА ИННОВАЦИОННОЙ КОМПЕТЕНЦИИ ПРИ ОБУЧЕНИИ В СРЕДЕ КОМПАС-3D



[1]Ирина Владимировна Резепова,
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (927)1933025, E-mail: rezepovaiv@mail.ru.



[2]Сергей Петрович Сульдин,
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (83451)63657, E-mail: rimstanok@mail.ru.



[3]Николай Иванович Наумкин,
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
Россия, Саранск
Тел.: (8342)254496, E-mail: naumn@yandex.ru

Аннотация

В статье актуализировано обоснование необходимости подготовки студентов высших учебных заведений к инновационной инженерной деятельности, конкретизировано ее понимание, приведена структура компетентности в инновационной деятельности. Рассмотрен процесс формирования проектного компонента такой компетентности, при выполнении курсового проектирования по дисциплине «CAD-системы», с применением современных методов автоматизированного проектирования в среде КОМПАС-3D. Для иллюстрации подхода к решению этой задачи, рассмотрен алгоритмизированный пример моделирования в среде автоматизированного проектирования, как средства повышения

эффективности подготовки студентов к инновационной инженерной деятельности.

Ключевые слова: инновационная инженерная деятельность, компетентность, проектные компетенции, деятельностный подход, 3D-модель, курсовое проектирование, КОМПАС-3D.

Введение

Современный мир проходит стадию Четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) [1-3]. Данный период характеризуется новыми подходами к производству, автоматизацией бизнес-процессов, применением технологии искусственного интеллекта. Страны находятся на пороге нового технологического уклада, основными характеристиками которого являются стремительная цифровизация экономики и активное развитие инновационных технологий. Адаптация под новые условия развития занимает особое место и в национальной экономике. Создание умных производств, обеспечение интероперабельности продуктов, возможность выхода на глобальный рынок - задачи, которые необходимо решать в современных реалиях. Нормативными документами уже регламентированы фундаментальные эталонные модели для концепции «Индустрия 4.0» [4]. Традиционные методы инженерной деятельности уступают место инновационным подходам, требующим от специалистов как глубоких технических знаний, так и навыков управления инновациями, междисциплинарного мышления и адаптивности.

Инженерное образование в настоящее время вновь приобретает лидирующие позиции в системе отечественного высшего образования. Современное производство, в том числе машиностроение, нуждается в специалистах способных применять системный подход для решения инженерных задач, осуществлять критический анализ, оптимизировать найденные решения. В этих условиях, машиностроение является стратегической отраслью экономики. Оно обеспечивает формирование современных основных фондов предприятий различных отраслей, постоянные и стабильно высокие темпы роста экономики, технологический суверенитет государства. Перспективы развития данной сферы экономики тесно взаимосвязаны с уровнем владения инженерами инновационной инженерной деятельностью (ИИД) [5].

Актуализация понимания инновационной инженерной деятельности и ее структуры

В МГУ им. Н.П. Огарева начиная с 2000-х годов занимаются проблемой подготовки будущих инженеров к инновационной инженерной

деятельности, понимая под этой подготовкой формирование у обучающихся компетентности в ИИД (КИИД). В связи с этим актуализируем некоторые ключевые понятия этой предметной области [7, 10].

Инновации представляют собой процесс создания, освоения и реализации на практике достижений, полученных в научно-технической сфере. Цикл работ от идеи создания инновационного продукта, его промышленного изготовления и реализации на рынке будет являться инновационной деятельностью (ИД).

ИИД представляет собой комплекс мероприятий, направленный на разработку, исследование, проектирование и реализацию принципиально новых технических решений, изделий, материалов, процессов и технологий, способствующих улучшению производственных процессов, повышение качества продукции и снижению ресурсозатратности.

ИИД рассматривается учебной литературой [10] как разработка и создание новой техники и технологий, доведенных до вида товарной продукции, представленной охранными документами на интеллектуальную собственность, технической документацией и обеспечивающей экономический, социальный или другой эффект и обладающая конкурентоспособностью.

К основным элементам инновационной инженерной деятельности относятся научные исследования, экспериментальные работы и инженерные изыскания, направленные на поиск новых технических решений и оптимизацию существующих технологических процессов. Ключевыми целями инновационной инженерной деятельности являются конкурентоспособные продукты и технологии, обеспечивающие повышение производительности труда и сокращение себестоимости выпускаемой продукции, улучшение экологичности, снижение энергоресурсоемкости производства и повышения уровня автоматизации рабочих мест, формирование потенциала дальнейшего технологического развития отраслей экономики.

Структура ИИД [8] представляет собой совокупность характеристик, видов ИИД и инновационных продуктов. К характеристикам ИИД можно отнести усиление творческой составляющей деятельности, интеграцию инженерных функций и видов деятельности, межпрофессиональную коммуникацию, ориентированность на рынок и его потребности. По видам ИИД можно условно разделить на: изобретательство, конструирование, проектирование, научные исследование, умение творчески решать профессиональные задачи, доводить результат до инновационного продукта и др. Результаты инновационной инженерной деятельности — это патенты и другие охранные документы на РИД, технологическая документация на процессы, техническая документация на изделия.

Подготовка современного студента - будущего инженера к ИИД основополагающая проблема, стоящая перед техническими ВУЗами. Сформированность у студентов КИИД (компетентности в инновационной инженерной деятельности) в дальнейшем будет определять развитие общества и экономики.

Научные исследования [6, 7, 9] показывают, что решить задачу инновационной подготовки учащихся можно путем проектного обучения. Курсовое проектирование, широко применяемое при обучении дисциплинам в области подготовки инженерных кадров, способствует гарантированному формированию КИИД у студентов.

Сопоставление проектной деятельности и инновационной инженерной, показывает идентичность процесса формирования КИИД. Это прослеживается в способах достижения целей и конечных результатах, применяемом инструментарии и алгоритме реализации.

Структуры проектной деятельности (ПД) и ИИД перекликаются друг с другом, и представляет собой следующую совокупность компонентов [7] (рис. 1).

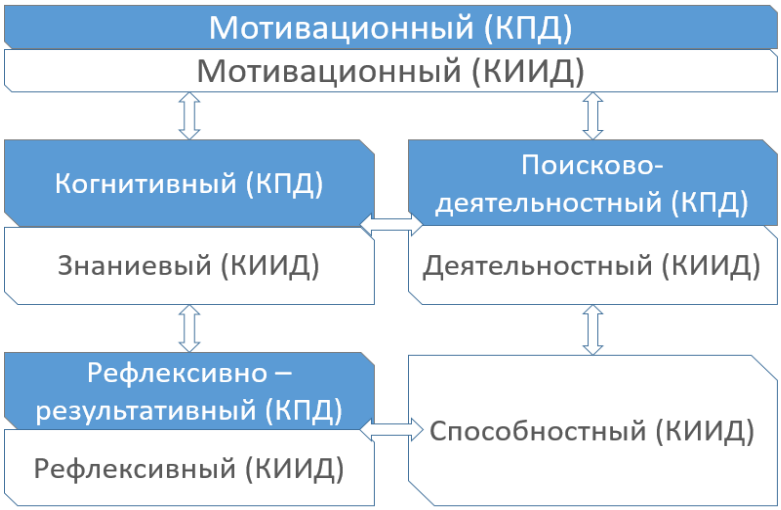


Рис.1.Сравнение компонентов ПД и ИИД

Авторами [7] выделены в рамках деятельностного компонента 15 компетенций, владение которыми у студентов обеспечивает им компетентность в ИИД. Проанализируем их применительно к проектному обучению и представим в виде таблицы 1.

Деятельностный компонент КИИД проектных компетенций

Особое место в структуре КИИД занимает деятельностный компонент (ДК). Механизмы эффективного управления проектами выявляются непосредственно в процессе изучения данного компонента КИИД.

Таблица 1. Компетенции в рамках деятельностного компонента

№	Наименование компетенции	Содержание компетенции
1	Владение знаниями	Владение актуальной, полной и структурированной информацией, обеспечение эффективного применение этих знаний.
2	Владение системой проектных знаний	Понимание всех стадий и фаз жизненного цикла проекта, методов и инструментов управления реализации проектов различной сложности.
3	Способность ставить задачу	Владение управленческими и коммуникативными навыками.
4	Способность синтезировать решение, изобретать	Принятие нестандартных, оригинальных решений задач и направлений достижения целей проекта, обеспечивающих результат.
5	Способность осваивать готовые решения	Применение известных и проверенных технологий, методов и средств, обеспечивающих внедрение инноваций, снижение затрат на разработку решений.
6	Готовность работать в команде	Реализация крупных проектов, достижение общих целей.
7	Способность использовать инструменты	Применение различных средств, в том числе систем автоматизированного проектирования для выполнения профессиональных задач.
8	Способность принимать решение и готовность нести за него ответственность	Обеспечение работоспособности, надёжности и безопасности систем, способность принимать решения и отвечать за них.
9	Способность разрабатывать модели объектов	Применение математических, компьютерных и графических методов для создания формализованных представлений объектов или процессов.
10	Способность к проектированию	Реализация идей в работающие проекты, через создание проектной документации, расчеты и моделирование.
11	Способность разрабатывать проекты с использованием ТРИЗ	Поиск оптимальных решений реализации инновационных проектов, создающих революционные технологии.
12	Способность к анализу и синтезу	Восприятие и обработка информации, обеспечивающее формирование новых знаний и представлений.
13	Способность изготавливать инновационные продукты с использованием высоких технологий	Применение методов и технологий, оборудования, инструментов, приспособлений необходимых для изготовления инновационных продуктов.
14	Способность к представлению решения в конечном виде	Демонстрация полученных результатов, идей или предложений в удобной для восприятия форме.
15	Способность к рефлексии	Выполнение критического анализа, обсуждение и осмысление опыта с коллегами, участвующих в одном проекте.

В нем находят практическое применение знаниевый, мотивационный и другие компоненты компетентности инновационной инженерной деятельности [8, 11] (рис. 2).

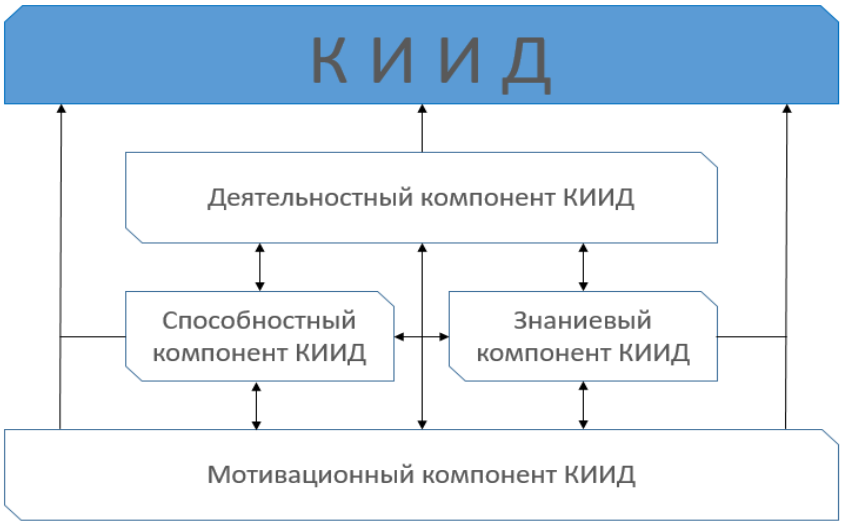


Рис. 2. Деятельностный компонент в структуре КИИД

В структуру деятельностного компонента входят профессиональные и общекультурные компетенции. Являясь основным звеном, он обеспечивает реализацию проектных замыслов на практике. КИИД в рамках деятельностного компонента — это способность визуализировать, ставить задачи и синтезировать решения, управлять РИД, использовать нормативные документы и др.

В структуре проектных компетенций ДК может быть представлен как некая система действий, выполняемых в условиях неопределенности и изменчивости внешней среды и направленных на достижение поставленных задач. ДК формируется через включение субъекта в практическую деятельность [7, 8].

Деятельностный компонент в рамках совместной работы над инновационными проектами обеспечивает способность к оперативному реагированию на изменения, эффективное выполнение задач за счет распределения функций, генерацию нестандартных решений в групповом взаимодействии. Успешность КИИД зависит от сформированности деятельностных компетенций у участников [6, 10].

Очевидно, что формирование необходимых компетенций (рис. 1 и таблица 1) происходит при участии студентов в проектной деятельности [7]. Если рассматривать непосредственно КИИД, то формирование компетенций возможно при использовании в образовательном процессе курсового проектирования. Это подтверждается сравнительным экспериментом [7], где для формирования навыков проектно-исследовательской деятельности было использовано комплексное курсовое проектирование. Отличительной чертой которого было исследование

единой темы по конкретному объекту рабочей программы дисциплины. Результаты, полученные в экспериментальной группе, показали повышение сформированности по всем пятнадцати компетенциям до значений близких к наивысшим. Что свидетельствует о целесообразности применения для инновационной инженерной подготовки комплексного курсового проектирования.

Формирование проектного компонента инновационной компетенции при обучении в среде КОМПАС-3D

Как показывают исследования [7], курсовое проектирование как вид учебной работы способствует не только усвоению знаний, но и формированию профессионально значимых компетенций.

В учебном процессе курсовое проектирование предусмотрено в рабочих программах соответствующих дисциплин, что способствует формированию КИИД и подготовке будущих инженеров к ИИД.

Одной из таких дисциплин является «CAD-системы». При изучении данной дисциплины студенты знакомятся с системами автоматизированного проектирования, методами конструкторско-технологической подготовки производства в области CAD, основам 2D и 3D-моделирования с применением технологий диалогового управления проектами, параметризации и другими специальным инструментами, позволяющими осуществлять подготовку конструкторской документации. Таким образом, дисциплина «CAD-системы» позволяет реализовать алгоритмизированный подход к моделированию, проектную деятельность в САПР-среде и поэтапное формирование компетенций [13, 14].

Курс данной дисциплины строится на знаниях, полученных по дисциплинам «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика», «Метрология», «Стандартизация и сертификация», «Детали машин и основы конструирования». Полученные при изучении ЗУН являются основой для дисциплин «CAPP и CAM-системы», «PDM, PLM-системы и CALS-технологии в машиностроении».

Курсовое проектирование по данной дисциплине является одним из ключевых элементов обучения. Студенты учатся правильно применять полученные ЗУН в решении профессиональных конструкторских задач. Формирование компетенций ИИД происходит в результате расширения, углубления, систематизации и закрепления теоретических знаний студентов, и применение этих знаний для проектирования различных инструментов, развитие и закрепление навыков ведения самостоятельной инженерной работы, овладение методикой теоретико-экспериментальных исследований инструментальных систем.

Для повышения эффективности формирования КИИД, на кафедре «Технология машиностроения» Рузаевского института машиностроения (филиал) МГУ им. Н. П. Огарева было разработано учебно-методическое пособие (УМП) «Методические указания для выполнения курсовой работы по теме «Моделирование объектов машиностроения в среде КОМПАС-3D».

Материал, изложенный в УМП, соответствует рабочей программе дисциплины и распределен в соответствии с разделами курса.

Три первых раздела УМП посвящены общим вопросам разработки курсовой работы и знакомят с особенностями системы автоматизированного проектирования «КОМПАС 3D», четвертый раздел построению 3D-моделей деталей, пятый формированию трехмерной модели сборочного узла, шестой и седьмой соответственно созданию ассоциативного сборочного чертежа и спецификации.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 3, позволяющую наглядно представить процесс реализации проектной деятельности с применением современных систем автоматизированного проектирования.

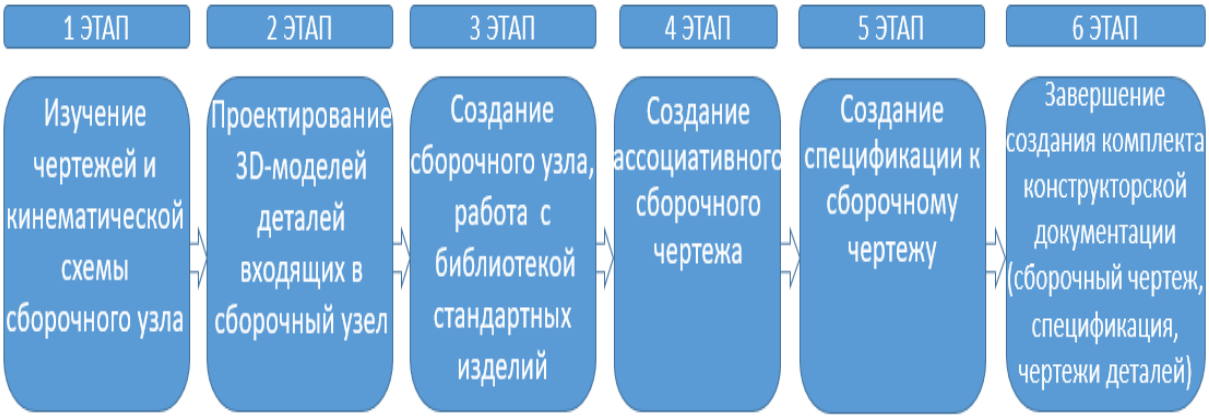


Рис. 3. Реализация проектной деятельность с применением САПР

Студенты, выполняя курсовую работу, видят на примере, как поэтапно осуществляется проектирование от чертежа до готовой 3D-модели. Обучающимся предоставляется возможность ознакомиться с программным обеспечением для автоматизированного проектирования, чтобы в дальнейшем уметь создавать цифровые модели объектов. Основные принципы работы получения 3D-моделей деталей и сборочных узлов студенты изучают при проектировании в среде КОМПАС-3D, для этого организованы специальные учебные классы и лаборатория «Цифрового моделирования».

Организованный таким образом учебный процесс и разработанное УМП позволяет формировать ЗУН для дальнейшей ИИД.

Изучив возможности системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, чертежи деталей и кинематическую схему узла [14], студенты создают 3D-модели деталей, входящих в сборочный узел (рис.4, а).

Далее, согласно кинематической схеме, учащиеся собирают получившиеся модели в сборочный узел, добавляя стандартные крепежные изделия с помощью средств библиотеки (рис. 4, б).

а) *б)*

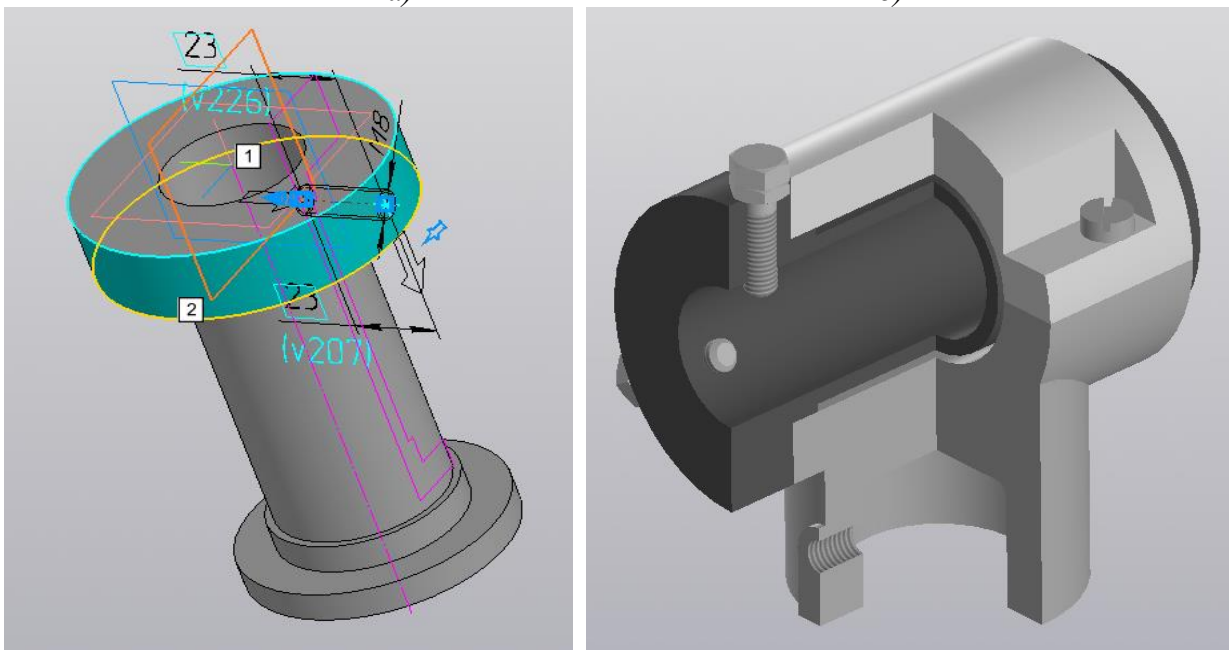


Рис. 4. Этапы 3D-моделирования: *а*) готовая деталь; *б*) сборочный узел

Используя возможности программы, создаются ассоциативный сборочный чертеж из готовой 3D-модели сборочного узла (рис. 5) и спецификация к нему.

Таким образом, в ходе выполнения курсовой работы происходит алгоритмизированный последовательный процесс разработки деталей и сборочного узла от рабочих чертежей и кинематической схемы до готовой сборочной единицы и комплекта конструкторских документов (сборочный чертеж, спецификация, чертежи деталей, входящих в сборочный узел), что позволяет сформировать необходимые компоненты КИИД [16, 17]. Методическое сопровождение этого проектирования представляет собой методику реализации курсовой работы по указанной дисциплине.

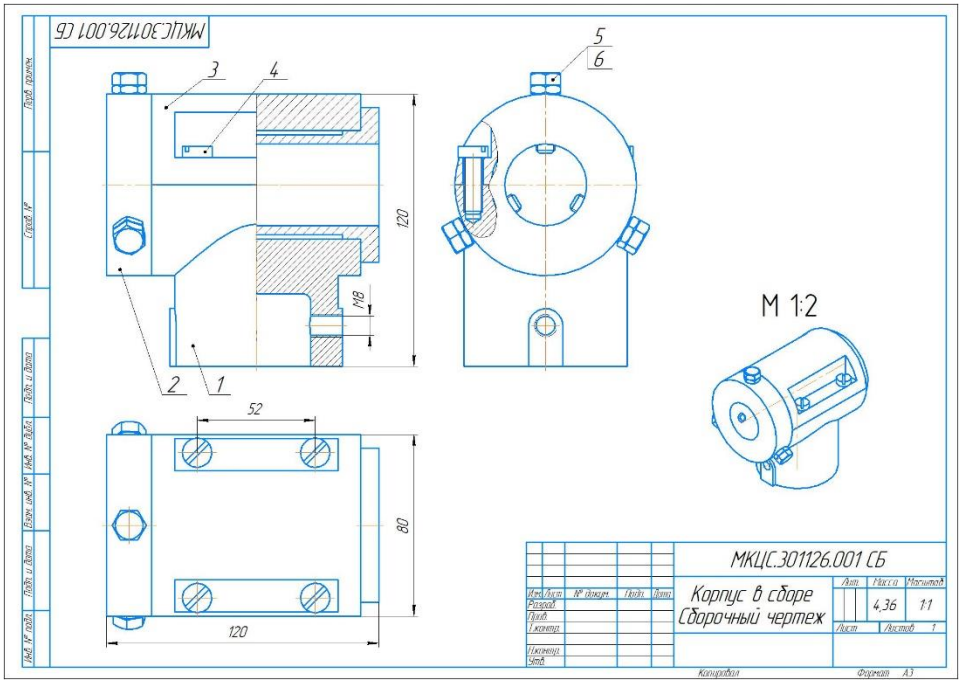


Рис. 5. Ассоциативный сборочный чертеж

Заключение

Подготовка высококвалифицированных кадров для отраслей экономики, особенно машиностроения является ресурсоёмкой задачей, для решения которой целесообразно формировать инновационную компетенцию обучающихся в части проектного компонента.

Организация образовательного процесса у студентов инженерных направлений подготовки, основанного на принципах деятельностного подхода, реализуемых через курсового проектирование в среде КОМПАС-3D, выступает эффективным средством для формирования и развития компетентности инновационной инженерной деятельности и позволяет повысит уровень готовности будущих инженеров к ИИД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ray Y. Zhong a, Xun Xua, Eberhard Klotz b, Stephen T. Newmanc. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. Engineering. 2017. Volume 3, Issue 5, October 2017, Pages 616-630.

[2] Liu, Y., & Xu, X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017. Volume 139. March 2017

[3] Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from

small and medium-sized manufacturers. Production Planning&Control, 2020. Volume 139 (10) Pages 811–828.
[4] ГОСТ Р 59799-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0)" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 25.10.2021 N 1301-ст)
[5] Вишнякова И. В. Организационно-педагогические условия становления компетентности инженера в области менеджмента интеллектуальной собственности // Высшее образование сегодня. 2010. № 10, С. 27–29.
[6] Пикалова А. А., Шершнева В. А. Сущность и содержание проектной компетентности как предмет педагогического анализа // Мир науки. Педагогика и психология. 2019. Т. 7, № 6.
[7] Наумкин Н. И., Глушко Д. Е., Купряшкин В. Ф., Абушаева З. Х. Создание проектно-деятельностной образовательной среды для инновационной подготовки будущих инженеров / Н. И. Наумкин [и др.] // Интеграция образования. 2024. Т. 28, № 2. С. 172–192.
[8] Наумкин Н. И., Грошева Е.П., Шекшаева Н.И., Купряшкин В.Ф. Структуризация компетентности в инновационной инженерной деятельности и интеграция ее компонентов // ИТС. 2014. №3 (76).
[9] Gorshkova O. O. Individualized Research Training of Engineering Students // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, no. 12. P. 71–82.
[10] Наумкин Н. И. Теория и методика обучения инновационной инженерной деятельности : учебник / Н. И. Наумкин, Н. Н. Шекшаева; под редакцией Н. И. Наумкина. — Саранск : МГУ им. Н.П. Огарева, 2020. — 296 с.
[11] Наумкин Н.И., Шекшаева Н.Н., Забродина Е.В. Обучение инновационной инженерной деятельности в состязательной образовательной среде. Образование и наука. 2021;23(5):64-98.
[12] Педагогика и психология: актуальные проблемы и перспективы исследований на современном этапе / [И.Н. Байбародских, Е.Л. Беляк, Н.Н. Давыдова и др.]; Под ред. Ю.Д. Овчинникова, Р.К. Серёжниковой –Самара: ООО «Офорт», 2016 – 196 с.
[13] Применение систем моделирования при формировании инженерных компетенций в области цифрового производства. / К.В. Абрамян [и др.] // Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 8. С. 3-14.
[14] Зелёный П. В. Инженерная графика. Практикум по чертежам сборочных единиц: учеб. пособие / П. В. Зелёный, Е. И. Белякова, О. Н. Кучура; под ред. П.В. Зелёного. – Минск : БНТУ, 2013. – 101 с.

[15] Fleith D. D. S., Soriano de Alencar E. M. L. Sharing Strategies and Activities that Enhance Creativity in the Educational Environment // International Symposium on Project Approaches in Engineering Education. 2018.Vol. 8. P. 23–25.
[16] Stolbova I. D., Gitman Y., Ovchinnikov A. A. Integration of Content and Technologies of Teaching with in Framework of Geometrical-Graphic Training of Students // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.2018. Vol. 451. Articleno. 012117.
[17] EllinasC., Nicolaides C., Masuda N. Mitigation Strategies Against Cascading Failures within a Project Activity Network // Journal of Computational Social Science. 2022. Vol. 5. P. 383–400.

I.V. Rezepova, S.P. Suldin, N.I. Naumkin

FORMATION OF THE DESIGN COMPONENT OF INNOVATIVE COMPETENCE IN FUTURE ENGINEERS WHEN LEARNING IN THE COMPAS-3D ENVIRONMENT

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«National Research Ogarev Mordovia State University», Russia

Abstract

The article updates the rationale for the need to prepare students of higher educational institutions for innovative engineering, specifies its understanding, and provides the structure of competence in innovation. The process of forming the design component of such competence is considered when performing course design in the discipline "CAD systems", using modern computer-aided design methods in the COMPASS-3D environment. To illustrate the approach to solving this problem, an algorithmized example of modeling in a computer-aided design environment is considered as a means of improving the effectiveness of students' preparation for innovative engineering activities.

Key words: innovative engineering, competence, design competencies, activity-based approach, 3D model, course design, COMPAS-3D.

REFERENCES

[1] Ray Y. Zhong a, Xun Xua, Eberhard Klotz b, Stephen T. Newmanc. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. Engineering. 2017. Volume 3, Issue 5, October 2017, Pages 616-630.

[2] Liu, Y., & Xu, X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017. Volume 139. March 2017.
[3] Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. Production Planning&Control, 2020. Volume 139 (10) Pages 811–828.
[4] GOST R 59799-2021. The national standard of the Russian Federation. Smart manufacturing. Reference architecture model industry 4.0 (RAMI 4.0) " (approved and put into effect by Rosstandart Order No. 1301-st dated 10/25/2021).
[5] Vishnyakova I. V. Organizational and pedagogical conditions for the formation of an engineer's competence in the field of intellectual property management // Higher education today. 2010. No. 10, pp. 27-29.
[6] Pikalova A. A., Shershneva V. A. The essence and content of project competence as a subject of pedagogical analysis // The world of science. Pedagogy and psychology. 2019. Vol. 7, No. 6.
[7] Naumkin N. I., Glushko D. E., Kupryashkin V. F., Abushaeva Z. H. Creation of a design-activity educational environment for innovative training of future engineers / N. I. Naumkin [et al.] // Integration of education. 2024. Vol. 28, No. 2. pp. 172-192.
[8] Naumkin N. I., Grosheva E.P., Shekshaeva N.I., Kupryashkin V.F. Structuring competence in innovative engineering and integration of its components // ITS. 2014. No. 3 (76).
[9] Gorshkova O. O. Individualized Research Training of Engineering Students // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, no. 12. P. 71–82.
[10] Naumkin N. I. Theory and methodology of teaching innovative engineering : textbook / N. I. Naumkin, N. N. Shekshayeva ; edited by N. I. Naumkin. Saransk : Ogarev Mordovia State University, 2020— 296 p.
[11] Naumkin N.I., Shekshayeva N.N., Zabrodina E.V. Teaching innovative engineering in a competitive educational environment. Education and science. 2021;23(5):64-98.
[12] Pedagogy and psychology: actual problems and prospects of research at the present stage / [I.N. Baibarodskikh, E.L. Belyak, N.N. Davydova, etc.]; Edited by Yu. D. Ovchinnikov, R.K. Serezhnikova –Samara: Ofort LLC, 2016 – 196 p.
[13] Application of modeling systems in the formation of engineering competencies in the field of digital production. / K.V. Abrahamyan [and others] // Modern mechanical engineering. Science and education. 2019. No. 8. pp. 3-14.

[14] Zeleny P. V. Engineering graphics. Workshop on assembly unit drawings: textbook. manual / P. V. Zeleny, E. I. Belyakova, O. N. Kuchura; edited by P.V. Zeleny. Minsk : BNTU Publ., 2013. 101 p.
[15] Fleith D. D. S., Soriano de Alencar E. M. L. Sharing Strategies and Activities that Enhance Creativity in the Educational Environment // International Symposium on Project Approaches in Engineering Education. 2018.Vol. 8. P. 23–25.
[16] Stolbova I. D., Gitman Y., Ovchinnikov A. A. Integration of Content and Technologies of Teaching within Framework of Geometrical-Graphic Training of Students // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. Article no. 012117.
[17] EllinasC., Nicolaides C., Masuda N. Mitigation Strategies Against Cascading Failures within a Project Activity Network // Journal of Computational Social Science. 2022. Vol. 5. P. 383–400

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.147
doi:10.18720/SPBPU/2/id-101

Д.С. Ситкин[1], А.Ю. Скрябнев[2]

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДИСЦИПЛИН



[1]Дмитрий Сергеевич Ситкин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)419-9260, E-mail: sitkin_ds@spbstu.ru



[2]Артём Юрьевич Скрябнев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)017-5412, E-mail: skryabnev_ayu@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассмотрены новые подходы и решения, принятые в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого по организации преподавания дисциплин в сфере информационных технологий на первом курсе. Представлен обзор ранее принятых решений в этой области, дана их оценка по прошествии времени. Представлены предложения по дальнейшему развитию методик преподавания информационных технологий на младших курсах.

Ключевые слова: основы цифровых технологий, информатика, онлайн-обучение, цифровые компетенции.

Введение

Несколько лет назад в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ) был принят ряд решений по унификации преподавания информационных технологий на всех направлениях подготовки бакалавриата и в специалитете. Это было связано с большой разностью в подходах к обучению информатике в разных

институтах и высших школах, а также с задачами по цифровизации экономики, поставленными высшим руководством страны.

Первым шагом в реализации обозначенных выше задач стало введение на первом и втором курсах в учебные планы по всем направлениям подготовки бакалавриата (специалитета) четырёх цифровых дисциплин вместо информатики:

– «Цифровая грамотность»;
– «Цифровой практикум»;
– «Цифровая культура»;
– «Технологии цифровой промышленности».

Первые три дисциплины закреплены за институтами, последняя – преподаётся централизованно в виде онлайн-курса Институтом передовых производственных технологий. «Цифровая грамотность» с первого года реализации имела одинаковое содержание для студентов всех направлений по всем видам занятий. Основной частью предмета является одноимённый онлайн-курс, расположенный на портале «Открытое образование» (рис. 1).

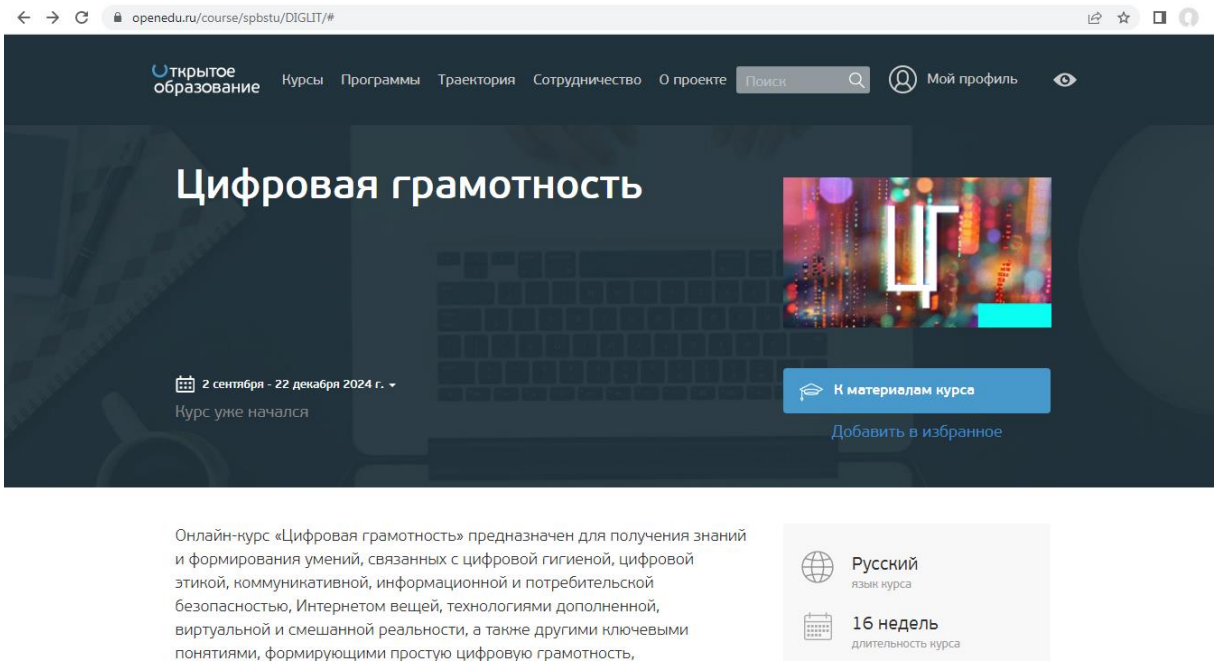


Рис. 1. Титульная страница онлайн-курса «Цифровая грамотность»

«Цифровой практикум» состоял только из практических занятий, содержание которых определялось институтами, скорее даже высшими школами. Впоследствии руководством университета было принято решение унифицировать содержание и этой дисциплины, как и третьей – «Цифровая культура», основной частью которой выступает унифицированный онлайн-курс, также расположенный на площадке «Открытое образование» (рис. 2).

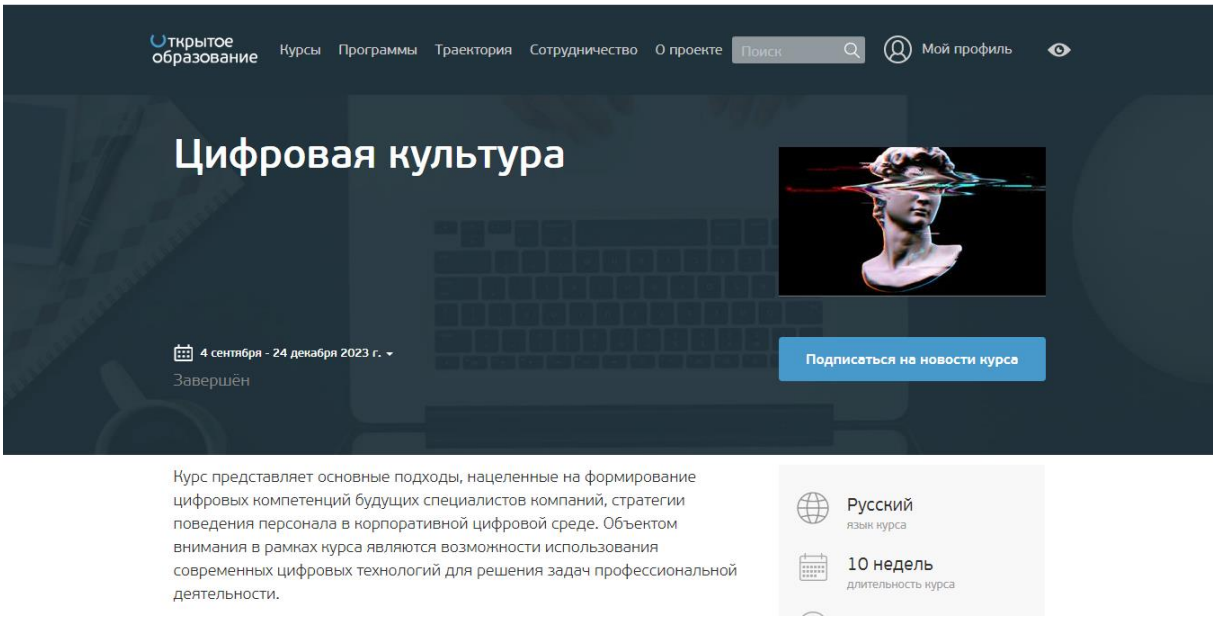


Рис. 2. Титульная страница онлайн-курса «Цифровая культура»

Дополнительно к четырём цифровым дисциплинам был разработан факультатив в виде онлайн-курса «Базовая информатика», не входящий в обязательную программу. Его назначение – ликвидировать разницу в уровнях знаний студентов-первокурсников и школьной программы по информатике, путём проведения входного тестирования в течение первого месяца обучения. По его результатам неуспешно прошедшие тестирование студенты автоматически подписывались на онлайн-курс по базовой информатике.

Методы

Таким образом с течением времени все цифровые дисциплины на младших курсах были унифицированы для всех направлений подготовки бакалавриата (специальностей). Данное обстоятельство представляется избыточным с учётом широкого спектра направлений подготовки, по которым обучаются студенты в университете: от гуманитарных и экономических до инженерно-технологических и физико-математических. Более того, дисциплина «Цифровая культура» разрабатывалась в Институте промышленного менеджмента экономики и торговли и имеет в содержании соответствующий экономический уклон. Онлайн-курс «Базовая информатика» является факультативом, его изучение необязательно и не контролируется преподавателями, что не способствует подтягиванию своих знаний неуспевающими студентами.

Для решения описанных проблем было принято решение пересмотреть набор и содержание цифровых дисциплин на основе полученного опыта в процессе их реализации и анализа замечаний. Также

приказом по университету была создана Рабочая группа, в которую были включены представители-преподаватели всех институтов университета. Главной задачей была поставлена разработка рабочих программ дисциплин для новых курсов в сфере информационных технологий, закреплённых за институтами.

Результаты

Относительно дисциплин, преподавание которых закреплено за самими институтами, были приняты несколько решений. Одно из них – дисциплине «Цифровая грамотность» дать название «Основы цифровых технологий», как более полно отражающего её наполнение. Её содержание немного скорректировано с сохранением трудоёмкости и распределения по видам учебных занятий (очные и электронные лекции, очная практика) и вида промежуточной аттестации – зачёта (таблица 1). В качестве основы сохранится онлайн-курс, обязательный для проходения. Данная дисциплина останется унифицированной для всех направлений подготовки, входит в «Ядро Политеха» и будет, как и раньше, изучаться в первом семестре.

Таблица 1. Распределение по видам занятий дисциплины «Цифровая грамотность»

Семестр	Очные лекции	Электронные лекции	Очные практики	Электронные практики	Форма контроля	Трудоёмкость
	часы					з. е.
1	8	30	16	0	зачёт	2

Другим решением стала замена дисциплин «Цифровой практикум» и «Цифровая культура» на один курс, с разными названиями и трудоёмкостью для разных институтов в зависимости от полигруппы, в которую входит институт (таблица 2). Содержание соответствующих дисциплин и разработка рабочих программ по ним была поручена Рабочим группам, созданным в качестве подгрупп из Рабочей группы, представленной всеми институтами для разработки курса «Основы цифровых технологий». Каждая дисциплина будет сопровождаться своим онлайн-курсом, разработка которых ведётся в настоящее время во всех полигруппах.

Для придания гибкости рабочим программам дисциплин уже внутри полигрупп исключены конкретные названия как системного, так и прикладного программного обеспечения, используемого в учебном процессе, указаны только их классы. То же касается и языков программирования, т.к. разные высшие школы предпочли разные языки даже внутри одного института.

Таблица 2. Распределение цифровых дисциплин по полигруппам

Полигруппа	Название дисциплины	Семестр	Очные лекции	Электр. лекции	Практ. занятия	Лаб. раб.	Форма контроля	Трудоёмкость
			часы					з. е.
Физико-математическая	Информатика	1	30	8	30	0	экзамен	3
		2	30	8	30	0	экзамен	3
Инженерно-технологическая	Информатика	2	30	16	45	0	экзамен	4
Информационно-компьютерная	Алгоритмизация и программирование	1	30	16	0	45	экзамен	4
Торгово-экономическая, гуманитарная	Цифровые средства обработки данных	2	16	30	30	0	экзамен	4

Обсуждение

Общая трудоёмкость и распределение нагрузки по дисциплинам «Информатика», «Алгоритмизация и программирование» и «Цифровые средства обработки данных» по семестрам и видам учебных занятий теперь вариативна и зависит от полигруппы. Это в большей степени соответствует специфике направлений подготовки, входящих в неё, по сравнению с предыдущим вариантом, когда перечень тем был одинаков для всех, и допускалась только вариация времени изучения по темам. Сами же дисциплины перемещены из «Ядра Политеха» в «Ядро Полигруппы».

Важным обстоятельством представляется возвращение лекционных занятий в программы курсов в достаточно большом объёме. Информатика часто представляется только практической дисциплиной, однако, на самом деле, теоретическая составляющая в этом предмете столь же значима, как и практика. Без неё многие моменты остаются не рассмотренными, оставляя вопросы у обучающихся на практических занятиях.

Материалы факультативного онлайн-курса «Базовая информатика» предлагается использовать непосредственно на обязательных занятиях по цифровым дисциплинам. Это повысит контроль со стороны преподавателя за изучением его тем неуспевающими студентами, имеющими недостаточный уровень знаний по школьной программе.

Заключение

Образовательные траектории при подготовке специалистов постоянно трансформируются, особенно в цифровой их части, т.к. она наиболее быстро меняется. Большие изменения в области преподавания информационных

технологий были внедрены в СПбПУ несколько лет назад. Получив определённый опыт после их реализации в учебном процессе с течением времени возникли различные замечания. Описанные в статье решения призваны их устранить. Изучаемый материал разделён на две части: общую – одинаковую для всех направлений подготовки, реализуемую в дисциплине «Основы цифровых технологий»; вариативную – унифицированную в рамках полигруппы, реализуемую в дисциплинах «Информатика», «Алгоритмизация и программирование» или «Цифровые средства обработки данных». Авторам представляется, что с учётом большого спектра направлений подготовки внутри одной полигруппы, вариативность может быть распространена и дальше по направлениям подготовки внутри институтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ситкин Д.С. Новые решения в обучении цифровым технологиям. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 80–92.

[2] Солодилова Н.А., Петраш В. И. Роль компьютерных технологий в формировании профессиональных компетенций студентов машиностроительных специальностей. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 93–107.

[3] Лагунова М.В., Иванова Л.А., Ежова Н.В. Смешанный формат обучения высшей математике в век цифровизации образования. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 45–59.

[4] Ситкин Д.С., Скрябнев А.Ю. Актуальность теоретической составляющей при обучении информационным технологиям. Современное образование: Традиции и инновации. 2023. С. 152–156.

[5] Солодилова Н.А. Новые технологии проектирования в рамках дисциплины «САПР в машиностроении» // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXIII Междунар. науч.-практич. конф. Ч. 3. – СПб.: Изд-во Политех-Пресс, 2019. – С. 391–397.

[6] Lagunova, M., Ivanova, L., Ezhova, N. Organization of remote education for higher mathematics. Challenges and solutions. Advances in Mechanical Engineering. Springer. 2020 – pp.1–9.

[7] Sitkin, D., Solodilova, N., Shabalin, D., Kozar, I. New Approaches to the Formation of Digital Competencies of Specialists in the Machinery and Transport Industries. Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, volume 575), XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. Springer. 2022. pp. 2523–2532.

[8] Owen, S., Davies, S. Maintaining an empowered school community: Introducing digital technologies by building digital literacies at Beehive Montessori School. London Review of Education 18 (3). 2020. pp. 356–372.
[9] Akhmetshin, E., Vasilev, V., Kozachek, A., Meshkova, G., Alexandrova, T. Analysis of Peculiarities of Using Digital Technologies in the University Professional Training Content. International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET) 16 (20). 2021. pp. 101–118.
[10] Mourtzis, D., Papakostas, N., Mavrikios, D., Makris, S., Alexopoulos, K. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 28(1). 2015. pp. 3–24.
[11] Sailer, M., Murböck, J., Fischer, F. Digital learning in schools: What does it take beyond digital technology? Teaching and Teacher Education 103. 2021.
[12] Rentzos, L., Mavrikios D., Chryssolouris, G. A two-way knowledge interaction in manufacturing education: the teaching factory. Procedia CIRP, 2015. Vol. 32. pp. 31–35.
[13] Naidu, S. The MOOC is dead – long live MOOC 2.0! // Distance Education. Vol. 4. 2020 – Issue 1, pp. 1–5.
[14] Moorhouse, B. L. Adaptions to a face-to-fase initial teacher education course 'forced' online due to the COVID 19 pandemic. //Journal of Education for Teaching, 2020.
[15] Gorshkova, O. O. Individualized research training of engineering students. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018. Vol. 9. No. 12. pp. 71–82.

D.S. Sitkin, A.Yu. Skriabnev

THE TRANSFORMATION OF DIGITAL TEACHING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers new approaches and solutions adopted at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University for the organization of teaching disciplines in the field of information technology in the first year. An overview of previously adopted decisions in this area is presented, and their assessment over time is given. Proposals for further development of information technology teaching methods in junior courses are presented.

Key words: fundamentals of digital technologies, computer science, online learning, digital competencies.

REFERENCES

[1] Sitkin, D. New solutions in digital technologies learning. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 80–92. (rus).

[2] Solodilova, N., Petrash, V. The role of computer technology in formation of professional competencies of students of mechanical engineering specialties. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 93–107. (rus).

[3] Lagunova, M., Ivanova, L., Ezhova, N. Blended learning of higher mathematics in the century of the digitalization of education. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 45–59. (rus).

[4] Sitkin, D., Skriabnev, A. The relevance of the theoretical component in information technology education. Modern education: traditions and innovations. 2023. pp. 152–156. (rus).

[5] Solodilova, N. New technologies of design within the framework of the discipline "CAD in mechanical engineering" // System analysis in design and management: Collection of scientific papers of the XXIII International Scientific and Practical Conference Part 3. – St. Petersburg: Publishing House Polytech-Press, 2019. pp. 391–397. (rus)

[6] Lagunova, M., Ivanova, L., Ezhova, N. Organization of remote education for higher mathematics. Challenges and solutions. Advances in Mechanical Engineering. Springer. 2020 – pp.1–9.

[7] Sitkin, D., Solodilova, N., Shabalin, D., Kozar, I. New Approaches to the Formation of Digital Competencies of Specialists in the Machinery and Transport Industries. Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, volume 575), XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. Springer. 2022. pp. 2523–2532.

[8] Owen, S., Davies, S. Maintaining an empowered school community: Introducing digital technologies by building digital literacies at Beehive Montessori School. London Review of Education 18 (3). 2020. pp. 356–372.

[9] Akhmetshin, E., Vasilev, V., Kozachek, A., Meshkova, G., Alexandrova, T. Analysis of Peculiarities of Using Digital Technologies in the University Professional Training Content. International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET) 16 (20). 2021. pp. 101–118.

[10] Mourtzis, D., Papakostas, N., Mavrikios, D., Makris, S., Alexopoulos, K. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 28(1). 2015. pp. 3–24.

[11] Sailer, M., Murböck, J., Fischer, F. Digital learning in schools: What does it take beyond digital technology? Teaching and Teacher Education 103. 2021.

[12] Rentzos, L., Mavrikios D., Chryssolouris, G. A two-way knowledge interaction in manufacturing education: the teaching factory. Procedia CIRP, 2015. Vol. 32. pp. 31–35.
[13] Naidu, S. The MOOC is dead – long live MOOC 2.0! // Distance Education. Vol. 4. 2020 – Issue 1, pp. 1–5.
[14] Moorhouse, B. Adaptions to a face-to-fase initial teacher education course 'forced' online due to the COVID 19 pandemic. //Journal of Education for Teaching, 2020.
[15] Gorshkova, O. Individualized research training of engineering students.// International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018. Vol. 9. No. 12. pp. 71–82.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.146
doi:10.18720/SPBPU/2/id-102

В.Г. Теплухин

ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ЗНАНИЙ ПО КУРСУ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»



Василий Гельевич Теплухин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)314-6237, E-mail: cornfield@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрена система обучения студентов машиностроительных специальностей по курсу материаловедение, использующая оценку знаний, основанную на текущем контроле освоения материала лекций и лабораторных работ, подтверждаемую на устном собеседовании при прохождении промежуточной аттестации. Система использовалась и корректировалась в течение пяти лет. Результаты показывают хорошую корреляцию оценок обучения в семестре и итоговой оценки. Вместе с тем очевидно устранение ошибочных результатов, сформированных по итогам семестра. Важным итогом следует считать возможность относительной формализации выставляемой оценки.

Ключевые слова: материаловедение, тесты, портфолио, устное собеседование, критерии оценки, лабораторные работы, структура курса.

Введение

В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого обучение материаловедению ведется по-разному для студентов металлургических специальностей, которые в своей последующей профессиональной деятельности непрерывно связаны с разработкой, исследованием, получением и преобразованием материалов, и студентов других специальностей, для которых материаловедение является базовой

общеинженерной дисциплиной, такой же, как сопротивление материалов или инженерная графика [1, 2]. Если большой объем информации из данной области будет практически ежедневно востребован, а поэтому сохраняться и обновляться в мозгу металлурга, то для выпускников других специальностей объем запоминаемой информации по материаловедению должен быть минимизирован при обеспечении устойчивого сохранения этой информации. При этом должен быть сформирован навык ее использования, то есть понимание.

Такой курс был успешно разработан и реализовывался на кафедре «Металловедение», позже «Материаловедение» под руководством профессоров Т.А. Лебедева и А.М. Паршина. Однако значительные изменения технического уклада, общественной жизни и сознания привели к радикальному изменению баланса компетенций в подготовке инженеров [3].

Каждый из проходящих вдоль фасада главного здания Санкт-Петербургского политехнического обязательно видит текст изречения А. Эйнштейна «Целью школы всегда должно быть воспитание гармоничной личности, а не специалиста». Направления подготовки политехников изменились (рис.1).

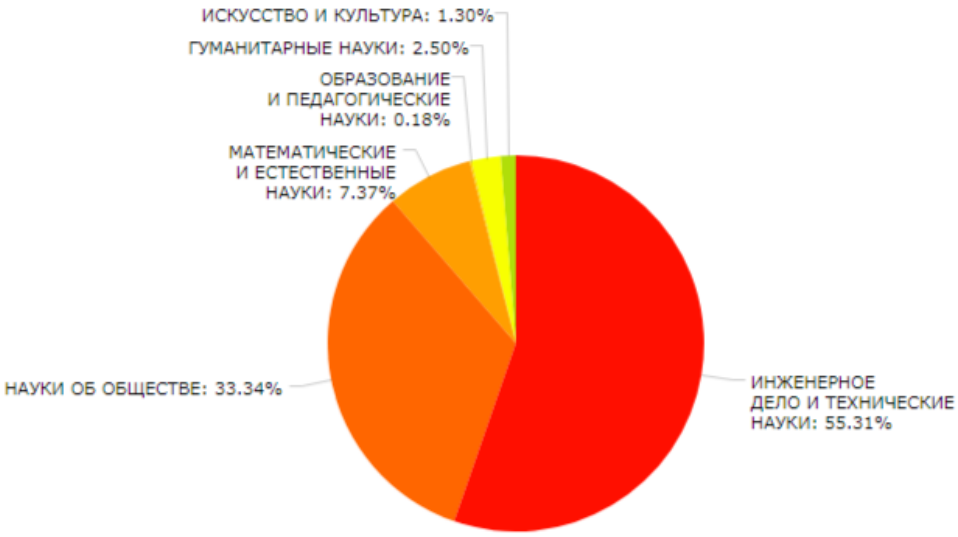


Рис. 1. Основные направления обучения в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

Объективно изменилось и место материаловедения в учебных планах. Несмотря на продиктованное техническим прогрессом включение в курс дополнительной информации о неметаллических и композиционных материалах вдвое сократился объем лабораторных работ. Возросшая нагрузка на обучающихся во время сессии по другим дисциплинам привела

к исключению из контрольных результатов зачета по лабораторным работам. Таким образом, лабораторные работы по материаловедению стали практически факультативными. Неравномерность нагрузки по дисциплине с концентрацией в одном семестре студентов двух институтов ИММиТ и ИЭиТ (21 группа в зимнюю сессию в 2023/2024 и 2024/2025 учебных годах) потребовала интенсификации процесса проведения промежуточной аттестации.

Чтобы сохранить эффективность изучения материаловедения, как неотъемлемого элемента общепрофессиональной инженерной культуры [4], необходимы изменения в технологии преподавания.

Существенную роль в пересмотре подхода к промежуточной аттестации студентов по всем дисциплинам и во всех вузах сыграли ограничения во время эпидемии ковида [5].

Именно пандемия стала причиной прохождения всех курсов, в том числе материаловедения, с использованием внутриуниверситетской системы дистанционного обучения на платформе Moodle [6]. Кроме стремительного внедрения дистанционных и интерактивных методов обучения, основанных на компетентностно-деятельностном подходе [7-9], возникла необходимость совершенствования непрерывного текущего контроля за освоением материала дисциплин учащимися.

В Санкт-Петербургском политехническом университете преподавателям было предложено выбрать одну из форм промежуточной аттестации: портфолио, тест или устное собеседование. Каждая из этих форм имеет свои преимущества и недостатки [10-14].

Тестирование является наиболее быстрым способом проверки знаний обучающихся, который позволяет контролировать курс в полном объеме, исключая «ложноположительные» или «ложноотрицательные» результаты за счет знания или незнания отдельных разделов. Творчески подготовленные тестовые задания закрытого и открытого типа с рейтинговыми коэффициентами вопросов разной степени значимости могут частично или полностью предотвратить беспорядочное заучивание тестируемыми правильных ответов. Во избежание распространения бессмысленных шаблонов правильных ответов (ключей) тестовые задания должны регулярно обновляться даже в течение одной сессии.

Опыт показал, что студенты, проходящие тестирование в конце сессии, получают значительно более высокие оценки, чем те, которые проходили промежуточную аттестацию в начале.

Такой подход не может быть реализован в случае обучения больших потоков студенческих групп, потому что массовая подготовка высококачественных тестов не возможна.

Составление портфолио позволяет оценивать освоение дисциплины по результатам разнонаправленных, в том числе практически-

ориентированных задач. Но проблемой становится неизбежность массового заимствования при сколь-нибудь значимом количестве обучаемых. И основным недостатком использования портфолио как исключительной формы оценки достижений студента является отсутствие необходимости подготовки к промежуточной аттестации в виде теста или, особенно, устного собеседования. Такая подготовка представляет собой очень важный этап в изучении любой дисциплины.

Удивительно, но главным достоинством устного собеседования становится его субъективность. Преподаватель имеет возможность оценить сильные и слабые стороны ответа обучаемого и построить собеседование так, чтобы, с одной стороны, проверить уровень знаний, а с другой, помочь студенту разобраться в некоторых аспектах дисциплины. Студент должен не просто воспроизводить правильные ответы, а рассуждать логически. Главной проблемой классического устного собеседования является его колоссальная трудоемкость и продолжительность. Бесполезно и, в итоге, не справедливо пытаться тотально контролировать использование телефонов, конспектов и других заранее подготовленных материалов. При отсутствии контроля, большая часть тезисов ответов на вопросы представляет собой многостраничный неразборчивый текст без рисунков и формул, который требует длительной расшифровки и обсуждения или, наоборот, должен быть проигнорирован преподавателем.

Выходом из сложившейся ситуации представляется комплексное использование различных форм оценки уровня освоения дисциплины обучающимися [15-17]. В качестве критерия адекватности применяемого комплекса оценки предлагается рассматривать корреляцию семестровых рейтингов студентов и оценки их промежуточной аттестации [18-19].

Целью настоящей работы является представление комплексной системы оценки знаний студентов по курсу «Материаловедение», вынужденно разработанной в условиях дистанционного обучения во время пандемии и применяемой по настоящее время, оценка и обсуждение эффективности системы.

Методы

Принципиально предлагаемая система не является революционным нововведением. Однако имеется ряд конкретных особенностей в постановке вопроса и предлагаемых решениях.

Частными задачами в соответствии с конкретным учебным процессом являются:

1. Сохранение роли лабораторных работ, как части курса «Материаловедение».

2. Повышение производительности и эффективности проведения промежуточной аттестации.
3. Разработка понятных и одинаковых для всех правил определения оценки при промежуточной аттестации.
4. Стимулирование работы студентов на протяжении всего семестра.

Обучение и аттестация иностранных студентов [20] также имеет свои особенности. Поэтому в предлагаемой системе проведения промежуточной аттестации это учтено.

В течение семестра формируется рейтинговая (стартовая) оценка, основанная на результатах двух контрольных работ и практического домашнего задания, включенных в курс лабораторных занятий, а также трех тестов по теоретическому материалу, излагаемому на лекциях. В результате на основании шести оценок рассчитывается средняя оценка, характеризующая работу студента в течение семестра (рис.2).

3331502/30001

№ п/п	ФИО	к/р1	к/р2	Д/З	Долги по л/р	Тест1	Тест2	Тест3	Тест4	Среднее	Штраф лекции	Старт
1	Анцеловский А.А.	4,5	4	5	нет	4	5	4		4,42	0,2	**4,22**
2	Варелджян А.А.	5	4,5	5	нет	5	5	5		4,92	0	**4,92**
3	Вершигора К.В.	4	4	4	нет	5	5	5		4,50	0	**4,50**
4	Грицай С.С.	5	4	5	нет	5	5	0	0	4,00	0,2	**3,80**
5	Ильин А.В.	4	4	4	нет	5	5	0	5	4,50	0,2	**4,30**
6	Исламов И.К.	4	3,5	4	нет	5	5	5		4,42	0	**4,42**
7	Калиновский Р.	3	3	4	нет	5	5	5		4,17	0	**4,17**
8	Кудрявцев М.Н.	4,5	3,5	4	нет	5	5	5		4,50	0	**4,50**
9	Максименко М.Д.	4	5	5	нет	5	5	3		4,50	0	**4,50**
10	Маршалко С. А.	3	3	0	есть	4	2	0	0	2,00	0,2	**1,80**
11	Морозов В.А.	4	5	4	нет	4	5	0	0	3,67	0,2	**3,47**

Рис. 2. Фрагмент протокола успеваемости в течение семестра.

Добавлена опция, стимулирующая посещение лекций. В результате выборочной проверки стартовый балл обучающихся, пропустивших лекцию снижается на 0,2.

Однако итоговая оценка по курсу определяется при устном собеседовании во время сессии. При устном собеседовании проверяется соответствие компетенций по дисциплине стартовой оценке. Итоговая оценка может совпадать со стартовой, быть выше или ниже на любое количество баллов.

Такой подход исключает как недобросовестное получение рейтинговых результатов студентами (особенно при выполнении тестов), так и позволяет улучшить оценку за счет систематизации и углубления знаний при подготовке к экзамену.

Оценка выполнения всех контрольных задач во время семестра изменяется от 0 до 5 с шагом 1 или 0,5 (на усмотрение преподавателя, ведущего лабораторные работы).

Для тестов, например, разделение следующее:

«0» - тест не выполнялся;

«1» - от 0 до 30% правильных ответов;

«2» - от 30 до 60% правильных ответов;

«3» - от 60 до 75% правильных ответов;

«4» - от 75 до 90% правильных ответов;

«5» - 90% и более правильных ответов.

Каждый из тестов открывается после прочтения лекций по определенным разделам курса на 2 недели. Допускается 2 попытки, результат определяется по лучшей попытке.

Для тех, кто по какой-либо причине не выполнил один из тестов, после последней лекции на трое суток открывается четвертый тест по материалам всего курса при одной попытке.

Такая достаточно лояльная практика тестирования, возможно, дает завышенные результаты рейтинга, но способствует более продолжительному вниманию обучаемых к дисциплине и инициирует обсуждение вопросов материаловедения в среде обучающихся.

В соответствии с информацией, размещенной на сайте курса, для получения положительной оценки студент должен выполнить шесть контрольных заданий. В порядке исключения допускается дополнительный опрос во время устного собеседования по одному из заданий. Ввиду отсутствия репрессивных методов воздействия (к промежуточной аттестации обучающиеся допускаются вне зависимости от работы в семестре) около 20% студентов выходят на промежуточную аттестацию более, чем с одним пробелом. Тем не менее стартовая оценка в этом случае значительно понижена. Практическое домашнее задание (Д/З) по выбору материала для деталей машин и конструкций не возможно выполнить и защитить за время экзамена. Во всяком случае, никому из тех, кто настаивал на аттестации на основании формального допуска, это не удалось.

Устное собеседование проводится следующим образом.

Студенту задаются несколько вопросов (чаще всего три, по трем частям курса). Необходимое количество вопросов и сами вопросы определяются преподавателем. В случае трех правильных ответов стартовая оценка считается подтвержденной. В случае одной ошибки (исключая катастрофические, например, мартенсит объявляется чистым компонентом) возможно понижение оценки на один балл. Очевидно, что без учета семестрового рейтинга, три случайных вопроса не могут дать представления о подготовленности студента. За счет комплексного подхода вполне можно считать такую оценку объективной.

Однако, если даны два неправильных ответа или есть катастрофические ошибки, собеседование должно быть продолжено. Также оно может быть продолжено, если студент считает, что его стартовая оценка

ниже его уровня подготовки или единственная ошибка была случайной. Продолжается собеседование, состоящее из нескольких вопросов, в результате которого производится более глубокая проверка знаний. Поэтому оценка может, как повыситься, так и понизиться.

В случае, если стартовая оценка «2», необходимо сначала подтвердить ее, а затем при дальнейшем собеседовании показать, что по итогам аттестации может быть выставлена и более высокая оценка.

Характер вопросов соответствует специфике тестовых заданий. Они могут быть закрытыми с единственным или несколькими правильными ответами, на построение последовательностей или выявление соответствия, а также открытыми без вариантов ответов. Вопросы не должны требовать значительного времени на подготовку ответа (максимум 1-2 минуты) и иметь однозначный правильный ответ.

Вопросы включают проверку знаний, полученных как на лекциях, так и при выполнении лабораторных работ.

Такой подход позволяет в целом ускорить проведение аттестации, особенно, в случае сильной группы. Удается избежать претензий экзаменуемых в отношении трактовки их ответов и определения итоговой оценки.

Многие иностранные студенты плохо владеют русским языком и также не понимают по-английски. В этом случае приходится делать акцент на вопросы с номерами ответов.

Результаты

В настоящей работе приведена выборка оценок 16 групп учащихся ИММиТ зимой 2024/2025 года, состоящая из 366 результатов.

На рисунке 3 представлено количество стартовых оценок от 0 до 5.

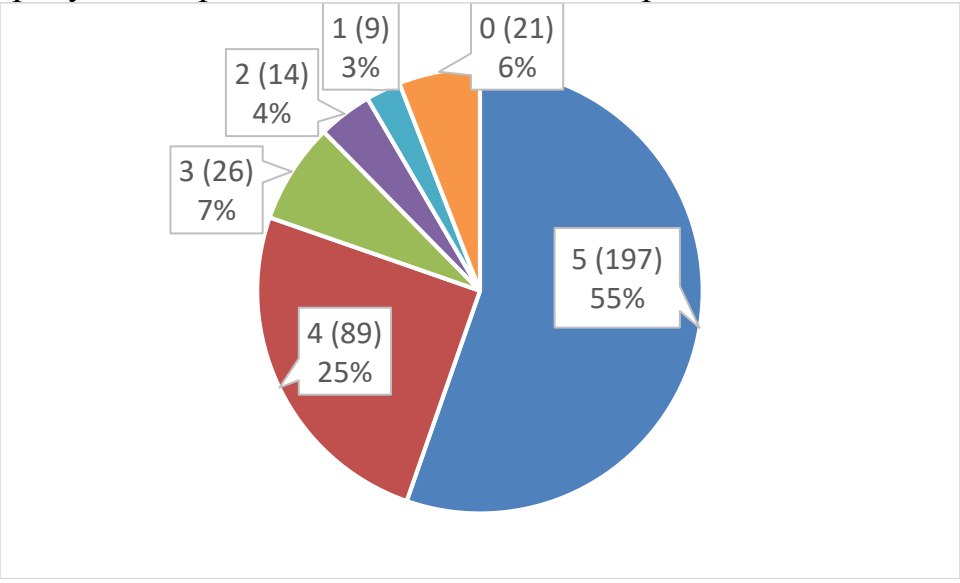


Рис. 3. Структура семестрового рейтинга студентов.

Видно, что больше половины студентов имели стартовую оценку 5. Вероятно, столь высокий семестровый рейтинг, как уже упоминалось, связан как с лояльностью проверки знаний теории по тестам, так и с недостатками тестирования, как формы контроля. Вместе с тем суммарное количество оценок 4 и 5 (80%) следует считать подтверждением выполнения задачи повышения активности студентов в течение семестра.

Оценку ниже 3 показали 44 человека (13%). Это учащиеся, пропустившие все (6%) или большую часть занятий, не выполнявшие контрольных заданий. Рейтинговая оценка 3 (26 человек, 7%) ни в одном из случаев не соответствует выполнению всех шести контрольных заданий.

Структура распределения итоговых оценок по результатам первой (основной) промежуточной аттестации представлена на рисунке 4.

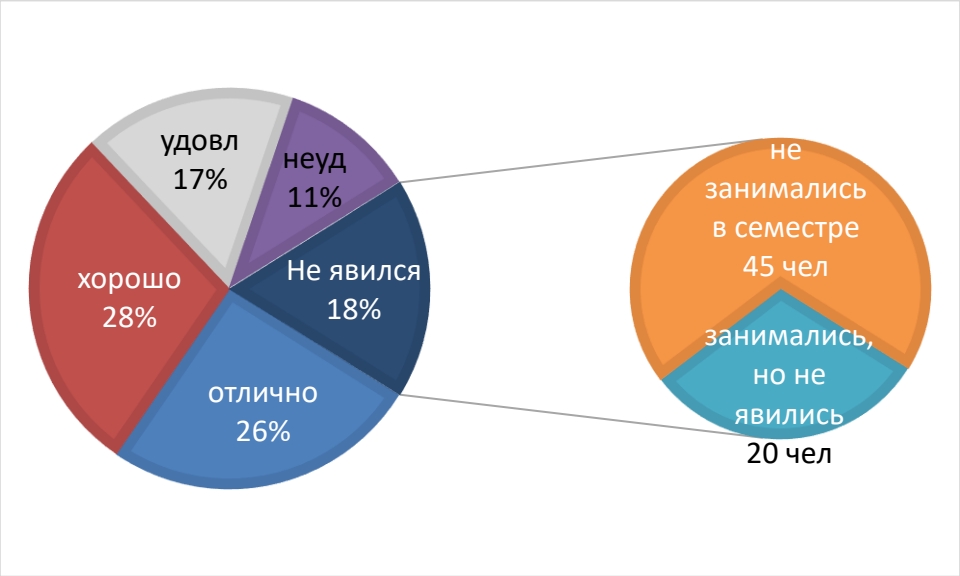


Рис. 4. Структура распределения итоговых оценок.

Обращает на себя внимание тот факт, что подавляющая часть не явившихся на собеседование студентов, в течение семестра так и не приступала к занятиям. Это сильно снижает объективность проведенного исследования. Однако исключить их из рассматриваемой выборки не представляется возможным, так как большинство из них были положительно аттестованы при третьей попытке прохождения аттестации.

Анализ соответствия семестрового рейтинга итоговым результатам промежуточной аттестации представлен на рисунке 5.

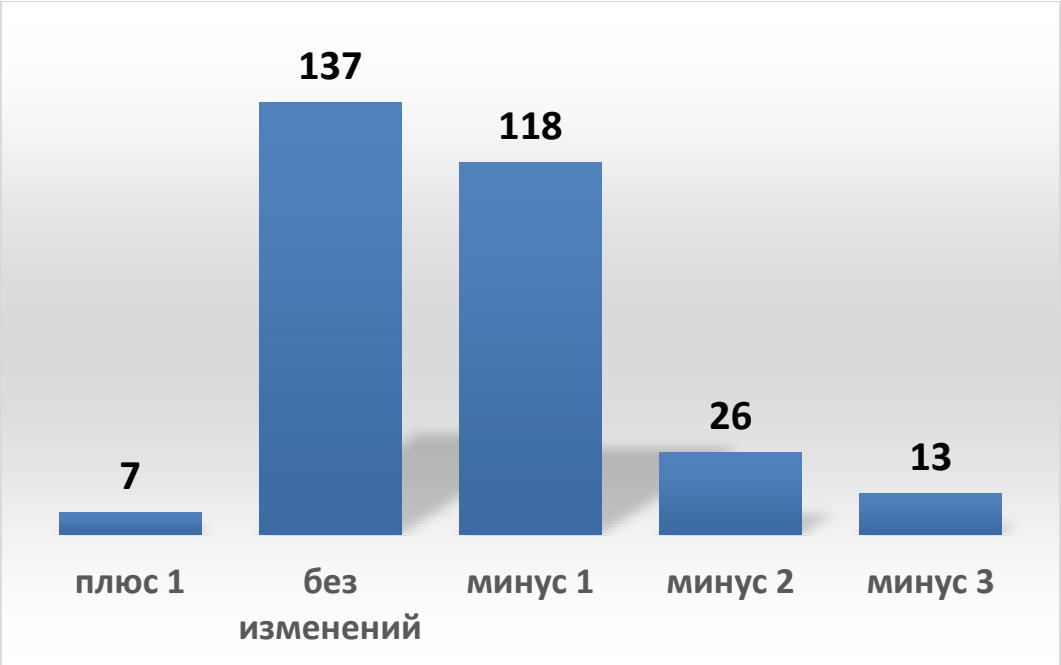


Рис. 3. Структура семестрового рейтинга студентов.

Видно, что в большинстве случаев стартовая оценка совпала с итоговой оценкой промежуточной аттестации. В значительном числе случаев имело место понижение на один балл, что в целом ожидаемо. Заслуживает внимания повышение 7 оценок по результатам устного собеседования.

Значительное снижение оценки отражает количество студентов с недобросовестным рейтингом. В очень небольшом количестве случаев оно связано с недооценкой важности подготовки к собеседованию, что было исправлено во время дополнительной сессии.

Заключение

В результате применения данной системы оценки знаний по курсу «Материаловедение» удалось сохранить значимость лабораторных работ, при выполнении которых студенты не только подкрепляют практическими действиями теоретический материал, но и изучают многие существенные моменты, не отраженные в лекциях.

Несмотря на высокую плотность экзаменов и консультаций, промежуточная аттестация проводится без упрощений и требует от обучающихся серьезной подготовки и работы в семестре.

Результаты итоговой аттестации на основе устного собеседования хорошо коррелируют с результатами оценки активности обучаемых в течение семестра.

Форма проведения аттестации в основном позволяет исключить положительные результаты, достигнутые недобросовестным способом. Вместе с тем возможность повышения стартовой оценки стимулирует

подготовку к устному собеседованию, которая является важнейшей частью освоения любого курса.

Автор рассчитывает на критические замечания и советы коллег.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пашеева, Т. Ю. О фундаментализации инженерного образования на примере изучения курса "Материаловедение" / Т. Ю. Пашеева // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 7(244). – С. 33-38. – DOI 10.14489/hb.2017.07.pp.033-038.

[2] Пикмуллин, Г. В. Роль предметов "Материаловедение и технология конструкционных материалов" и "сопротивление материалов" в инженерном образовании университета / Г. В. Пикмуллин, Т. Н. Вагизов, Р. Р. Ахметзянов // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса : Научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора П.Г. Мудрова, Казань, 26–27 октября 2023 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2023. – С. 236-240.

[3] Chan C., Fong E., Luk L., Ho R. A review of literature on challenges in the development and implementation of generic competencies in higher education curriculum // International Journal of Educational Development. 2017. Vol. 57, November. P. 1–10.

[4] Косарева, Н. В. О проблемах подготовки современных инженеров в области материаловедения: методический аспект / Н. В. Косарева, Е. В. Кузнецова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки. – 2018. – № 2(38). – С. 52-64.

[5] Попов, И. В. Ретроспективная оценка обучающимися опыта построения индивидуальной образовательной траектории в период дистанционного обучения, связанного с введением ковидных ограничений в 2020-2022 годах / И. В. Попов, В. И. Воробьев // Вестник Самарского юридического института. – 2024. – № 1(57). – С. 101-108. – DOI 10.37523/SUI.2024.57.1.016.

[6] Лагунова, М. В. О курсе высшей математики для студентов механического направления, обучающихся заочно / М. В. Лагунова, Л. А. Иванова, Н. В. Ежова // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 1-11. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-518.

[7] Арсентьева, К. С. Компетентностно-деятельностный подход в преподавании специальных дисциплин технической направленности /

К. С. Арсентьева // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2022. – № 11. – С. 1-17.
[8] Гасюк, Д. П. Проведение занятий в активной форме при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений / Д. П. Гасюк, В. А. Косова // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2022. – № 11. – С. 18-28.
[9] Streveler R.A., Menekse M. Taking a Closer Look at Active Learning // Journal of Engineering Education. 2017. Vol. 106(2). P. 186–190.
[10] Боревич, Е. З. Тестирование как форма проведения промежуточной аттестации студентов / Е. З. Боревич, Е. Е. Жукова // Современное образование: содержание, технологии, качество. – 2024. – Т. 1. – С. 271-272.
[11] Электронное тестирование в системе подготовки студентов творческих специальностей // Материалы онлайн-конференции «Театральное искусство в современную эпоху. Теория и опыт», посвященной Международному дню театра, КазНАИ им. Т. Жургенова, 28 марта 2017 г. – С.213-218.
[12] Полетаева О. Б. Портфолио как форма оценки индивидуальных достижений студента в условиях дистанционного обучения // Общество: социология, психология, педагогика. 2021. № 12. С. 307-311.
[13] Алексеева, Л. Технологии применения рабочих тетрадей в профессиональной образовательной организации / Л. Алексеева // Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft. – 2021. – № 7-2. – С. 44-46. – DOI 10.24412/2701-8369-2021-7-2-44-46.
[14] Akhmetov, A. Практика управления качеством образования в РК / A. Akhmetov // Вестник Казахского национального педагогического университета имени Абая. Серия: Педагогические науки. – 2023. – Vol. 77, No. 1(2023). – DOI 10.51889/1728-5496.2023.1.76.006.
[15] Гусева, А. Х. Преимущества гибридного типа обучения как метода организации и подготовки к промежуточной и итоговой аттестации студентов / А. Х. Гусева // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 11-6(79). – С. 154-159.
[16] Huang K.L. Planning and implementation framework for a hybrid e - learning model: The context ofa part - time LIS. // Journal of Librarianship and Information Science. 2010. № 42. P. 48-56.
[17] Рыбаков, М. Д. Балльно-рейтинговая оценка профессиональной компетентности студентов, магистрантов, аспирантов при проведении промежуточной аттестации / М. Д. Рыбаков // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие" : Международные научные конференции, Санкт-Петербург, 25–29 февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 20-24.

[18] Поярков, Н. Г. Выявление связей между семестровыми рейтингами студентов и оценками их промежуточной аттестации / Н. Г. Поярков // Взаимодействие науки и общества - путь к инновационному развитию : сборник статей международной научной конференции, Выборг, 17 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2023. – С. 10-11.
[19] Кульгейко, М. П. Анализ текущей и промежуточной аттестации студентов по курсу "начертательная геометрия" / М. П. Кульгейко, Г. Т. Подгорнова, О. В. Артюшков // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2023. – С. 193-195.
[20] Применение различных образовательных технологий при проведении промежуточной аттестации иностранных студентов / О. В. Васильева, В. А. Королев, Е. А. Новикова [и др.] // Modern Science. – 2022. – № 6-4. – С. 20-23.

V.G. Teplukhin

HYBRID APPROACH TO KNOWLEDGE ASSESSMENT IN THE COURSE "MATERIAL SCIENCE"

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Abstract

The paper examines the system of teaching students of mechanical engineering specialties in the course of material science, using knowledge assessment based on current control of mastering the material of lectures and laboratory works, confirmed by an interview during midterm assessment. The system was used and adjusted for five years. The results show a good correlation of the semester current rating and the final assessment. At the same time, the elimination of erroneous semester rating results is obvious. An important result of system applying is the possibility to formalize the assigned assessment.

Key words: material science, tests, portfolio, interview, assessment criteria, laboratory work, course structure

REFERENCES

[1] Pasheeva T. Yu. On the fundamentalization of engineering education using the example of studying the course "Materials Science", Handbook. Engineering Journal, 2017, 7 (244). pp. 33-38 (rus.). - DOI 10.14489 / hb.2017.07.pp.033-038

[2] Pikmullin G. V., Vagizov T. N., Akhmetzyanov R. R. The role of the subjects "Materials Science and Technology of Structural Materials" and "Strength of Materials" in the engineering education of the university, Scientific works of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor P. G. Mudrov, Kazan, October 26-27, 2023, Kazan State Agrarian University, 2023, pp. 236-240 (rus.)

[3] Chan C., Fong E., Luk L., Ho R. A review of literature on challenges in the development and implementation of generic competencies in higher education curriculum. International Journal of Educational Development, 2017, Vol. 57, November. pp. 1–10.

[4] Kosareva N. V., Kuznetsova E. V. On the problems of training modern engineers in the field of materials science: methodological aspect. Bulletin of Samara State Technical University. Series: Psychological and pedagogical sciences, 2018, 2 (38), pp. 52-64 (rus.)

[5] Popov I. V., Vorobyov V. I. Retrospective assessment by students of the experience of building an individual educational trajectory during the period of distance learning associated with the introduction of COVID restrictions in 2020-2022. Bulletin of the Samara Law Institute, 2024, 1 (57), pp. 101-108 (rus.). - DOI 10.37523 / SUI.2024.57.1.016.

[6] Lagunova M. V., Ivanova L. A., Ezhova N. V. About the course of higher mathematics for mechanical students studying by correspondence. Modern mechanical engineering: Science and education. 2023. pp. 1-11. (rus.) - DOI 10.18720/SPBPU/2/id23 518.

[7] Arsentyeva K. S. Competence-activity approach in special technical disciplines teaching. Modern mechanical engineering: Science and education, 2022, 11, pp. 1-17. (rus.).

[8] Gasyuk D. P., Kosova V. A. Giving lessons in an active form at studying of the special disciplines by the engineering students. Modern mechanical engineering: Science and education, 2022, 11, pp. 18-122. (rus.)

[9] Streveler R.A., Menekse M. Taking a Closer Look at Active Learning. Journal of Engineering Education, 2017, Vol. 106(2), pp. 186–190.

[10] Borevich E. Z., Zhukova E. E. Testing as a form of conducting midterm assessment of students. Modern education: content, technology, quality, 2024, V. 1, pp. 271-272. (rus.)

[11] Electronic testing in the system of training students of creative specialties. Conference proceedings, KazNAI named after T. Zhurgenov, March 28, 2017, pp. 213-218. (rus.)
[12] Poletaeva O. B. Portfolio as a form of assessing individual student achievements in the context of distance learning. Society: sociology, psychology, pedagogy, 2021, No 12, pp. 307-311. (rus.)
[13] Alekseeva L. Technologies for the use of workbooks in a professional educational organization. Deutsche Internationale Zeitschrift für Zeitgenössische Wissenschaft, 2021, No 7-2, pp. 44-46. (rus.) – DOI 10.24412/2701-8369-2021-7-2-44-46.
[14] Akhmetov A. Practice of quality management of education in the Republic of Kazakhstan. Bulletin of the Kazakh National Pedagogical University named after Abay. Series: Pedagogical Sciences, 2023, Vol. 77, No 1(2023). (rus.) – DOI 10.51889/1728-5496.2023.1.76.006
[15] Guseva A. Kh. Advantages of the hybrid type of training as a method of organizing and preparing for midterm and final certification of students. Current scientific research in the modern world, 2021, No 11-6 (79), pp. 154-159.
[16] Huang K.L. Planning and implementation framework for a hybrid e - learning model: The context ofa part - time LIS. Journal of Librarianship and Information Science, 2010, 42. pp. 48-56.
[17] Rybakov M. D. Score-rating assessment of professional competence of students, master's students, postgraduates during midterm assessment. International scientific conference, St. Petersburg, February 25-29, 2020, St. Petersburg: "NATSRZAVITIE", 2020, pp. 20-24.
[18] Poyarkov N. G. Identifying the links between students' semester ratings and their midterm assessment grades. International scientific conference, Vyborg, April 17, 2023, St. Petersburg: "NATSRZAVITIE", 2023, pp. 10-11.
[19] Kulgeiko M. P., Podgornova G. T., Artyushkov O. V. Analysis of current and midterm assessment of students in the course "descriptive geometry". Innovative development of transport and construction complexes: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of BelIIZhT - BelSUT, Gomel, November 16-17, 2023. - Gomel: Educational Institution "Belarusian State University of Transport", 2023, pp. 193-195.
[20] Vasilyeva O. V., Korolev V. A., Novikova E. A. [et al.]. Application of various educational technologies in conducting midterm assessment of foreign students, Modern Science, 2022, No 6-4, pp. 20-23.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378.1 + 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-103

И.С. Ярошенко

РОЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИЗУЧЕНИИ ХИМИИ



Ирина Сергеевна Ярошенко,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-952-371-01-39
E-mail: yaroshenko_is@spbstu.ru

Аннотация

В работе рассматриваются основные функции, которые несет эксперимент в процессе изучения химии. Подчеркивается неразрывность теории и практики, что имеет особое значение при получении высшего технического образования.

Ключевые слова: химический эксперимент, технические специальности, высшее учебное заведение.

Введение

Студенты технических высших учебных заведений должны освоить программу по общей и неорганической химии. Получение полноценных знаний, основанных на конкретных представлениях об изучаемых веществах и их превращениях, в значительной степени связано с самостоятельным вдумчивым выполнением учебного эксперимента. Еще в восемнадцатом веке М. В. Ломоносов писал: *“Химии никоим образом научиться невозможно, не видав самой практики и не принимаясь за химические операции”*. Самостоятельная работа студентов в лаборатории помогает более глубокому усвоению теоретических основ предмета и способствует приобретению необходимых практических навыков.

Целью данной работы стало выявление основных функций, которые несет эксперимент в процессе изучения химии.

Методы

Основные задачи работы:
– изучить литературу по педагогике
– провести анкетирование студентов первого курса, изучающих химию
– систематизировать и обобщить данные.

Результаты

Значимость химии в современном мире не вызывает сомнений, высококвалифицированный специалист технического профиля должен владеть общепрофессиональными компетенциями такого уровня, которые позволят решать задачи химического плана любой сложности, демонстрируя тем самым практическое применение знаний. При изучении химии эксперимент выступает важным источником познания и средством развития практических навыков у обучающихся.

Функции эксперимента заключаются в том, что он:

1. Помогает иллюстративно пояснить теоретическую сущность химического явления, понять основные законы и превращения.
2. Знакомит учащихся не только с явлениями, но и с методами химической науки, в том числе с посудой, приборами, реактивами.
3. Помогает вызвать интерес к предмету. Эксперимент позволяет наблюдать процессы, формировать практические навыки и умения.
4. Выполняет трансформирующую роль при преодолении трудностей освоения теоретического материала.
5. Позволяет выработать предпосылки для построения обобщений, общих закономерностей.
6. Развивает навыки научного исследования. Эксперимент предполагает постановку гипотезы, планирование и проведение опытов, анализ полученных данных и формулирование выводов.

Интерес к естественным наукам начинает формироваться в детстве, когда ребенок наблюдает за гашением соды уксусной кислотой или за тем, как при открывании бутылки с газировкой пена вырывается наружу. Задача взрослых объяснять такие явления.

В дальнейшем при учебе в школе в образовательных программах по физике и химии обязательно присутствуют лабораторные работы. Они и должны выполнять все вышеуказанные функции. Однако, современный педагог не всегда успевает или не считает нужным проводить полностью положенный практикум, так что и выполнение лабораторных работ сводится к минимуму. Это подтверждает опрос, проведенный среди студентов-первокурсников разных институтов Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого.

Студентам был задан вопрос о лабораторных занятиях по химии в школе, предложены варианты ответов.

а) Не было никаких экспериментов

б) Руками не делали, только смотрели видео-эксперименты

в) Руками не делали, эксперименты показывал учитель

г) Делали самостоятельно, 3-4 работы за всю школьную жизнь

д) Делали самостоятельно, было много работ.



Рис. 1. Лабораторные работы по химии в школе

Как видим из диаграммы, действительно процент обучающихся, кто проделывал руками самостоятельно все лабораторные работы, а значит, по-настоящему вник в изучаемый вопрос, невелик – всего 28 процентов. Для остальных, соответственно, химия прошла без особого понимания.

Слабая довузовская подготовка становится проблемой как студента, так и преподавателя. Зачастую студент не в состоянии освоить материал изучаемого предмета, потому как нет подходящей базы. Преподавателю приходится рассказывать не только материал по программе дисциплины, но и обучать «азам химии», ведь некоторые студенты путают названия элементов, не помнят основных законов и формул, которые должны быть в багаже знаний у абитуриента. На помощь преподавателю приходят лабораторные занятия, которыми можно попытаться заинтересовать еще не увлеченных студентов.

Проведенный опрос показал, что количество лабораторных работ по химии для успешного освоения предмета в ВУЗе достаточно, так ответили 92% студентов. Большинство обучающихся отметили, что после выполнения лабораторных работ возникают сложности с написанием отчета, а ведь только после того, как отчет будет зачтен преподавателем, работа считается выполненной. Проблемы с пониманием того, как выполнить эксперимент у опрошенных студентов не появляются, а значит, разработанная методичка к лабораторным работам написана доступным языком. Некоторые студенты отметили, что боятся прикасаться к емкостям с реагентами, подчеркивая их потенциальную опасность, некоторые отметили боязнь работать со спиртовкой – открытым пламенем, еще одни боятся мыть пробирки, потому что они хрупкие и могут разбиться. Результаты опроса представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Проблемы, возникающие при выполнении лабораторных работ

Сложности, возникающие при выполнении лабораторных работ	**% от опрошенных студентов**
Понять, как технически выполнить эксперимент (неясно из методички)	0
Прикасаться к емкостям с реагентами/работать с реагентами (вдруг они опасны)	2
Работать со спиртовкой (боязнь открытого пламени)	4
Мыть пробирки (вдруг разобьются)	4
Написать отчет о проделанной работе	90

Технике безопасности на занятиях по химии уделяется большое внимание. Инструкция по технике безопасности находится на видном месте в любом лабораторном помещении, она обязательна к изучению. Студенты расписываются в специальном журнале, подтверждая, что они знают, как работать с веществами и посудой. Растворы, что стоят на лабораторных столах, как правило, разбавленные, что позволяет провести опыты, а если студент случайно прольет на руку, то при быстром смыве струей холодной воды из крана вреда не будет. Соответственно, работать с реактивами безопасно, если соблюдать инструкцию по технике безопасности.

Перед опытами, в которых необходимо нагревание, преподаватель обязательно показывает, как работать со спиртовкой, в том числе как ее зажечь и как погасить. Это безопасно, если опять-таки соблюдать технику безопасности.

Мыть после опытов лабораторную посуду – это базовое умение, которому должны научиться дети еще в школе. Нужно быть аккуратным, чтобы не разбить, оставить после себя такие же чистые пробирки, какими они были до начала работы – это элементарная вежливость и уважение к другим. К сожалению, эти качества сейчас развиты далеко не у всех.

Сложности с написанием отчета после выполнения лабораторных работ вполне объяснимы – нужно, сосредоточенно проделав эксперимент, обобщенно описать явление, сделать определенный вывод, выявить закономерность. Пожалуй, что это и есть самое важное, для чего делается лабораторная работа. Почему же возникают сложности? Возможно, дело в снижении обучаемости студентов. Нынешние студенты уже родились «со смартфоном в руках», любая информация была для них всегда доступна по одному щелчку клавиатуры или запросу голосовому помощнику. А сформулировать вывод самостоятельно достаточно сложно. Психологи выделяют прямую зависимость – чем легче добыта информация, тем меньше времени она остается в памяти. Именно поэтому важно, чтобы студент самостоятельно написал отчет и сделал соответствующий вывод – чтобы эксперимент был понят и остался у человека в памяти.

Обсуждение

Выявлены функции эксперимента на занятиях по химии. Основные из них: ***эвристическая*** – установление новых фактов и закономерностей, ***корректирующая*** – преодоление трудностей освоения теории путем проведения эксперимента, ***обобщающая*** – формирование выводов на основе серии опытов, ***исследовательская*** – развитие умений и навыков работы с веществами, а также творческой деятельности. Таким образом, химический эксперимент служит не только источником знаний, но и средством, с помощью которого развивается мышление, приобретаются практические умения и навыки.

Проведенный среди студентов опрос показал, что количество экспериментальных работ по химии в школьном курсе сведено к минимуму. Это объясняется тем, что уменьшилось количество часов химии в учебной программе, во многих школах отсутствуют ставки лаборанта, что увеличивает нагрузку на учителя при подготовке химического эксперимента.

Технический ВУЗ должен обязательно обладать лабораторной базой по химии, чтобы будущие специалисты могли на практике познакомиться и усвоить закономерности в химических явлениях, изучить свойства металлов, в первую очередь, потому как именно с ними работают инженеры, строители, энергетики и другие.

Особое внимание на лабораторных занятиях должно быть уделено технике безопасности, студент должен знать, как себя вести в лаборатории, что можно делать, а что нельзя.

Заключение

Химия является наукой одновременно и теоретической, и практической, поэтому в процессе её изучения важен эксперимент как средство получения конкретных представлений и прочных знаний. В процессе выполнения опытов студенты обучаются умению наблюдать, анализировать, делать выводы, обращаться с оборудованием и реактивами. Таким образом, должно быть отведено большое количество учебного времени на лабораторные работы. Только в этом случае будущие специалисты технического профиля будут иметь прочные фундаментальные знания по химии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ермаханов М.Н., Журхабаева Л.А., Адырбекова Г.М., Асылбекова Г.Т., Сабденова У.О., Куандыкова Э.Т. Химический эксперимент и его роль в методике обучения химии: Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 1-3. С. 398-399.

[2] Сафина Л.Г. Методические особенности использования экспериментальных задач по химии: Самарский научный вестник. 2014. № 2(7). С. 104-106.

[3] Обухов А.С. Развитие исследовательской деятельности учащихся. М.: Национальный книжный центр, 2015. 280 с.

[4] Ясюкевич Л.В. Актуальные вопросы химического образования в техническом университете: Фундаментальные исследования. 2009. № 5. С. 75-77.

[5] Пак М.С. Теория и методика обучения химии: учебник для вузов. СПб: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2015. 306 С.

[6] Черненко Д.В., Куксевич В.Ф. Причины снижения качества учебы студентов вуза: X международная научно-практическая конференция «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». 2021.

[7] Волкова Н.В. Актуальные проблемы химического образования. Сборник научных статей. Издательство ПГУ. Пенза. 2013.

I.S. Yaroshenko

THE ROLE OF EXPERIMENT IN THE CHEMISTRY STUDY

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article considers the main functions of experiment in the process of studying chemistry. The inseparability of theory and practice is emphasized, which is of particular importance in obtaining higher technical education.

Key words: chemical experiment, technical specialties, higher education institution.

REFERENCES

[1] Ermakhanov M.N., Zhurkhabayeva L.A., Adyrbekova G.M., Asylbekova G.T., Sabdenova U.O., Kuandykova E.T. Chemical experiment and its role in teaching chemistry: An international Journal of Applied and Fundamental Research. 2016. No. 1-3. pp. 398-399.
[2] Safina L.G. Methodological features of using experimental problems in chemistry: Samara Scientific Bulletin. 2014. No. 2(7). pp. 104-106.
[3] Obukhov A.S. Development of students' research activities. Moscow: National Book Center, 2015. 280 p.
[4] Yasyukevich L.V. Topical issues of chemical education at the Technical University: Fundamental research. 2009. No. 5. pp. 75-77.
[5] Pak M.S. Theory and methodology of teaching chemistry: textbook for universities. St. Petersburg: Publishing House of A. I. Herzen State Pedagogical University, 2015. 306 p.
[6] Chernenko D.V., Kuksevich V.F. The reasons for the decrease in the quality of university students' studies: X International scientific and practical conference "Modern trends and innovations in science and production". 2021.
[7] Volkova N.V. Actual problems of chemical education. Collection of scientific articles. PSU Publishing House. Penza. 2013.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 378
doi:10.18720/SPBPU/2/id-104

Н.А. Мохова[1], П.В. Ковалев[2]

ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ: ПАРТНЁРСТВО УНИВЕРСИТЕТОВ И КОМПАНИЙ В ПОДГОТОВКЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ



[1]Наталья Алексеевна Мохова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)294-4737, E-mail: mohova_na@spbstu.ru .



[2]Ковалев Павел Валерьевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6623, E-mail: kovalev_pv@spbstu.ru .

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы взаимодействия высшего учебного заведения и промышленных предприятий для привлечения абитуриентов в инженерные отрасли, отбор мотивированных и образованных студентов для дальнейшего развития стратегически важных отраслей экономики. Результаты показали, что самый действенный метод для привлечения студентов в инженерную среду — это увеличение практической вовлеченности, вследствие дальнейшего развития у студентов умений эффективно осуществлять поиск информации и применение её при решении практических задач.

Ключевые слова: инженерные специальности, инженерные классы, профориентационная деятельность, проектная деятельность, работа с абитуриентами

Введение

В современном обществе довольно давно назрела проблема инженерного образования. Выросло целое поколение, стремившееся

получить юридическое или психолого-педагогическое образование, а также образование в рамках социоэкономической направленности. Как результат государство получило большое количество граждан, не занятых напрямую в профессиональных отраслях, согласно полученным компетенциям, но вместе с этим наметилась нехватка специалистов в инженерной отрасли и падение в глазах абитуриентов престижности инженерных направлений.

Современные вызовы технологического развития требуют подготовки высококлассных инженерных кадров, способных решать сложные производственные задачи. Однако университеты сталкиваются с проблемой привлечения талантливых абитуриентов, а промышленные предприятия – с дефицитом квалифицированных специалистов. Решением может стать тесное сотрудничество между образовательными учреждениями и бизнесом, направленное на формирование непрерывной цепочки «школа – вуз – предприятие» [1].

Яркой особенностью подготовки инженерных кадров, в отличии от других направлений образования, является необходимость большого объема практических занятий, как в рамках изучаемых дисциплин, так и возможность сопряжения студентов с практической деятельностью в рамках факультативных занятий, развивающих программ и дополнительного образования. [2] Общемировой уровень развития давно свидетельствует – мало иметь хорошую теоретическую базу знаний, но и необходимо ориентироваться в постоянно развивающихся технологиях, уметь применить имеющиеся компетенции и быть мобильным в вопросах повышения имеющихся квалификаций.

Постановка задачи

Данная проблема требует многоступенчатого подхода в решении.
База понимания необходимости и престижности профессии инженера должна закладываться в рамках ранней школьной профориентации. Высшие учебные заведения, совместно с предприятиями промышленности могу выработать несколько траекторий движения в этом направлении.

Первостепенно необходимо проводить просветительскую деятельность в среде школьных учителей, ведь школьники в первую очередь обращаются с вопросами к ним, и именно учитель закладывает базовое восприятие дальнейшей возможной профессиональной деятельности и желание ребенка поставить себя на той или иной ступени социальной пирамиды [3-6]. Важно хотя бы на начальном уровне дать возможность учителю понимать, что из себя представляют разные направления инженерного образования, в чем их глобальные отличия или сходства, какая траектория карьерного роста потенциально может ожидать в будущем, если его ученики выберут определенный путь [7].

Как следующий шаг к формированию общественного сознания о важности инженерного образования уже возможно привлечение предприятий к процессу профориентации [8].

Результаты

Многие траектории уже успешно реализовываются. Например, «Большие вызовы» — это всероссийский конкурс научно-технологических проектов для школьников и студентов, проходит при безусловной поддержке промышленных предприятий и партнеров. В рамках региональных и муниципальных мероприятий возможно создание большего количества хакатонов и инженерных конкурсов.

Так, например, Санкт-Петербургский политехнический университет проводит ежегодных хакатон по робототехнике, и это мероприятие давно перестало носить муниципальный характер, последние несколько лет – это хакатон с международным участием. Школьники делятся опытом, общаются, привносят новое видение в решение поставленных на конкурсе задач и заражают друг друга своим энтузиазмом.

Промышленные производства, имеют свою нишу для ведения агитационной деятельности. Открытие образовательных центров на базе предприятий, привлечение школьников на экскурсии на свои производственные площадки, приоткрытие завесы тайны создания элементов нашей окружающей повседневности, согласно наблюдениям, очень мотивирует детей всех возрастов и вызывает желание стать причастным к этим процессам, стать частью этого общества высококвалифицированных специалистов, самоидентифицировать себя внутри инженерной среды [9] Для этой цели также хорошо себя зарекомендовало и проведение Летних школ, позволяющее заранее утвердиться в правильности выбранной профессии и провести знакомство с высшим учебным заведением в комфортной среде [10]

В последние несколько лет также получило широкое развитие привлечение будущих инженерных кадров в рамках целевого набора. Целевое обучение дает возможность абитуриенту не переживать о необходимости искать место, куда можно приложить полученные в процессе обучения знания, и вступить в трудовые отношения с основополагающими предприятиями российской экономики еще на стадии окончания школы, тем самым четко выстраивая для себя карьерный путь.

В процессе обучения в университете профориентационная работа не прекращается, а скорее даже набирает обороты. Задача университета не только принять талантливых и мотивированных школьников в ряды своих студентов, но и сделать так, чтобы зародившийся интерес к инженерному делу не угас, не сместился в пользу других областей, не дать юному

гражданину разочароваться в своем выборе [11]. И здесь на помощь опять приходят предприятия, предлагая студенту места для прохождения практик и стажировок на своих площадках. Имея возможность познакомиться с реальными производственными процессами, оборудованием и технологиями студент наиболее вероятно останется верен своему выбору жизненного пути. Большую роль также играет и наличие грамотного наставника, сотрудника предприятия, кто готов провести студента за руку в большой и захватывающий мир реальной, практической инженерии [12].

Создание специализированных программ обучения, классов и лабораторий также крайней важно для развития комплексного подхода к образованию. Не все предприятия готовы и могут себе позволить такой метод взаимодействия с организациями высшего образования, но как результат это показывает положительные результаты в долгосрочной перспективе формирования восприятия престижности инженерной профессии. Ведь когда студент работает в комфортных условиях, на современном оборудовании происходит максимальная вовлеченность как в получение практических навыков, так и в формировании восприятия своего будущего развития в профессиональной среде [13].

Так, в настоящее время в Институте машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ в рамках партнерских соглашений с компанией ПАО «Северсталь» разработана модель подготовки специалистов для ПАО «Северсталь» с привлечением к реализации данной подготовки сотрудников и производственных площадей промышленного партнера. В структуре подготовки студентов заложена полугодовая практическая подготовка на территории ПАО «Северсталь», в результате которой студенты получат необходимые профессиональные компетенции и необходимые для партнера дополнительные квалификации (рабочие профессии).

Данная модель подготовки даст необходимый набор компетенций для продолжения обучения и для последующей подготовки кадров высшей квалификации. При привлечении к последующей подготовке промышленного партнера полученные компетенции дают возможность обучения в производственной аспирантуре с последующей защитой и получением ученой степени кандидата технических наук.

В рамках реализации данной модели компания ПАО «Северсталь» выделила инвестиции для модернизации аудиторного фонда и оборудования и создания новых образовательных пространств. В рамках данного проекта СПбПУ были переданы VR-тренажеры для подготовки специалистов в области материаловедения и металлургии, использование которых включено в учебный процесс данных направлений подготовки.

По такой же схеме в настоящее время развиваются у ИММиТа отношения с такими ведущими промышленными компаниями, как АО “Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО «Силовые машины», АО

«Петербургский тракторный завод», а также АО «Боровичский комбинат огнеупоров».

Обсуждение

На данный момент одной из самых больших проблем является привлечение практикующих специалистов, работающих на реальном производстве, к процессу обучения студентов. Этот вопрос требует комплексного решения, как со стороны предприятий, которые заинтересованы в том, чтобы подрастала новая инженерная смена, так и со стороны министерства образования, в возможном создании более гибких образовательных программ и увеличении мотивирующих элементов для ведущего занятия специалиста [14]. Наглядный пример правильности данного подхода был показан еще в Советском союзе, когда развитие экономики в послевоенное время шло в огромном темпе и одной из причин как раз и было грамотная передача практических навыков от сотрудника предприятия студенту.

Нельзя обойти стороной и грантовую систему, которая также получила свое развитие в современном образовательном процессе [15]. В рамках научных грантов совместно с предприятиями выполняются задачи, которые позволяют студенту примерить на себя роль специалиста, расширить рамки решаемых вопросов относительно стандартного учебного плана и чувствовать себя при этом максимально мотивированным и защищенным, зная, что его труды будут оценены не только на уровне похвалы, но и материальными средствами, которые можно пустить на дальнейшее развитие исследований.

Заключение

Предприятия, высшие и общеобразовательные учебные заведения все чаще приходят к неизбежному выводу, что обойтись без тесного взаимодействия, направленного на решение задач технологического лидерства невозможно. Но все участники этого процесса находятся на начальном этапе пути и траекторий дальнейшего развития сотрудничества можно создать еще большее количество. Как результат, наиболее зарекомендовавшими себя методами является внедрение адаптации образовательных программ при участии промышленных предприятий, создание совместных лабораторий и просветительская деятельность на базовом уровне, увеличение вовлеченности всех участников процесса по увеличению престижности инженерных профессий в глазах абитуриентов и действующих студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Читаева Ю. А. Непрерывное образование как одно из условий развития современного образования: прошлое, настоящее, перспективы на будущее. Научные исследования в образовании. 2020. С. 35-37

[2] Meteleva L.A., Bogacheva A.V., Vaganova O.I., Smirnova Z.V., Maltseva S.M., Mironov G.S., Aleshugina E.A. Development of educational services in additional education. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Pp. 2507-2511

[3] Кондратьева С.Ю., Ковалева М.В. Наставничество как формат вовлечения в профессионально-педагогическую деятельность Социализация личности на разных этапах возрастного развития: опыт, проблемы, перспективы: Сборник научных статей XI Международной научно-практической конференции. - Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2024. - с. 106-109

[4] Кондратьева С. Ю., Ковалева М. В. Характеристика целостной педагогической системы профориентационной работы с обучающимися / С.Ю. Кондратьева, М.В. Ковалева // Современные векторы развития специального и инклюзивного образования. - Ярославль, 2024. - С. 205-210.

[5] Кондратьева С. Ю., Ковалева М. В. Характеристика целостной педагогической системы профориентационной работы с обучающимися разных уровней обучения / С.Ю. Кондратьева, М.В. Ковалева // Вестник педагогических инноваций. Новосибирск, 2024. – № 2 (74). – С. 5–12.

[6] Кондратьева С.Ю., Ковалева М.В. Реализация системы наставничества с обучающимися разных уровней обучения / С.Ю. Кондратьева, М.В. Ковалева // Развитие региональных кластеров непрерывного образования педагогических кадров : материалы III Международного педагогического форума Енисейской Сибири, Красноярск. - Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2024 - С. 47-50.

[7] Mironov A.G. Psycholinguistic aspects in career guidance. Сборник статей по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Профессиональное самоопределение молодежи инновационного региона: проблемы и перспективы. 2020. С. 352-354

[8] Солнышкова О.В. Технология сотрудничества вуза с инженерными классами школ как первый этап непрерывной образовательной траектории. Актуальные вопросы образования. 2022. С. 241-244

[9] Гордеева Н.М. Формирование профессиональной самоидентификации инженера. Тезисы докладов второй международной научно-практической конференции Управление качеством инженерного

образования. Возможности вузов и потребности промышленности. 2016. С. 39-40
[10] Должикова А.В., Тисленко М.И. Летние школы как инструмент повышения конкурентоспособности российской высшей школы: метод кейсов. Образование без границ. 2020. С.43-48
[11] Sokolova A.G. Engineering discourse and its role in shaping modern engineering education. Modern Pedagogical Education. 2022. Pp. 210-214.
[12] Ивачева О.А. Павлова А.Г. Профессиональное обучение (по отраслям) – интегрированная модель непрерывного инженерного образования. Сборник материалов международной научно-практической конференции. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. 2017. С.225-229
[13] Спирин Д.А. Инженерное непрерывное образование: Актуальные проблемы и обзор базовых технологий. Эвристический потенциал междисциплинарного дискурса в современном научном познании. 2023. С. 115-118
[14] Лебедева О.И. Технологическое образование как одна из составляющих инженерного образования. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции Технологическое образование в системе «Школа-колледж-вуз»: Традиции и инновации. 2024. С. 201-206
[15] Solnyshkova O.V., Boyko E.N. The ways of motivation of university lecturers to engage students into scientific research. Mir Nauki, Kultury, Obrazovaniya. 2019. С. 160-163.

N.A. Mokhova, P.V. Kovalev

FROM THEORY TO PRACTICE: PARTNERSHIP BETWEEN UNIVERSITIES AND COMPANIES IN THE TRAINING OF ENGINEERING SPECIALISTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the issues of interaction between the university and industrial enterprises to attract applicants to engineering industries, the selection of motivated and educated students for the development of strategically important sectors of the economy. The results showed that the most effective method for attracting students to the engineering environment is to increase practical involvement, as students gain the ability to effectively search for information and apply it to solve practical problems.

Key words: engineering specialties, engineering class, career guidance, project activities, work with applicants

REFERENCES

[1] Chitaeva Y.A. Continuous Education as a Condition for the Development of Modern Education: Past, Present, and Future Prospects. Scientific Research in Education. 2020. pp. 35-37. (rus.)
[2] Meteleva L.A., Bogacheva A.V., Vaganova O.I., Smirnova Z.V., Maltseva S.M., Mironov G.S., Aleshugina E.A. Development of educational services in additional education. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. C. 2507-2511
[3] Kondratieva S. Yu., Kovaleva M. V. Mentorship as a format for engaging in professional pedagogical activity. In: Socialization of the individual at different stages of development: experience, problems, perspectives: Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference, Grodno: Grodno State University named after Yanka Kupala, 2024, pp. 106–109. (rus.)
[4] Kondratieva S. Yu., Kovaleva M. V. Characteristics of a comprehensive pedagogical system for career guidance work with students. In: Modern vectors of development of special and inclusive education, Yaroslavl, 2024, pp. 205–210. (rus.)
[5] Kondratieva S. Yu., Kovaleva M. V. Characteristics of a comprehensive pedagogical system for career guidance work with students of different educational levels. Bulletin of Pedagogical Innovations, 2024, no. 2(74), pp. 5–12. (rus.)
[6] Kondratieva S. Yu., Kovaleva M. V. Implementation of a mentorship system with students of different educational levels. In: Development of regional clusters of continuous education for pedagogical personnel: materials of the III International Pedagogical Forum of Yenisei Siberia, Krasnoyarsk: KGPU named after V. P. Astafiev, 2024, pp. 47–50. (rus.)
[7] Mironov A.G. Psycholinguistic aspects in career guidance. Collection of articles on the materials of the All-Russian (national) scientific-practical conference Professional self-determination of youth of the innovative region: problems and prospects. 2020. pp. 352-354 (rus.)
[8] Solnyshkova O.V. Technology of university cooperation with engineering classes of schools as the first stage of a continuous educational trajectory. Current issues in education. 2022. pp. 241-244 (rus.)
[9] Gordeeva N.M. Formation of Professional Self-Identification of Engineers. Abstracts of Reports from the Second International Scientific and Practical Conference "Quality Management in Engineering Education: University Capabilities and Industry Needs." 2016. pp. 39-40. (rus.)

[10] Dolzikova A.V., Tislenko M.I. Summer Schools as a Tool for Enhancing the Competitiveness of Russian Higher Education: The Case Method. Education Without Borders. 2020. pp. 43-48. (rus.)
[11] Sokolova A.G. Engineering discourse and its role in shaping modern engineering education. Modern Pedagogical Education. 2022. pp. 210-214.
[12] Ivacheva O.A. Pavlova A.G. Professional training (by industry) – an integrated model of continuous engineering education. Collection of materials of the international scientific-practical conference. M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. 2017. pp. 225-229 (rus.)
[13] Spirin D.A. Continuous Engineering Education: Current Issues and Overview of Fundamental Technologies. The Heuristic Potential of Interdisciplinary Discourse in Contemporary Scientific Knowledge. 2023. pp. 115-118 (rus.)
[14] Lebedeva O.I. Technological Education as a Component of Engineering Education. Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Technological Education in the 'School-College-University' System: Traditions and Innovations." 2024. pp. 201-206. (rus.)
[15] Solnyshkova O.V., Boyko E.N. The ways of motivation of university lecturers to engage students into scientific research. Mir Nauki, Kultury, Obrazovaniya. 2019. pp. 160-163.

МЕХАНИКА МАШИН

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 539.3
doi:10.18720/SPBPU/2/id-105

Т.В. Зиновьева[1], А.Р. Галяутдинова[2], А.К. Беляев[3]

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВНУТРИ РОЛИКОПОДШИПНИКА В ПРИСУТСТВИИ ВОДОРОДА



[1]Татьяна Владимировна Зиновьева, к.т.н., с.н.с.,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com



[2]Алия Радиковна Галяутдинова, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: aliyagalyautdinova@gmail.com



[3]Александр Константинович Беляев, д.ф.-м.н., г.н.с.,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: vice.ipme@gmail.com

Аннотация

Исследовано влияние ослабленного водородом слоя внутреннего кольца подшипника на напряженно-деформированное состояние системы вал-подшипник. Установлено, что водород, выделяющийся из смазки, вызывает дополнительное расширение внутреннего кольца, что уменьшает рабочий радиальный зазор и перераспределяет осевую нагрузку между телами качения, в некоторых случаях увеличивая прижимную силу к наиболее нагруженному элементу. Решена задача о контакте кольца подшипника и цилиндрического ролика, определены напряжения в кольце под поверхностью контакта. Показано, что с увеличением прижимающей силы опасная область высоких напряжений смещается вглубь кольца, способствуя зарождению усталостных подповерхностных дефектов.

Ключевые слова: роликоподшипник, водородная деградация металла, коэффициент Штрибека, контактные напряжения.

Введение

Водород, как один из самых распространенных химических элементов, играет важную роль в механике материалов, в том числе в связи с эксплуатацией подшипников, которые обеспечивают движение многих механизмов с минимальным трением и износом [1]. Однако долговечность подшипников может быть серьезно подорвана из-за воздействия водорода [2].

При наличии водорода в окружающей среде или в смазочном материале [3], он может проникать в структуру стали подшипников, вызывая явление, известное как водородное хрупкое разрушение. Это приводит к образованию трещин и снижению прочности материала [4, 5]. Важно отметить, что контактные напряжения в подшипниках, возникающие из-за механических нагрузок, могут усугубляться воздействием водорода. Высокие контактные напряжения способствуют более глубокому проникновению водорода в микротрещины и дефекты, что увеличивает вероятность разрушения. В работе [6] было изучено влияние механических напряжений на диффузию и накопление водорода в контакте подшипника. Выводы работы показывают, что избыточное прокатывание и накопление пластической деформации под поверхностью приводят к изменению остаточных напряжений, что, в свою очередь, способствует транспортировке водорода в области растяжения.

Изучение воздействия водорода на контактные напряжения в подшипниках позволяет лучше понять механизмы повреждений и разрабатывать более устойчивые материалы. Это критически важно для создания надежных конструкций, способных противостоять негативным воздействиям окружающей среды и обеспечивать долговечность в высоконагруженных системах.

В работах [7, 8] было рассчитано напряженное состояние подшипника, посаженного на вал с натягом, и найдено распределение диффузионно-подвижного водорода в материале внутреннего кольца подшипника во время его эксплуатации. Предварительная оценка влияния водорода показала образование в кольце слоя с ослабленными механическими характеристиками.

В данной работе исследуется влияние этого ослабленного слоя на напряженно-деформированное состояние внутреннего кольца подшипника на валу и перераспределение нагрузки между телами качения, а также оцениваются напряжения, возникающие во внутреннем кольце от контактного давления цилиндрических роликов подшипника.

1. Влияние ослабленного слоя на напряженно-деформированное состояние вала и кольца

Полый вал и подшипник качения, посаженный на него с натягом, рассматриваются как два упругих кольца, вращающихся с постоянной угловой скоростью ω. Задача рассматривается в постановке плоской деформации.

Вал и кольцо изготовлены из упругих однородных материалов с модулями упругости E_1 и E_2 соответственно. Расчеты, проведенные в работе [8], показали, что вал оказывается сжатым, а кольцо подшипника растянуто в окружном направлении; свободный водород диффундирует в область максимальных напряжений и ослабляет материал кольца вблизи поверхности его посадки на вал.

Этот эффект водородной поврежденности материала кольца предлагается описывать введением ослабленного слоя толщины h с уменьшенным по определенному закону модулем упругости E_*. Предположим, как и авторы работ [9, 10], что водород экспоненциально ослабляет модуль упругости, и используем такую аппроксимацию:

$$E_*(r) = E_2\left(n + (1-n)\frac{\left(e^{\alpha(r-R_c)} - 1\right)}{\left(e^{\alpha h} - 1\right)}\right), \qquad 0 < n \le 1, \tag{1}$$

здесь R_c – радиус посадки, nE_2 – модуль упругости на внутренней границе слоя, который постепенно достигает значения E_2 на внешней границе, α – коэффициент затухания по толщине слоя. Значения параметров n, α, h в аппроксимации (1) будут определяться заданными объемными нагрузками и условиями на границах, их можно получить, решив связанную задачу теории упругости и диффузии.

Введём полярную систему координат (r, φ), вращающуюся вместе с валом, начало координат выберем на его оси вращения. Нагрузкой является контактное давление от натяга кольца на вал и центробежная сила. Рассматриваемая задача осесимметрична, для вала и кольца в отдельности уравнение баланса сил, совместности деформаций и соотношения упругости имеют вид [11]

$$\begin{aligned}
&\sigma_r' = \frac{1}{r}\left(\sigma_\varphi - \sigma_r\right) - \rho_3\omega^2 r, \;\; \sigma_s = \nu\left(\sigma_r + \sigma_\varphi\right), \\
&\varepsilon_\varphi' = \frac{1}{r}\left(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi\right), \;\; \varepsilon_r = u' = \frac{1}{E(r)}\left[\sigma_r - \nu\left(\sigma_\varphi + \sigma_s\right)\right], \\
&\varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} = \frac{1}{E(r)}\left[\sigma_\varphi - \nu\left(\sigma_r + \sigma_s\right)\right].
\end{aligned} \tag{2}$$

Здесь σ_r, σ_φ, σ_s – радиальное, окружное и осевое напряжение соответственно, $(...)' = d/dr$, ρ_3 – объёмная плотность материала. Модуль упругости $E(r)$ как функция радиальной координаты позволяет учитывать деградацию материала под воздействием водорода. Уравнения (2) дополняются граничными условиями: отсутствием внешнего давления, непрерывности радиального напряжения и условием натяга

$$\sigma_r^{(1)}(R_1) = \sigma_r^{(2)}(R_2) = 0,$$
$$\sigma_r^{(1)}(R_c) = \sigma_r^{(2)}(R_c), \quad u^{(2)}(R_c) = u^{(1)}(R_c) + \delta. \tag{3}$$

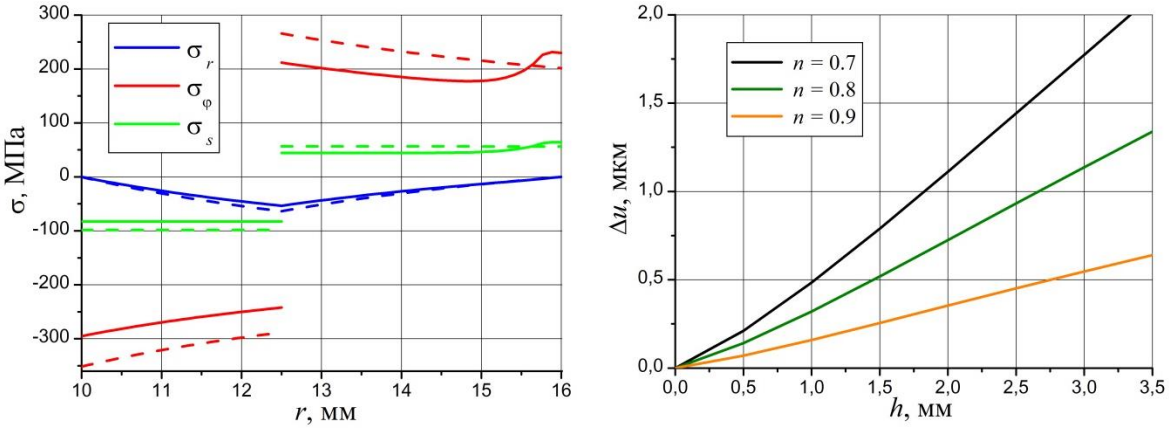
Здесь R_1 – внутренний радиус вала, R_2 – внешний радиус кольца, функции с индексом (1) соответствуют валу, а с индексом (2) – кольцу, δ – заданный радиальный натяг. Численное решение строится методом конечных разностей.

Расчет проводился для роликового радиального однорядного цилиндрического подшипника NU 2205 EC, предназначенного для больших радиальных нагрузок в комбинации с высокими частотами вращения. Параметры задачи: R_1 =10 мм, R_2 = 16 мм, R_c = 12.5 мм, радиальный натяг δ = 30 мкм, скорость вращения вала ω = 12000 об/мин. Материалы вала и подшипника – стали с параметрами E_1 = 215 ГПа, ρ_{31} = 7820 кг/м^3, E_2 = 211 ГПа, ρ_{32} = 7812 кг/м^3, коэффициент Пуассона ν = 0.28 принят одинаковым.

На рис. 1 *a* пунктирными линиями показаны графики напряжений, возникающие в вале и кольце подшипника, сплошными линиями показаны те же компоненты в системе с ослабленным водородом слоем кольца толщины h = 3.3 мм и параметрами n = 0.7, α = 3. Видно, что водород способствует увеличению окружных и осевых напряжений на внешнем радиусе кольца, в зоне контакта с роликами, окружные напряжения увеличились там на 14%.

Под воздействием натяга и вращения кольцо подшипника расширилось, радиальное смещение внешней его поверхности составило 14.1 мкм. Появление ослабленного слоя вызвало дополнительное расширение кольца на 2 мкм.

Поскольку внутреннее кольцо подшипника находится в сборке с внешним кольцом, то его дополнительное расширение под воздействием водорода приведет к уменьшению рабочего радиального зазора и перераспределению осевой нагрузки между телами качения. Для оценки этого эффекта построены зависимости расширения кольца от толщины ослабленного слоя для трех значений параметра n и α = 3 (рис. 1 *b*).



a) *b*)

Рис. 1. Напряжения в вале и кольце *a*); зависимость расширения кольца от толщины ослабленного слоя *b*).

2. Распределение нагрузки по телам качения

Внешняя радиальная нагрузка на вал распределяется между телами качения неравномерно, это распределение в значительной степени зависит от величины зазора в подшипнике. Нагрузку воспринимают только нижние тела качения, при этом наибольшая нагрузка приходится на тело в точке "*c*" (рис. 2).

В практических расчетах для подшипников принимают, что прижимающая сила, действующая на наиболее нагруженное тело качения, равна $F_1 = SF_r/N$, где S – коэффициент Штрибека, F_r – радиальное усилие, N – количество тел качения в подшипнике.

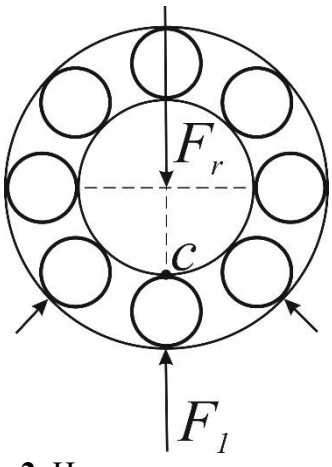


Рис. 2. Нагрузка в подшипнике

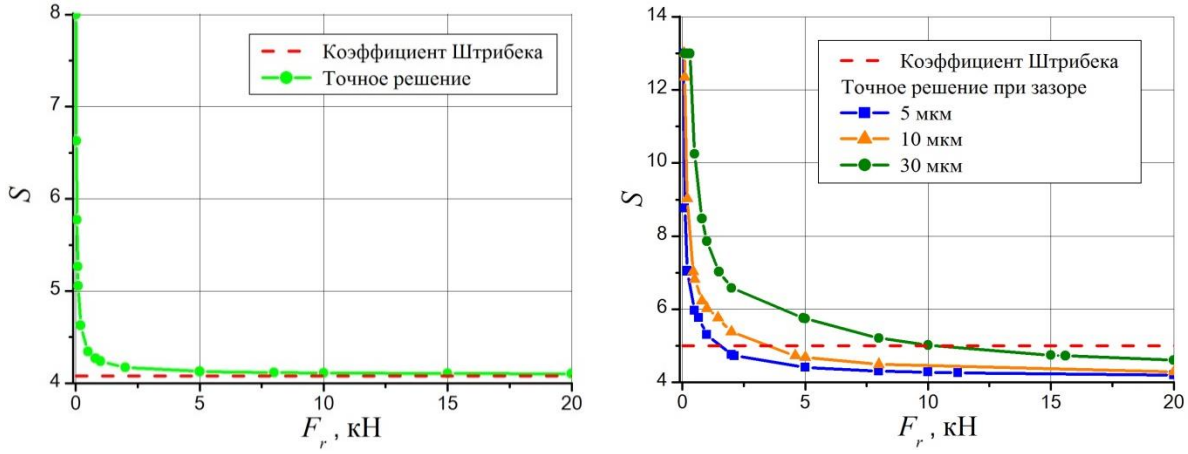
Р. Штрибек первым исследовал распределение радиальной нагрузки на тела качения [12]. Он показал, что с увеличением общего количества шариков в подшипнике с нулевым зазором коэффициент неравномерности распределения нагрузки асимптотически стремится к постоянной величине

$S = 4.37$. Позже А. Пальмгрен [13] установил, что в подшипниках с роликами коэффициент Штрибека следует брать равным $S = 4.08$.

Уравнение Штрибека является строгим с точки зрения математики, но оно не может дать достаточно точного решения для подшипников с ненулевым зазором. Работы [14 – 16] посвящены созданию математических моделей для расчета распределения радиальной нагрузки на шариковые и роликовые подшипники с положительным, нулевым и отрицательным зазором.

Тем не менее, в технических расчетах для подшипников с радиальным зазором больше нуля, влияние зазора на распределение нагрузки аппроксимируется простым увеличением значения коэффициента Штрибека до $S = 5$, независимо от величины зазора и типа тел качения [17].

В работе Томовича приведены таблицы значений силы на наиболее нагруженное тело качения для роликового подшипника NU 2205 EC. Данные получены путем точного решения системы нелинейных уравнений при различных значениях зазора в подшипнике. Интерес представляет сравнение коэффициента Штрибека с его аналогом, соответствующим этому точному решению. По приведенным в этой статье данным нами построены графики, представленные на рис. 3. Внешняя нагрузка варьировалась от 10 Н до 20 кН.



a) *b*)

Рис. 3. Коэффициент Штрибека в роликовом подшипнике без зазора *a*) и с зазором *b*)

Из графиков видно, что при малой внешней нагрузке и большом рабочем зазоре в подшипнике классическое значение коэффициента Штрибека дает сильно заниженное значение силы, действующей на нижний ролик. При увеличении зазора область наилучшего совпадения с точным решением сдвигается в сторону увеличения внешней силы. Это объясняется тем, что при увеличении внешней нагрузки увеличивается и число воспринимающих нагрузку тел качения в подшипнике.

Для проведения исследований напряженного состояния кольца подшипника необходимо знать зависимость коэффициента Штрибека от величины зазора. По данным Томовича нами построены графики для положительных величин зазора, они показаны на рис. 4 для двух значений радиальной нагрузки.

Авторы работы [14] расширили анализ влияния внутреннего зазора в отрицательную область (состояние преднатяга подшипника). Для широкого спектра размеров подшипника ими получено решение модифицированного уравнения Штрибека, связывающего максимальную нагрузку на тела качения с внутренним зазором подшипника. Представление этих данных в безразмерном виде позволило авторам предложить аппроксимирующие математические функции для оценки коэффициента Штрибека.

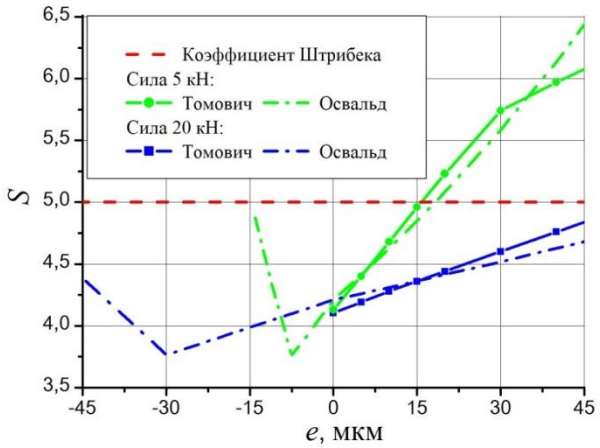


Рис. 4. Коэффициент Штрибека как функция зазора в роликовом подшипнике

В соответствии с этими функциями нами построены кривые для подшипника NU 2205 EC, они показаны на рис. 4 штрихпунктирными линиями. Заметим, что при нулевом зазоре коэффициент Штрибека по [14] равен 4.21, минимальное его значение одинаково при любой нагрузке и равно 3.76, но достигается при различных зазорах.

Таким образом, уменьшение положительного зазора в подшипнике ведет к перераспределению внешней нагрузки между большим количеством тел качения и, соответственно, снижению силы на наиболее нагруженное тело. При некотором отрицательном рабочем зазоре эта сила еще уменьшается, однако при дальнейшем увеличении его абсолютного значения резко возрастает.

Зазор в подшипнике может уменьшиться после его установки, при работе из-за нагрева и, как показано в п. 1, под воздействием водорода. Всё это следует учитывать, чтобы получить нулевой или требуемый отрицательный зазор в рабочих условиях, чтобы увеличить срок службы подшипника.

Увеличение прижимной силы на ролик может повлечь за собой превышение контактных напряжений относительно их расчетных значений и привести к поломке подшипника.

3. Расчет контактных напряжений

При анализе глубинных напряжений, возникающих во внутреннем кольце подшипника от давящего на него цилиндрического ролика, используем традиционный подход, пренебрегая кривизной кольца и заменив его упругим полупространством. Пусть цилиндр радиуса R прижимается к упругому полупространству силой Q (на единицу длины цилиндра), контактное давление между ними определено формулами Герца [19]:

$$p(x) = p_{\max}\sqrt{1-\left(\frac{x}{b}\right)^2},\ \ p_{\max} = \frac{2Q}{\pi b},\ \ b = 2\sqrt{\frac{Q\beta R}{\pi}},\ \ \beta \equiv \frac{1-\nu_0^2}{E_0} + \frac{1-\nu^2}{E}, \quad (4)$$

здесь b – полуширина площадки контакта, $p_{\max}$ – значение давления в центре площадки, E, E_0 и ν, ν_0 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов (индекс ноль относится к цилиндру). Рассчитаем напряжённое состояние упругого полупространства под этой нагрузкой.

Воспользуемся классическим решением задачи о напряженном состоянии полупространства под нагрузкой, действующей вдоль прямой линии [20]. Будем предполагать, что в полупространстве реализуется плоское деформированное состояние. Введем декартовы координаты с началом в точке касания цилиндра и полупространства, ось z направим в глубину полупространства. В случае действия распределенной нормальной нагрузки $p(x)$ из (4) на границе полупространства $z = 0$ результирующие поля напряжений можно определить посредством суперпозиции:

$$\sigma_z(x,z) = -\frac{2}{\pi}\int_{-b}^{b}\frac{p(\chi)z^3}{\left[z^2+(x-\chi)^2\right]^2}d\chi,\quad \sigma_x(x,z) = -\frac{2}{\pi}\int_{-b}^{b}\frac{p(\chi)z(x-\chi)^2}{\left[z^2+(x-\chi)^2\right]^2}d\chi,$$

$$\tau_{xz}(x,z) = -\frac{2}{\pi}\int_{-b}^{b}\frac{p(\chi)z^2(x-\chi)}{\left[z^2+(x-\chi)^2\right]^2}d\chi,\qquad \sigma_y = \nu(\sigma_x+\sigma_z). \quad (5)$$

Начнутся ли в материале пластические деформации, определим по критерию Мизеса. Это произойдет, когда эквивалентное напряжение

$$S_{\text{eq}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_z)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_x-\sigma_y)^2+6\tau_{xz}^2} \quad (6)$$

достигнет предела текучести стали при растяжении.

Выражения для напряжений в глубине полупространства от контактного давления (5) в результате интегрирования получаются в замкнутой форме, но имеют громоздкий вид. В силу симметрии задачи максимальные напряжения в контактирующих телах находятся на оси z, для них получим простые выражения в безразмерном виде:

$$\bar{\sigma}_z \triangleq \frac{\sigma_z}{p_{\max}} = -\frac{1}{\sqrt{1+\zeta^2}}, \qquad \bar{\sigma}_x \triangleq \frac{\sigma_x}{p_{\max}} = -\left(\frac{1+2\zeta^2}{\sqrt{1+\zeta^2}} - 2\zeta\right), \tag{7}$$
$$\bar{\sigma}_y \triangleq \frac{\sigma_y}{p_{\max}} = -2\nu\left(\sqrt{1+\zeta^2} - \zeta\right),$$

где введена безразмерная координата $\zeta \triangleq z/b$. На оси симметрии напряжения σ_x, σ_y и σ_z главные. Для напряжений в безразмерном виде единственным параметром остается коэффициент Пуассона для полупространства.

Для большинства сплавов и металлов коэффициент Пуассона лежит в пределах 0.25−0.35. Для трех значений этого коэффициента на рис. 5 построены графики безразмерного эквивалентного напряжения по критерию Мизеса $\bar{S}_{\text{eq}} \triangleq S_{\text{eq}}/p_{\max}$ на оси симметрии, оно достигает максимального значения на некоторой глубине под поверхностью контакта.

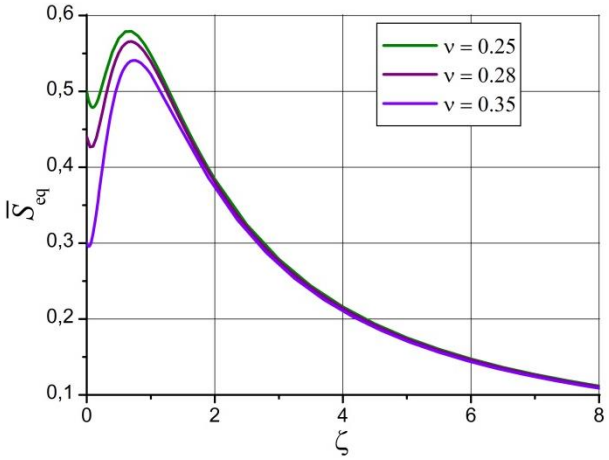


Рис. 5. Безразмерные эквивалентные напряжения на оси симметрии.

В работе [21] отмечен тот факт, что максимальное эквивалентное напряжение может возникать и на поверхности контакта, однако только для чрезмерно сжимаемых материалов (при $\nu \le 0.19$).

Оценим эквивалентное напряжение в кольце подшипника, рассмотренного в п. 1, от его контакта с роликом. В этом подшипнике 13 роликов радиуса R = 3 мм и длиной 10 мм, коэффициент Штрибека при нулевом рабочем зазоре и осевой нагрузке F_r = 20 кН равен 4.08. Тогда на

ролик в точке “*c*” действует прижимающая сила Q = 628 Н/мм. Для ролика и кольца (полупространства) из стали с модулем упругости $E_2 = 211$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0.28$ по формулам (4) найдем полуширину площадки контакта $b = 0.15$ мм и контактное давление в ее центре $p_{\max} = 2761$ МПа. Безразмерное эквивалентное напряжение достигает максимума $\bar{S}_{\text{eq}} = 0.566$ на глубине $\zeta = 0.686$ под поверхностью контакта, следовательно, максимальное значение эквивалентного напряжения 1563 МПа достигается на глубине 0.1 мм. Отметим, что эквивалентные напряжения в приповерхностной зоне значительно превышают предел текучести материала – 400 МПа.

Как было показано выше, в результате воздействия водорода уменьшится радиальный зазор в подшипнике. Сила Q, прижимающая ролик, изменится вместе с коэффициентом Штрибека в соответствии с графиком на рис. 4, обозначим новое ее значение Q^{H}.

Поскольку безразмерные эквивалентные напряжения и глубина их расположения зависят только от коэффициента Пуассона, то из формул (4) найдем отношение эквивалентных напряжений и глубин в рассматриваемом кольце под воздействием водорода к их значению до этого воздействия:

$$\frac{S_{\text{eq}}^{\text{H}}}{S_{\text{eq}}} = \frac{z_{\max}^{\text{H}}}{z_{\max}} = \sqrt{\frac{Q^{\text{H}}}{Q}}\,. \qquad (8)$$

Таким образом, максимальные эквивалентные напряжения в кольце подшипника развиваются на небольшой глубине под поверхностью контакта с телами качения, с увеличением прижимающей силы напряжения увеличиваются, а опасная область смещается вглубь. Высокие напряжения, повторяющиеся с периодичностью вращения вала, приводят к усталости материала, зарождению трещин. Под действием нагрузок микротрещины способны к быстрому росту и слиянию друг с другом [22, 23].

Заключение

В работе показано, что под воздействием водорода, выделенного из смазки подшипника, его внутреннее кольцо испытывает дополнительное расширение, уменьшая рабочий радиальный зазор. Это приводит к перераспределению осевой нагрузки на подшипник между телами качения и в некоторых случаях может привести к увеличению силы, прижимающей наиболее нагруженное тело качения к кольцу.

Проведен расчет напряжений в кольце подшипника под поверхностью контакта с цилиндрическим роликом. Показано, что напряжения достигают максимума на некоторой глубине.

Микротрещины, вызванные контактной усталостью, начинают образовываться под поверхностью в зоне максимальной нагрузки и развиваются в направлении к поверхности, приводя к выкрашиванию материала дорожек кольца подшипника.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМаш РАН FFNF-2024-0003 № 124041100005-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Alexander Stopher, M., Rivera-Diaz-del-Castillo, P.E.J. Hydrogen embrittlement in bearing steels. 2016. Materials Science and Technology. 32(11), pp. 1184-1193. DOI: 10.1080/02670836.2016.1156810.
[2] Wei, X., Li, X. Early failure analysis of automobile generator bearing. 2024. Engineering Failure Analysis. 159, 108124.
[3] Enami, K., Yamada, H., Komata, H. Hydrogen generation from lubricant under rolling-sliding contact. 2024. Tribology Online. 19(4), pp. 298-307. DOI: 10.2474/trol.19.298.
[4] Vegter, R.H., Slycke, J.T. The Role of Hydrogen on Rolling Contact Fatigue Response of Rolling Element Bearings. 2010. ASTM International. 7, 102543. DOI: 10.1520/JAI102543.
[5] Harling, J.C., Jacobs, G., Lehmann, B. Chemical factors for premature failures of roller bearings in wind turbines due to white etching cracks: A review from literature and industry experience. 2024. Journal of Physics: Conference Series. 2767(4), 042015.
[6] Khader, I., Kürten, D., Kailer, A. The influence of mechanical stresses on the diffusion and accumulation of hydrogen in a cylindrical roller thrust bearing. 2020. Bearing World Journal. 5, pp. 81-91.
[7] Зиновьева Т.В., Галяутдинова А.Р. Распределение водорода внутри кольца подшипника под воздействием натяга и вращения вала. Современное машиностроение: Наука и образование. 2023. С.191-203. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-532.
[8] Zinovieva, T.V., Galyautdinova, A.R. Hydrogen Degradation of Material of a Bearing Ring Fitted on a Rotating Shaft. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 66–76. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_7.
[9] Зиновьева Т.В. Моделирование условий возникновения трещин в трубе под давлением водородосодержащей среды. 2023. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 3, С. 86–96.
[10] Филиппенко Г.В., Зиновьева Т.В. О влиянии водородной коррозии на колебания трубы как многослойной цилиндрической оболочки. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С.334-347.

[11] Елисеев В.В. Механика деформируемого твердого тела. СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2006. 231 с.
[12] Stribeck, R. Ball bearings for various loads. 1907. Trans ASME. 29, pp. 420-463.
[13] Palmgren, A. Ball and Roller Bearing Engineering. SKF Industries, Philadelphia, PA, USA. 1959.
[14] Oswald, F.B., Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V. Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings. 2012. Tribology Transactions. 55(2), pp. 245–265. DOI: 10.1080/10402004.2011.639050
[15] Ren Xiaoli, Zhai Jia, Ren Ge. Calculation of radial load distribution on ball and roller bearings with positive, negative and zero clearance. 2017 – International Journal of Mechanical Sciences. 131–132, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.042.
[16] Tomovi´c, R. A New Approach for the Load Calculation of the Most-Loaded Rolling Element of the Rolling Bearing with Internal Radial Clearance–A Case Study. 2022. Lubricants. 10(11), 306. DOI: 10.3390/lubricants10110306.
[17] International Standard ISO-76:2017; Rolling Bearings–Static Load Ratings. International Standards Organizations: Geneva, Switzerland. 2017.
[18] Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах, Т. 2. М.: Машиностроение. 1968. 464 с.
[19] Johnson, K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press. 1985.
[20] Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир. 1975. 872 с.
[21] Green, I. Poisson Ratio Effects on the Von Mises and Maximum Shear Stresses in Cylindrical Contacts. 2005. Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 10(3), pp. 451-462.
[22] Kundu, T. Fundamentals of Fracture Mechanics. CRC Press, Boca Raton. 2008.
[23] McEvily, A.J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2013.

T.V. Zinovieva[1], A.R. Galyautdinova[2], A.K. Belyaev[1]

ESTIMATION OF LOAD DISTRIBUTION AND CONTACT STRESSES INSIDE THE ROLLER BEARING IN THE PRESENCE OF HYDROGEN

[1]Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia;
[2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The influence of the hydrogen-weakened layer of the inner ring of the bearing on the stress-strain state of the shaft-bearing system is investigated. It was found that hydrogen released from the lubricant causes additional expansion of the inner ring, which reduces the working radial clearance and redistributes the axial load between rolling elements, in some cases increasing the clamping force to the most loaded element. The problem of contact between a bearing ring and a cylindrical roller is solved, and the stresses in the ring under the contact surface is determined. It is shown that with the increase of the clamping force the dangerous region of high stresses is shifted to the depth of the ring, contributing to the nucleation of fatigue subsurface defects.

Key words: roller bearing, hydrogen degradation of metal, Stribeck coefficient, contact stresses.

REFERENCES

[1] Alexander Stopher, M., Rivera-Diaz-del-Castillo, P.E.J. Hydrogen embrittlement in bearing steels. 2016. Materials Science and Technology. 32(11), pp. 1184-1193. DOI: 10.1080/02670836.2016.1156810.
[2] Wei, X., Li, X. Early failure analysis of automobile generator bearing. 2024. Engineering Failure Analysis. 159, 108124.
[3] Enami, K., Yamada, H., Komata, H. Hydrogen generation from lubricant under rolling-sliding contact. 2024. Tribology Online. 19(4), pp. 298-307. DOI: 10.2474/trol.19.298.
[4] Vegter, R.H., Slycke, J.T. The Role of Hydrogen on Rolling Contact Fatigue Response of Rolling Element Bearings. 2010. ASTM International. 7, 102543. DOI: 10.1520/JAI102543.
[5] Harling, J.C., Jacobs, G., Lehmann, B. Chemical factors for premature failures of roller bearings in wind turbines due to white etching cracks: A review from literature and industry experience. 2024. Journal of Physics: Conference Series. 2767(4), 042015.
[6] Khader, I., Kürten, D., Kailer, A. The influence of mechanical stresses on the diffusion and accumulation of hydrogen in a cylindrical roller thrust bearing. 2020. Bearing World Journal. 5, pp. 81-91.
[7] Zinovieva, T.V., Galyautdinova, A.R. Hydrogen distribution inside the bearing ring under the influence of interference and shaft rotation. Modern mechanical engineering: Science and education. 2023. pp. 191-203. (rus.).
[8] Zinovieva, T.V., Galyautdinova, A.R. Hydrogen Degradation of Material of a Bearing Ring Fitted on a Rotating Shaft. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 66–76. DOI: 10.1007/978-3-031-48851-1_7.

[9] Zinovieva, T.V. Modeling of the initiation conditions of cracks in a pipe under pressure of a hydrogenous medium. 2023. PNRPU Mechanics Bulletin. 3, pp. 86-96. (rus.)
[10] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. On the effect of hydrogen corrosion on the vibrations of the pipe as a multilayer cylindrical shell. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 334-347. (rus.)
[11] Eliseev, V.V. Mechanics of Deformable Solids. 2003. St. Petersburg, Polytechnic University Press. 336 p. (rus.)
[12] Stribeck, R. Ball bearings for various loads. 1907. Trans ASME. 29, pp. 420-463.
[13] Palmgren, A. Ball and Roller Bearing Engineering. SKF Industries, Philadelphia, PA, USA. 1959.
[14] Oswald, F.B., Zaretsky, E.V., Poplawski, J.V. Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings. 2012. Tribology Transactions. 55(2), pp. 245–265. DOI: 10.1080/10402004.2011.639050
[15] Ren Xiaoli, Zhai Jia, Ren Ge. Calculation of radial load distribution on ball and roller bearings with positive, negative and zero clearance. 2017 – International Journal of Mechanical Sciences. 131–132, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.06.042.
[16] Tomovi´c, R. A New Approach for the Load Calculation of the Most-Loaded Rolling Element of the Rolling Bearing with Internal Radial Clearance–A Case Study. 2022. Lubricants. 10(11), 306. DOI: 10.3390/lubricants10110306.
[17] International Standard ISO-76:2017; Rolling Bearings–Static Load Ratings. International Standards Organizations: Geneva, Switzerland. 2017.
[18] Birger, I.A., Panovko, Ya.G. Strength, stability, vibrations. Handbook in three volumes, V. 2. M.: Mashinostroenie. 1968. 464 p. (rus.)
[19] Johnson, K.L. Contact Mechanics. Cambridge University Press. 1985.
[20] Novackij, V. Theory of elasticity. M.: Mir. 1975. 872 p. (rus.)
[21] Green, I. Poisson Ratio Effects on the Von Mises and Maximum Shear Stresses in Cylindrical Contacts. 2005. Int. J. of Applied Mechanics and Engineering. 10(3), pp. 451-462.
[22] Kundu, T. Fundamentals of Fracture Mechanics. CRC Press, Boca Raton. 2008.
[23] McEvily, A.J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2013.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.1.051
doi:10.18720/SPBPU/2/id-106

И.О. Иванов[1], М.С. Ананьевский[2], С.Ю. Керпелева[3], М.В. Абрамчук[4]

РАЗРАБОТКА ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ БПЛА



[1]Илья Олегович Иванов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 900 996-53-59, E-mail: ilyagriff11@gmai.com



[2]Михаил Сергеевич Ананьевский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петебург
Тел.: +7 911 765-01-00, E-mail: msaipme@ya.ru.



[3]Светлана Юрьевна Керпелева,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 921 926-34-62, E-mail:svetlana.yu.perepekina@gmail.com.



[4]Михаил Владимирович Абрамчук,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 905 275-51-86, E-mail: amv76@list.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с проектированием гироскопического стенда для проведения испытаний беспилотных летательных аппаратов. Стенд представляет собой универсальную площадку для испытаний как беспилотных летательных аппаратов, предложенных на рынке, так и для самостоятельно сконструированных приборов. Спроектированное устройство позволяет испытать не только конструктивные особенности, но и алгоритмы управления БПЛА.

Ключевые слова: испытательный стенд, беспилотные летательные аппараты.

Введение

На сегодняшний день наблюдается стремительное развитие технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Они находят все более широкое применение в различных сферах, таких как: гражданская авиация, охрана окружающей среды, сельское хозяйство и оборонная промышленность [1, 2, 5]. В связи с повышением требований к надежности, безопасности и высокой функциональности БПЛА появляются новые задачи по созданию более совершенных и инновационных систем.

Одной из ключевых составляющих процесса разработки и усовершенствования БПЛА является создание испытательных стендов, позволяющих проводить всесторонние тестирования и испытания различных компонентов и систем беспилотных летательных аппаратов в контролируемых условиях [3]. Подобные испытательные стенды позволяют оценить эксплуатационные характеристики БПЛА, надежность, на ранних этапах разработок, что позволит сократить издержки при последующем производстве, и также при проведении летных испытаний.

На данный момент существует множество стендов для динамических испытаний квадрокоптеров. К ним относятся: температурные и климатические стенды, вибростенды, стенды для усталостных испытаний, имитаторы движения, комбинированные стенды и др. Гироскопические испытательные стенды можно отнести к комбинированным, т. к. при создании можно учесть возможности испытаний по различным параметрам [6 ,7].

Гироскопические испытательные установки являются неотъемлемой частью разработки и тестирования БПЛА. Они обеспечивают получение точных данных при проведении контролируемых полетных испытаний. Стандартная процедура тестирования квадрокоптера представляет собой анализ поведения дрона с различными скоростями и характеристиками тяги. Используются тесты барометра и компаса, встроенных в полетный контроллер, с помощью PID настройки (пропорционально-интегрально-производная настройка). [8, 9]. Гироскопический испытательный стенд позволит получать точные результаты в надежных и безопасных условиях, без использования летных площадок. Тестирование в контролируемых условиях помогает усовершенствовать работу БПЛА, а также позволяет выполнять тренировочную функцию для пилотов, контролирующих полеты квадрокоптеров.

Целью работы является проектирование малогабаритного испытательного стенда для использования в том числе, и в учебном процессе.

На данный момент существует множество испытательных стендов для БПЛА в различных вариантах. Стенды имеют различные конструкции и возможности измеряемых величин. Это стенд ООО «Прикладная робототехника», не относящийся к гироскопическим, однако позволяющий обеспечить перемещение дрона относительно трех линейных направлений [10]. Возможность линейных перемещений позволяет в реальном времени наблюдать за поведением квадрокоптера в различных полетных условиях, что значительно повышает точность анализа его характеристик. Положения квадрокоптера в стенде определяется при помощи линейных датчиков положения.

Тестовый стенд для БПЛА от компании BROTHERHOOD, предназначенный для тестирования квадрокоптеров в контролируемых условиях, не требуя выезда на летный полигон. Помимо тестирования, установка может быть применена для обучения и тренировки будущих пилотов БПЛА. К недостаткам данного испытательного стенда также можно отнести отсутствие измерений любого рода данных, что сильно уменьшает его функциональность. Измерение углов наклона подвеса, векторов и подъемной силы не предусмотрено в данной установке. Единственными данными для анализа исправной работы беспилотника являются данные, непосредственно получаемые с испытуемого БПЛА. [11].

Стенд, описанный в патенте [12]. Данный стенд относится к категории испытательных машин для комплексных испытаний и тестирования БПЛА мультироторного типа.

Устройство для испытаний обеспечивает вращение БПЛА на 360 градусов в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволяет полностью имитировать различные полетные режимы, расширяя возможности проведения испытаний.

Конструкция стенда характеризуется компактностью и малым количеством деталей, что упрощает процессы изготовления и сборки. Для изготовления стенда возможно использование металла, с применением как обычного, так и литьевого прессования, а также современные технологии, такие как трехмерная печать. Однако для создания данной конструкции требуется соблюдение высокой точности изготовления комплектующих, а также точный расчет всех составляющих испытательного стенда, в особенности резиновых лент, которые выполняют роль фиксации установки в начальном положении.

Данная установка позволяет проводить проверку максимальной полезной грузоподъемности летательного аппарата [12]. К недостаткам данной конструкции относится невозможность измерения углов наклона подвеса квадрокоптера и его векторов, что необходимо предусмотреть в

рамках данной работы. Кроме того, система не представляет собой гироскопическую, что тоже является отрицательным аспектом.

Особый интерес представляет стенд, собранный в Самарском Университете (рис. 1) [13].

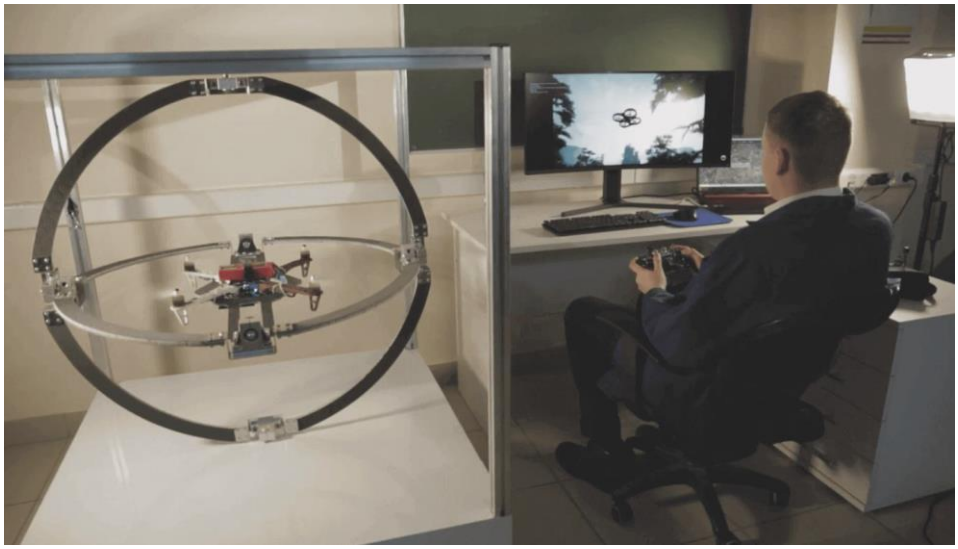


Рис. 1. Гироскопический стенд Самарского университета

Конструкция представляет собой каркас в форме куба с массивной нижней частью, выполняющей роль фундамента для обеспечения устойчивости системы. Каркас состоит из профильных алюминиевых труб, скрепленных между собой соединением «болт-гайка», что обеспечивает удобную сборку установки.

Испытательный стенд оснащен хорошо спроектированной гироскопической системой, состоящей из двух колец, вращающихся вокруг двух различных осей. Вращение вокруг третьей оси осуществляется за счет вращения пластины, к которой непосредственно крепится квадрокоптер. Также было заявлено, что данная конструкция способна полностью имитировать реальный полет БПЛА, включая вибрации и динамические изменения. Данный испытательный стенд может получать все необходимые по заданию данные, что обеспечивает высокую точность изучения поведения БПЛА.

Однако конструкция не оснащена защитными щитами или сетками, что может привести к повреждениям дрона и создать опасность для работников, находящихся поблизости. Кроме того, было установлено, что крепление вращающейся пластины имеет только одно фиксированное положение, что исключает возможность смещения центра масс дрона.

Результаты

Итоговая система представляет собой гироскопическую систему подвеса квадрокоптера. Каркас данной системы выполнен в форме куба с ребром 1 метр. Данный куб имеет систему жесткого крепления и выдерживает 5 кг подъемной силы без движения. Предусмотрена возможность установки на куб защитных сеток или экранов для предотвращения вылета дрона за пределы испытательной зоны.

На рисунке 2 представлена разработанная конструкция испытательного стенда.

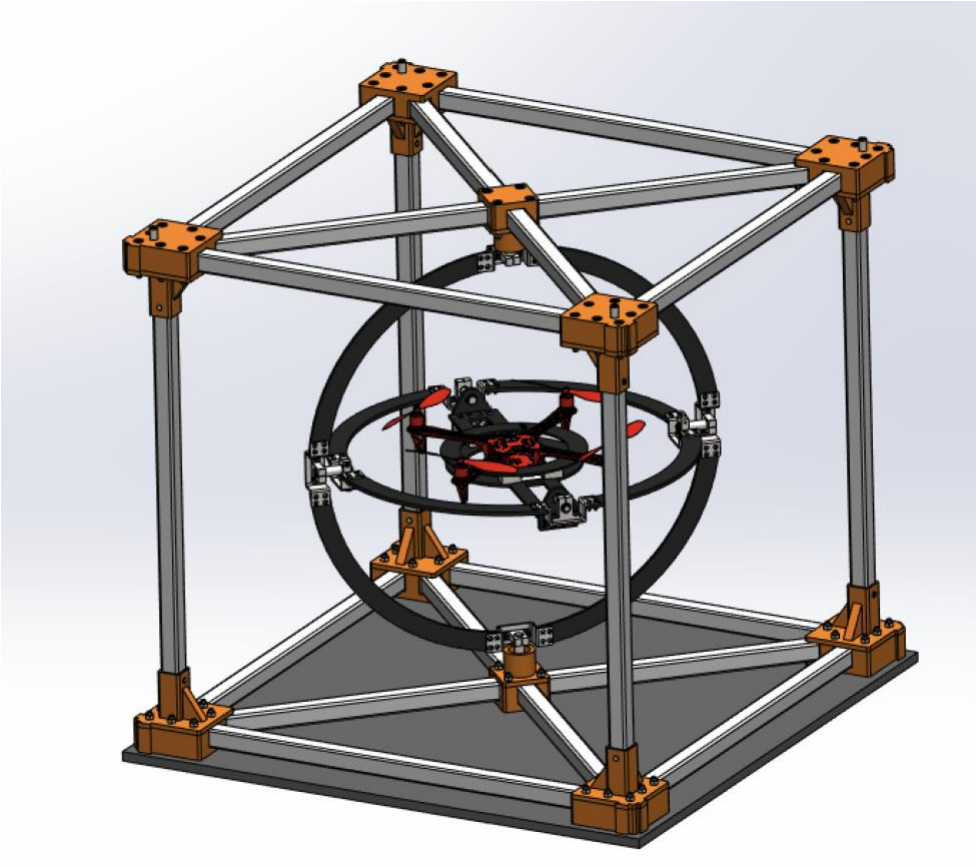


Рис. 2. Конструкция испытательного стенда для БПЛА

В каркасе крепится гироскопическая система, в которой будет зафиксирован квадрокоптер. Гироскопическая система обеспечивает вращение дрона вокруг трех осей. Данная система также обеспечивает ориентацию в пространстве и поддержание угловой скорости. В основе работы данной системы лежит гироскопический эффект. [4]. Принцип заключается в том, что ось вращающегося объекта стремится сохраняться свое направление в пространстве, даже в случае внешний воздействий. Благодаря гироскопической системе испытательный стенд позволит в реальном времени производить настройки управления квадрокоптером,

менять алгоритмы управления и проводить пробные контролируемые полеты. [2, 4]. Вращение вокруг трех осей обеспечивается за счет подшипниковых узлов. Вращение большего кольца обеспечивается при помощи радиально-упорных подшипников, а вращение оставшихся двух колец при помощи игольчатых подшипников, в связи с тем, что они имеют меньшие габариты и предназначены для вращений при сравнительно небольших скоростях.

Гироскопическая система крепится к каркасу при помощи соединительных конструкций, скрепляемых соединением «болт-гайка». Первый подшипниковый узел будет находиться в данных соединительных конструкциях.



Рис. 3. Каркасная конструкция с надетыми защитными сетками

Для возможности точного и качественного тестирования БПЛА, в конструкции гироскопической системы необходимо предусмотреть возможность измерения углов наклона подвеса квадрокоптера, вектора и подъемной силы. Для измерения углов наклона подвеса квадрокоптера и его вектора будут использоваться модули пространственной ориентации IMU MPU-9250 (гироскоп, акселерометр, магнитометр) [14], а для измерения подъемной силы – тензорезисторный датчик Т24А [15]. Их крепление будет осуществляться непосредственно во вращающемся узле, к которому крепится БПЛА, для обеспечения необходимой точности измерения.

Материалы для изготовления какркаса и для крепежных узлов были выбраны алюминий АД31Т1 и сталь 25 в связи с их технологичностью и прочностными характеристиками.

Для элементов гироскопической системы, представленных в конструкции был выбран полимерный композит с углеродным наполнителем для облгечения конструкции.

В случае неконтролируемого полета дрона, открепившегося от гироскопической системы, тот будет остановлен рамой с сетью (рис. 3) из капроновой ткани. Таким образом квадрокоптер будет остановлен с меньшими повреждениями.

Заключение

Спроектированный стенд представляет собой гироскопическую систему подвеса квадрокоптера. Каркас данной системы выполнен в форме куба с ребром 1 метр. Спроектированный стенд позволит проводить испытания БПЛА без необходимости задействования летных полигонов. На стенде будут проводиться испытания БПЛА с точки зрения как конструктивных особенностей, а также и управления.

Стенд будет использоваться для научных исследований, а также в учебном процессе при полголовки студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Рынок БПЛА в России: развитие и перспективы [Электронный ресурс] // Московский государственный университет геодезии и картографии. URL: https://www.miigaik.ru/about/news/5832/?sphrase_id=508864 (дата обращения: 04.12.2024).

[2] Технология испытания дронов [Электронный ресурс] // MMCUAV. URL: https://www.mmcuav.com/ru/technologies/drone-testing-technology/ (дата обращения: 04.12.2024).

[3] Тарасов Я.О. Квадрокоптеры: проектирование, конструирование и испытания // Киберленинка. 2023. Вып. 5. С. 21–27.

[4] Испытания квадрокоптеров на гироскопических стендах [Электронный ресурс] // Московский Технический Университет Связи и Информатики. URL: https://mtuci.ru/science/tsentr_transfera_tekhnologiy/services_and_developments/detail.php?id=8346&utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 06.12.2024).

[5] Кузнецов Г.А., Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. №9 (81). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/retrospektivnyy-analiz-sovremennoe-sostoyanie-i-tendentsii-razvitiya-otechestvennyh-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov

[6] Каримов А.Х. Возможности беспилотных авиационных систем следующего поколения // Электронный журнал «Труды МАИ».

Выпуск № 47 // Московский авиационный институт URL: https://mai.ru/upload/iblock/020/vozmozhnosti-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-sleduyushchego-pokoleniya.pdf
[7] Kraev V.M., Siluyanova M.V., Tikhonov A.I. Creation of supersonic civil aviation in Russia // Russian Engineering Research. 2020. T. 40. № 9. C. 755-758.
[8] Paweł Ćwiąkała. Testing Procedure of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Trajectory in Automatic Missions August 2019. Applied Sciences 9(17): 3488 DOI: 10.3390/app9173488.
[9] Marius Boshoff, Gustavo Barros, Bernd Kuhlenkötter. Performance measurement of unmanned aerial vehicles to suit industrial applications. November 2024Production Engineering 18(6). DOI: 10.1007/s11740-024-01313-y.
[10] Учебный стенд для отработки навыков управления квадрокоптером [Электронный ресурс] // Robot Geeks. URL: https://mtuci.ru/science/tsentr_transfera_tekhnologiy/services_and_developments/detail.php?id=8346&utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (дата обращения: 07.12.2024).
[11] Тестовый стенд для БПЛА 10 дюймов [Электронный ресурс] // BROTHERHOOD. URL: https://brother-hood.com.ua/ua/p2095783403-testovyj-stend-dlya.html (дата обращения: 07.12.2024).
[12] RU 2862664 C1. Стенд для комплексного тестирования и настройки систем беспилотного летательного аппарата мультироторного типа / Сущенко Д.О., Болясов Д.А. Опубл. 16.09.2024. Бюл. №26. МО, г. Балашиха.
[13] Самарские ученые разработали уникальный тренажер, который упростит и ускорит обучение пилотов БПЛА [Электронный ресурс] // Самарский Университет. URL: https://ssau.ru/news/18853-samarskie-uchenye-razrabotali-unikalnyy-trenazher-kotoryy-uprostit-i-uskorit-obuchenie-pilotov-bpla (дата обращения: 07.12.2024).
[14] iArduino.ru: [сайт]/учредитель ООО «iArduino». – Москва, 2013. Обновляется в течение суток. – URL: https://iarduino.ru/shop/Sensory-Datchiki/mpu-9250-9dof-giroskop-akselerometr-kompas.html (дата обращения: 06.12.2024). 6. Tenso-m.ru: [сайт]/учредитель ООО «Тензо-М». – Санкт-Петербург, 2024. Обновляется в течение суток. – URL: https://spb.tenso-m.ru/tenzodatchiki/single-point/85/ (дата обращения: 06.12.2024).
[15] Tenso-m.ru: [сайт]/учредитель ООО «Тензо-М». – Санкт-Петербург, 2024. Обновляется в течение суток. – URL: https://spb.tenso-m.ru/tenzodatchiki/single-point/85/ (дата обращения: 06.12.2024).

I.O.Ivanov[1], M.S.Ananyevskij[2], S.Yu.Kerpeleva[3], M.V.Abramchuk[4]

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

[1,2,3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[4]ITMO University, Russia.

Abstract

The paper considers issues related to the design of a gyroscopic test bench for testing unmanned aerial vehicles. The bench is a universal testing platform for both UAVs offered on the market and for self-designed devices. The designed device allows testing not only the design features, but also the control algorithms of the UAV.

Keywords: test bench, unmanned aerial vehicles.

REFERENCES

[1] The UAV market in Russia: development and prospects [Electronic resource] // Moscow State University of Geodesy and Cartography. URL: https://www.miigaik.ru/about/news/5832/?sphrase_id=508864 (date of access: 04.12.2024).
[2] Drone testing technology [Electronic resource] // MMCUAV. URL: https://www.mmcuav.com/ru/technologies/drone-testing-technology/ (date of access: 04.12.2024).
[3] Tarasov Ya.O. Quadcopters: design, construction and testing // Cyberleninka. 2023. Issue 5. Pp. 21–27.
[4] Testing quadcopters on gyroscopic stands [Electronic resource] // Moscow Technical University of Communications and Informatics. URL: https://mtuci.ru/science/tsentr_transfera_tekhnologiy/services_and_developments/detail.php?id=8346&utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (accessed: 06.12.2024).
[5] Kuznetsov G.A., Kudryavtsev I.V., Krylov E.D. Retrospective analysis, current state and development trends of domestic unmanned aerial vehicles // Engineering Journal: Science and Innovation. 2018. No. 9 (81). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/retrospektivnyy-analiz-sovremennoe-sostoyanie-i-tendentsii-razvitiya-otechestvennyh-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov
[6] Karimov A.Kh. Capabilities of Next-Generation Unmanned Aircraft Systems // Electronic Journal "Proceedings of MAI". Issue No. 47 //

Moscow Aviation Institute URL: https://mai.ru/upload/iblock/020/vozmozhnosti-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-sleduyushchego-pokoleniya.pdf
[7] Kraev V.M., Siluyanova M.V., Tikhonov A.I. Creation of Supersonic Civil Aviation in Russia // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. No. 9. P. 755-758.
[8] Paweł Ćwiąkała. Testing Procedure of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Trajectory in Automatic Missions August 2019. Applied Sciences 9(17): 3488 DOI: 10.3390/app9173488.
[9] Marius Boshoff, Gustavo Barros, Bernd Kuhlenkötter. Performance measurement of unmanned aerial vehicles to suit industrial applications. November 2024Production Engineering 18(6). DOI: 10.1007/s11740-024-01313-y.
[10] Training rig for practicing quadcopter control skills [Electronic resource] // Robot Geeks. URL: https://mtuci.ru/science/tsentr_transfera_tekhnologiy/services_and_developments/detail.php?id=8346&utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (accessed: 07.12.2024).
[11] Test stand for 10-inch UAV [Electronic resource] // BROTHERHOOD. URL: https://brother-hood.com.ua/ua/p2095783403-testovyj-stend-dlya.html (accessed: 07.12.2024).
[12] RU 2862664 C1. Stand for complex testing and adjustment of multirotor unmanned aerial vehicle systems / Sushchenko D.O., Bolyasov D.A. Published 16.09.2024. Bulletin No. 26. MO, Balashikha.
[13] Samara scientists have developed a unique simulator that will simplify and speed up the training of UAV pilots [Electronic resource] // Samara University. URL: https://ssau.ru/news/18853-samarskie-uchenye-razrabotali-unikalnyy-trenazher-kotoryy-uprostit-i-uskorit-obuchenie-pilotov-bpla (date of access: 07.12.2024).
[14] iArduino.ru: [website]/founder of iArduino LLC. - Moscow, 2013. Updated within 24 hours. – URL: https://iarduino.ru/shop/Sensory-Datchiki/mpu-9250-9dof-giroskop-akselerometr-kompas.html (date of access: 06.12.2024). 6. Tenso-m.ru: [website]/founder Tenso-M LLC. – St. Petersburg, 2024. Updated within 24 hours. – URL: https://spb.tenso-m.ru/tenzodatchiki/single-point/85/ (date of access: 06.12.2024).
[15] Tenso-m.ru: [website]/founder of Tenso-M LLC. – Saint Petersburg, 2024. Updated within 24 hours. – URL: https://spb.tenso-m.ru/tenzodatchiki/single-point/85/ (date accessed: 06.12.2024).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 531.395
doi:10.18720/SPBPU/2/id-107

Р.М. Киселев

ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА ММГ, ВЫЗВАННОЕ ОТКЛОНЕНИЯМ ЕГО ГЕОМЕТРИИ



Роман Михайлович Киселев,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: (499) 263-68-34, E-mail: kiselev.rom@bmstu.ru.

Аннотация

Одним из важных элементов современных мехатронных и робототехнических систем являются датчики [1, 2]. Большой интерес представляет вопрос проектирования малогабаритных датчиков угловых скоростей, которые широко применяются в различных областях промышленности [3, 4]. Среди огромного разнообразия датчиков угловых скоростей в последние годы всё большее внимание уделяется проектированию микромеханических гироскопов (ММГ). Основной проблемой ММГ является высокая зависимость качественных показателей от отклонений геометрических и физических параметров резонатора [5]. В работе рассмотрены вопросы определения расщепления собственных частот колебаний кольцевых резонаторов ММГ, вызванных малым отклонением радиуса срединной поверхности резонатора. В качестве результата работы предлагается энергетический метод вычисления собственных частот колебаний кольцевого резонатора, адаптированный к геометрическим отклонениям. По итогам расчета показано, что наибольшее расщепление собственной частоты вызывается 2 и 4 гармоники отклонения радиуса.

Ключевые слова: кольцевой гироскоп, микромеханический гироскоп, кольцевой резонатор, расщепление собственных частот

Введение

Гироскопы – класс устройств способных реагировать на изменение углов ориентации тела относительно инерциальной системы отсчета. Гироскопы нашли обширное применение в различных областях промышленности. Огромную роль гироскопы играют в системах наведения и навигации. На данный момент громоздкие гироскопы на базе гироскопов Фуко ушли в прошлое, а их место заняли миниатюрные лазерные, волокно-оптические, электростатические, ядерные, микромеханические, твердотельные и другие виды гироскопов [3].

Среди различных видов гироскопов стоит выделить твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) и, базирующиеся на них, микромеханические гироскопы (ММГ). Данные гироскопы обладают рядом преимуществ, главным из которых является простота, ММГ состоят всего лишь из 4 элементов (рис. 1): 1 – резонатор, 2 – крепления (ламели), 3 – система электродов позиционного возбуждения, 4 – система датчиков перемещения. ММГ относительно просты в изготовлении, резонатор и крепления как правило изготавливаются методом химического травления стекла или кремния, что позволяет автоматизировать процесс производства. В сравнении с аналогами ММГ также выделяются сравнительно небольшой ценой [6].

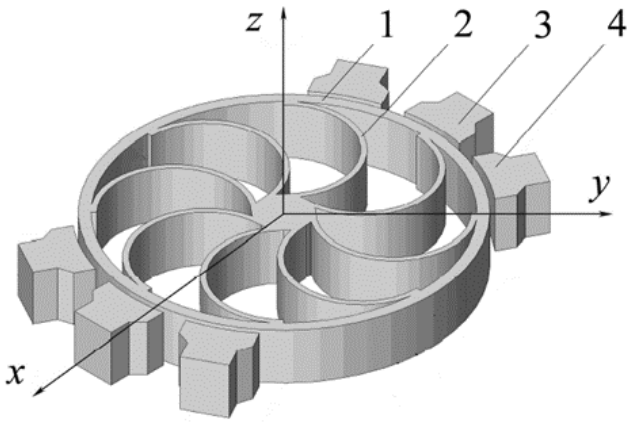


Рис. 1. Микромеханический гироскоп с кольцевым резонатором

Однако, ММГ обладают также рядом недостатков в сравнении с аналогами и прежде всего лазерными гироскопами, работа прибора очень сильно чувствительна к различного рода дефектам (дефекты массы, геометрии, погрешность возбудителей колебаний [7, 8]), а также к эффектам демпфирования (газовое демпфирование, термоэластическое демпфирование, демпфирование Акхайзера, Анкерное демпфирование и др. [9]). Не смотря на большое количество проблем во многих работах высказывается мнение о том, что при должном анализе влияния различного

рода дефектов на работу устройства задача предсказания поведения устройства при дефектах и задача уменьшения влияния дефектов на работу является реальной, а как следствие мы можем получить устройство с высокой точностью работу соизмеримой с более дорогими аналогами [10]. Для повышения точности работы прибора проводят оценку его работу, а затем балансировку в соответствии с известными на данный момент моделями влияния дефектов на прибор. Существует множество работ, посвященных анализу влияния дефектов на работу ММГ, однако стоит отметить, что многие явления до сих пор является малоизученными и слабо предсказуемыми (до сих пор не существует достоверно подтвержденной математической модели, описывающей анкерное демпфирование), также не существует единого метода оценки влияния дефектов, как правило влияния дефектов оцениваются по отдельности без учета их взаимного влияния друг на друга, в связи с этим исследование вопросов о влияние различных дефектов и демпфирующих явлений на работу ММГ по сей день остается актуальной и крайне востребованной.

Методы

Итак, как уже было сказано в данной работе предлагается рассмотреть расщепление собственных частот, вызванной отклонениям геометрических параметров. В качестве математической модели, описывающей динамику кольцевого резонатора, была выбрана кольцевая модель, описанная в работе [11]. Расчетная схема модели представлена на рис. 2.

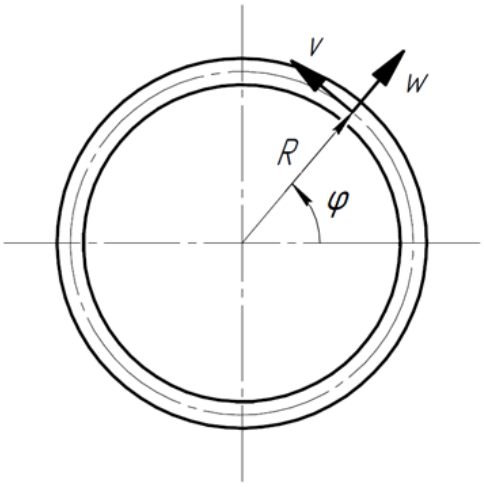


Рис. 2. Расчетная схема кольцевой модели

Однако, данная модель требует определенной доработки. Для кольцевой модели можно задаться только одним видом геометрических дефектов – дефект радиуса. Представим функцию радиуса в виде:

$$R(\varphi) = R_0 + \Delta R(\varphi), \quad (1)$$

где R_0 – радиуса срединной линии идеального резонатора (средний радиус неидеального резонатора), $\Delta R(\varphi)$ – отклонение радиуса.

Отклонение радиуса от среднего радиуса можно представить в виде ряда:

$$\Delta R(\varphi) = \sum_{m=1}^{n} R_m \cos(m\varphi), \tag{2}$$

где m – номер гармоники дефекта радиуса, R_m – амплитуда дефекта радиуса.

Получим условие нерастяжимости некругового кольца и выражение для кривизны в соответствии с общей теорией оболочек [12]. Зададим геометрию некругового кольца в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} x(\varphi) = R(\varphi)\cos(\varphi) \\ y(\varphi) = R(\varphi)\sin(\varphi) \end{cases} \tag{3}$$

Масштабный коэффициент (параметр Ламе) можно определить по формуле:

$$A = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2} \tag{4}$$

С учетом (3) выражение (4) принимает вид:

$$A = \sqrt{R_0^2 + 2R_0 + 2\Delta R^2 + \left(\frac{d\Delta R}{d\varphi}\right)^2} \tag{5}$$

Орт касательной:

$$\bar{t} = \frac{1}{A}\frac{dx}{d\varphi}\bar{\imath} + \frac{1}{A}\frac{dy}{d\varphi}\bar{\jmath} \tag{6}$$

Орт нормали:

$$\bar{n} = \frac{1}{A}\frac{dy}{d\varphi}\bar{\imath} - \frac{1}{A}\frac{dx}{d\varphi}\bar{\jmath} \tag{7}$$

Орт нормали и касательной связаны соотношением:

$$\bar{n}\varkappa = \frac{1}{A}\frac{d\bar{t}}{d\varphi}, \tag{8}$$

где $\varkappa$ – кривизна.

Тогда кривизна будет определяться выражением:

$$\varkappa = \sqrt{\left(\frac{d}{Ad\varphi}\left(\frac{dx}{Ad\varphi}\right)\right)^2 + \left(\frac{d}{Ad\varphi}\left(\frac{dy}{Ad\varphi}\right)\right)^2} \tag{9}$$

С учетом линеаризации выражения (9) получим выражения для кривизны:

$$\varkappa = \frac{1}{{R_0}^3}[\frac{dW}{d\varphi}\frac{d\Delta R}{d\varphi} - R_0\frac{\mathrm{d}^2W}{\mathrm{d}\varphi^2} + 2\Delta R\frac{\mathrm{d}^2W}{\mathrm{d}\varphi^2} +$$

$$+W\left(-R_0 + 2\Delta R + 2\frac{\mathrm{d}^2\Delta R}{\mathrm{d}\varphi^2}\right) - V\left(\frac{d\Delta R}{d\varphi} + \frac{\mathrm{d}^3\Delta R}{\mathrm{d}\varphi^3}\right)] \quad (10)$$

Запишем условие нерастяжимости некругового кольца [13]:

$$\frac{\partial V}{A\partial\varphi} + \frac{W}{R} = 0 \quad (11)$$

Путем подстановки выражений (1) и (5) в (11), а также последующей линеаризации получим, условие нерастяжимости некругового кольца в виде:

$$\frac{\partial V}{R_0\partial\varphi} + \frac{W}{R_0} - \frac{W\Delta R}{{R_0}^2} - \frac{\Delta R}{{R_0}^2}\frac{\partial V}{\partial\varphi} - \frac{W}{{R_0}^2}\frac{\mathrm{d}^2\Delta R}{\mathrm{d}\varphi^2} = 0 \quad (12)$$

Выразим из (12) функцию перемещений W:

$$W = \frac{-R_0\frac{\partial V}{\partial\varphi} + \Delta R\frac{\partial V}{\partial\varphi}}{R_0 - \Delta R - \frac{\mathrm{d}^2\Delta R}{\mathrm{d}\varphi^2}} \quad (13)$$

Упростим (13) с учетом $\Delta R \ll R_0$:

$$W = \left(-\frac{\partial V}{\partial\varphi} + \frac{\Delta R}{R_0}\frac{\partial V}{\partial\varphi}\right)\left(1 - \frac{\Delta R}{R_0} - \frac{1}{R_0}\frac{\mathrm{d}^2\Delta R}{\mathrm{d}\varphi^2}\right) \quad (14)$$

Далее воспользуемся преобразованиями аналогичными работе []. Представим функция осевых перемещений V в виде:

$$V(\varphi, t) = \tilde{V}(\varphi)\cos(pt), \quad (15)$$

где p – собственная частот колебаний системы.

Разложим составляющую, зависящую от φ в ряд Фурье:

$$\tilde{V}(\varphi) = \tilde{V}_0 + \sum_{i=1}^{k}\tilde{V}_{ic}\cos(\mathrm{i}\varphi) + \tilde{V}_{is}\sin(\mathrm{i}\varphi) \quad (16)$$

Запишем вектор параметров:

$$\{Y\} = \begin{pmatrix} \tilde{V}_0 \\ \tilde{V}_{1\mathrm{c}} \\ \tilde{V}_{1s} \\ \dots \\ \tilde{V}_{k\mathrm{c}} \\ \tilde{V}_{ks} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Кинетическая энергия колебаний кольцевого резонатора:

$$T = \frac{S\rho}{2}\int_0^{2\pi} A\left(\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)^2\right)d\varphi\,, \tag{18}$$

где S – площадь поперечного сечения резонатора, ρ – плотность материала резонатора.

Потенциальная энергия упругих деформаций:

$$U = \frac{I_x}{2}\int_0^{2\pi} EA\varkappa^2 d\varphi\,, \tag{19}$$

где I_x – момент инерции поперечного сечения резонатора.

Далее будем рассматривать амплитудные значения кинетической и потенциальной энергий, выразив их через вектор параметров (17):

$$\begin{cases} \tilde{T} = \dfrac{1}{2}p^2\{Y\}^T[M]\{Y\} \\ \widetilde{U} = \dfrac{1}{2}\{Y\}^T[K]\{Y\} \end{cases}, \tag{20}$$

где $[M]$ – матрица масс, $[K]$ – матрица жесткости.

Определим элементы матриц масс и жесткости:

$$\begin{cases} M_{ij} = \dfrac{d^2\tilde{T}}{dY_i dY_j}\dfrac{1}{p^2} \\ K_{ij} = \dfrac{d^2\widetilde{U}}{dY_i dY_j} \end{cases} \tag{21}$$

Тогда можно определить собственные частоты колебаний резонатора из условия экстремальности функционала полной энергии системы [14]:

$$|[K] - p^2[M]| = 0 \tag{22}$$

Используя замену $\lambda = \mathrm{p}^2$ приходим к задаче на собственные значения [15], решением которой являются пары минимальных и максимальных значений собственных частоты:

$$|[K] - \lambda[M]| = 0 \tag{23}$$

Решениями уравнения (23) являются пары собственных частот, по которым можно определить искомое относительно расщепление собственных частот:

$$\psi = \frac{p_{max} - p_{min}}{p_0}\,, \tag{24}$$

где p_0 – средняя собственная частота колебаний.

Результаты

На основе, описанной методике была написана программа для расчета в среде MATlab. Программа была отлажена в соответствии с известным аналитическим решением [13] для идеального кольца. Аналогичное решение было получено энергетическим методом, первая ненулевая собственная частот колебаний кольцевого резонатора:

$$p = \sqrt{\frac{36}{5}\frac{EI_x}{\rho S R^4}} \tag{25}$$

Далее были рассмотрены случаи наличия одной гармоники дефекта радиуса:

$$\Delta R(\varphi) = R_m \cos(m\varphi) \tag{26}$$

Для расчета был выбран резонатор с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. Параметры кольцевого резонатора

Параметр	Значение
Радиус срединной окружности, мм	20
Ширина поперечного сечения кольца, мм	0.5
Высота поперечного сечения кольца, мм	3
Плотность, кг/м^3	2210
Модуль Юнга, Па	$7 \cdot 10^{10}$
Амплитуда гармоник дефектов плотности, кг/м^3	22.1
Амплитуда гармоник дефектов модуля упругости, Па	$7 \cdot 10^{8}$
Амплитуда гармоник дефектов радиуса, мм	0.2

Расчет был проведен для гармоник дефекта радиуса $m = 1 \ldots 10$. Для всех гармоник, кроме 2 и 4 значение расщепление собственных частот оказалось пренебрежимо мало. Для четвертой гармоники дефекта плотности расщепление составило:

$$\psi_4 = 3.125\frac{R_4}{R_0} \tag{27}$$

Для второй гармоники дефекта плотности расщепление составило:

$$\psi_2 = 0.051\frac{R_4}{R_0} \tag{28}$$

Также был проведен расчет для комбинации второй и четвертой гармоники дефекта плотности, расщепление составило:

$$\psi = 3.077\frac{R_4}{R_0} \quad (29)$$

Обсуждение

Как мы видим из выражение (25) энергетический метод позволяет получить точное решение для собственных частот идеальной кольцевой модели.

Выражение расщепления собственной частоты для четвертой гармоники (27) с небольшой погрешностью соответствует известному решению, приведенному в работе [16].

Выражение расщепления собственной частоты для второй гармоники (28) не соответствует известному решению, приведенному в работе [16].

Данное расхождение вероятно связано с существенным допущениями, принятыми в работе [16], поскольку решение [16] является полностью линеаризованным, что делает его более приближенным, чем описанное в данной работе, а также с учетом того, что в работе [11] доказана высокая точность энергетического метода при исследовании других видов дефектов. Однако, данное утверждение требует более глубокое изучение данного вопроса путем проверки решения альтернативными методами, например, методом конечных элементов [17, 18].

Выражение (29) позволяет предположить в первом приближении линейную зависимость между расщепления гармоник дефекта радиуса, т.е. возможность определения полного расщепления собственной частоты, как алгебраической суммы расщепления собственных частот от отдельных дефектов. Данное утверждение также требует дальнейшей проверки.

Заключение

Была описана модификация известного энергетического метода вычисления собственных частот колебаний кольцевого резонатора ММГ. В первом рассмотрении метод показал схождение с известным решением альтернативным методом и возможность применения для решения практических задач вычисления расщепления собственных частот колебаний, вызванных малым отклонением геометрии.

Описанная математическая модель может быть использована для моделирования динамики неидеального резонатора и использована за основу для развития методов балансировки резонаторов по критерию уменьшения расщепления собственных частот, вызванных возмущением геометрии [19].

Методы, описанные в представленной работе, могут апробированы для решения аналогичных задач в будущем, например, рассмотрения комбинаций различных видов дефектов энергетическим методом.

В дальнейшем автором планируется более глубокое рассмотрение, описанного метода для решения комбинированных задач расчета расщепления собственных частот колебаний, вызванного ансамблем гармоники отклонений геометрических и физических параметров, а также решения этой задачи методом конечных элементов для проверки предложенного метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Kaczmarski, M. & Pelczynski, Pawel. (2015). Mechatronic setup for measurement of dynamical properties of electronic gyroscopes. 2015. 281-286.

[2] Martins, Oluwaseun & Oosthuizen, Christiaan & Desai, Dawood. (2025). Exploring the import of mechatronics engineering in medicine: a review. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences.

[3] Матвеев В.А. Гироскоп – это просто. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 149 с.3.

[4] Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. Москва, М.: Наука, 1985, с. 125.

[5] Тимошенков С.П., Михеев А.В., Тимошенков А.С., Полушкин В.М. Перспективы разработки и производства микроакселерометров, микрогироскопов и инерциальных навигационных систем на основе МЭМС. *Наноиндустрия*. 2020, № S4(99), с. 468-469.

[6] Senkal D., Ng E.J., Hong V.A., Yang Y., Ahn C.H., Kenny T.W., Shkel A.M. Parametric drive of a toroidal MEMS rate integrating gyroscope demonstrating < 20 PPM scale factor stability. IEEE, 2015, pp. 29-32.

[7] Shishakov K. Algorithmic Signal Accuracy Improvement of Solid-State Wave Gyroscopes. ISP, 2020, vol. 20, pp. 34-47.

[8] Sorokin F., Kiselev R., Golovleva A. Analysis of post-processing methods of IMU MEMS cluster of autonomous navigation of ground transport systems. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 471.

[9] Schiwietz D., Weig E., Degenfeld-Schonburg P. Thermoelastic damping in MEMS gyroscopes at high frequencies. Microsystems & Nanoengineering, 2023, vol. 9, no. 11.

[10] Sorokin F., Vakhlyarsky D., Gouskov A. High rise of ring resonator frequency split due to combination of two harmonics of density defect. Applied Mathematical Modelling, 2022, vol. 103, pp. 376-387.

[11] Киселев Р.М., Сорокин Ф.Д. Разработка и верификация энергетического метода расчета расщепления частот собственных

колебаний кольцевых резонаторов гироскопических приборов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2025, № 4 (160).
[12] Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. Москва, URSS: Ленанд, 2017, с. 211
[13] Бидерман В.Л. *Теория механических колебаний*. Москва, URSS: Ленанд, 2017, с. 185.
[14] Серов М.В., Аверьянова Г.М., Карначева Е.В. Опыт применения вариационного принципа Гамильтона-Остроградского к практическим вопросам составления дифференциальных уравнений свободных малых колебаний. *Известия МГТУ МАМИ*, 2014, № 4(22), с. 84-89
[15] Елисеева Ю.В., Бондаренко А.А. Один метод вычисления собственных значений дискретных задач Штурма-Лиувилля высших порядков. *Вестник МГТУ "Станкин"*, 2011, № 1(13), с. 95-101
[16] Нарайкин, О. С. Расщепление собственных частот кольцевого резонатора твердотельного волнового гироскопа, вызванное возмущением формы / О. С. Нарайкин, Ф. Д. Сорокин, С. А. Козубняк // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 6(6). – С. 48.
[17] Модель твердотельного волнового гироскопа в среде Simulink / Л. Е. Кочегизова, С. В. Фетисов, А. С. Малюгин [и др.] // Навигация и управление движением : Материалы XXV Юбилейной конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–24 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2023. – С. 88-90.
[18] Brazhnikov, A. & Ganigin, S.. (2024). Development of a finite element resonator model for a tuning fork-type vibration level detector. Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 10. 54-62. 10.18287/2409-4579-2024-10-4-54-62.
[19] Бабаев Е.В., Косторной А.Н., Большаков Д.С. [и др.] Способ настройки вибрационного кольцевого датчика угловых скоростей. Пат. № 2792945 C1 Российская Федерация, МПК G01C 19/5684, 2023, бюл. № 10.

R.M. Kiselev

CALCULATION OF THE NATURAL OSCILLATION FREQUENCIES SPLITTING OF MMG RING RESONATOR CAUSED BY A DEVIATION IN ITS GEOMETRY

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract

Sensors are one of the important elements of modern mechatronic and robotic systems [1]. Of great interest is the issue of designing small-sized angular velocity sensors, which are widely used in various fields of industry [2, 3]. Among the huge variety of angular velocity sensors, in recent years, more and more attention has been paid to the design of micromechanical gyroscopes (MMGs). The main problem of MMG is the high dependence of qualitative indicators on deviations of the geometric and physical parameters of the resonator [4]. The paper considers the issues of determining the splitting of the natural oscillation frequencies of MMG annular resonators caused by a small deviation of the radius of the median surface of the resonator. As a result of the work, an energy method is proposed for calculating the natural oscillation frequencies of an annular resonator, adapted to geometric deviations. Based on the calculation results, it is shown that the largest splitting of the natural frequency is caused by the 2 and 4 harmonics of the radius deviation.

Key words: ring gyroscope, micromechanical gyroscope, ring resonator, natural frequency splitting

REFERENCES

[1] Kaczmarski, M. & Pelczynski, Pawel. (2015). Mechatronic setup for measurement of dynamical properties of electronic gyroscopes. 2015. 281-286.
[2] Martins, Oluwaseun & Oosthuizen, Christiaan & Desai, Dawood. (2025). Exploring the import of mechatronics engineering in medicine: a review. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Science
[3] Matveev V.A. Gyroscope is simple. Moscow, Izd-vo BMSTU, 2012, 149 p.
[4] Zhuravlev V.F., Klimov D.M. Wave solid-state gyroscope. Moscow, M.: Nauka Publ., 1985, 125 p.
[5] Timoshenkov S.P., Mikheev A.V., Timoshenkov A. S., Polushkin V. M. Prospects of development and production of microaccelerometers, microhyroscopes and inertial navigation systems based on MEMS. *Nanoindustria*, 2020,, № S4(99), pp. 468-469.
[6] Senkal D., Ng E.J., Hong V.A., Yang Y., Ahn C.H., Kenny T.W., Shkel A.M. Parametric drive of a toroidal MEMS rate integrating gyroscope demonstrating < 20 PPM scale factor stability. IEEE, 2015, pp. 29-32.
[7] Shishakov K. Algorithmic Signal Accuracy Improvement of Solid-State Wave Gyroscopes. ISP, 2020, vol. 20, pp. 34-47.
[8] Sorokin F., Kiselev R., Golovleva A. Analysis of post-processing methods of IMU MEMS cluster of autonomous navigation of ground transport systems. E3S Web of Conferences, 2024, vol. 471.

[9] Schiwietz D., Weig E., Degenfeld-Schonburg P. Thermoelastic damping in MEMS gyroscopes at high frequencies. Microsystems & Nanoengineering, 2023, vol. 9, no. 11.
[10] Sorokin F., Vakhlyarsky D., Gouskov A. High rise of ring resonator frequency split due to combination of two harmonics of density defect. Applied Mathematical Modelling, 2022, vol. 103, pp. 376-387
[11] Kiselev R.M., Sorokin F.D. Development and verification of the energy method for calculating natural oscillations frequency splitting of gyroscopic devices ring resonators. Engineering Journal: Science and Innovation, 2025, No. 4 (160).
[12] Biderman V.L. Mechanics of thin-walled structures: statics. Moscow, URSS Publ., 2017, p. 211.
[13] Biderman V.L. Theory of mechanical vibrations. Moscow, URSS Publ., 2017, p. 185.
[14] Serov M.V., Averyanova G.M., Karnacheva E.V. The experience of applying the Hamilton-Ostrogradsky variational principle to practical issues of composing differential equations of free small oscillations. Izvestiya MGTU MAMI, 2014, № 4(22), pp. 84-89
[15] Eliseeva Yu.V., Bondarenko A.A. One method for calculating eigenvalues of discrete Sturm-Liouville problems of higher orders. Bulletin of MSTU "Stankin", 2011, № 1(13), pp. 95-101.
[16] Naraykin O.S., Sorokin F.D., Guskov A.M. [et al.] Calculation of eigen frequency splitting of a cylindrical resonator of a solid-state wave gyroscope based on numerical integration of high accuracy. Engineering Journal: Science and Innovation, 2019, № 5(89), p. 4
[17] A model of a solid-state wave gyroscope in the Simulink environment / L. E. Kochegizova, S. V. Fetisov, A. S. Malyugin [et al.] // Navigation and motion control : Proceedings of the XV Anniversary Conference of Young Scientists, St. Petersburg, March 21-24, 2023. Saint Petersburg: Concern Central Research Institute Electropribor, 2023, pp. 88-90.
[18] Brazhnikov, A. & Ganigin, S.. (2024). Development of a finite element resonator model for a tuning fork-type vibration level detector. Journal of Dynamics and Vibroacoustics. 10. 54-62. 10.18287/2409-4579-2024-10-4-54-62.
[19] Babaev E.V., Kostorny A.N., Bolshakov D.S. [et al.] A method for setting a vibrating annular angular velocity sensor. Patent No. 2792945 C1 Russian Federation, IPC G01C 19/5684, 2023, byul. № 10.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 517.977, 681.511.2
doi:10.18720/SPBPU/2/id-108

В.Г. Мельников[1], Н.А. Дударенко[2], А.М. Григоров[3]

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ И КОЛЕБАТЕЛЬНОСТЬ



[1]Виталий Геннадьевич Мельников,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 328-82-22, E-mail: v.g.melnikov@yandex.ru.



[2] Наталия Александровна Дударенко,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 232-05-80, E-mail: dudarenko@itmo.ru



[3]Андрей Михайлович Григоров,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921)857-9741, E-mail: Grigorov.andrey1@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрен новый подход к аналитическим условиям размещения корней замкнутой системы управления в желаемой области комплексной плоскости для достижения заданных характеристик качества её переходных процессов. В качестве желаемых показателей качества часто используются два параметра: колебательность системы и степень её устойчивости [1]. При таком подходе корни характеристического уравнения должны располагаться в открытой усеченной угловой области левой полуплоскости комплексной плоскости. В данной работе получены аналитические формулы для размещения корней замкнутой системы произвольного порядка внутри такой области. При этом рассмотрено два варианта постановки задачи. В первом варианте получены условия

локализации корней для фиксированного набора значений угла наклона верхней и нижней сторон области. Во втором варианте для области с произвольным углом наклона боковых сторон предлагается применить ограничение предельного значения отрицательных вещественных частей корней системы с дальнейшей аппроксимацией полученной замкнутой области. В результате формируется характеристический полином системы и производится расчёт ограничений, налагаемых на его коэффициенты. Важным преимуществом метода является его относительная простота, что существенно упрощает его практическое применение.

Ключевые слова: корни и полюса характеристического полинома, модальное управление, робастное управление.

Введение

Проектирование линейных динамических систем управления с заданными показателями качества замкнутой системы требует решения задачи распределения корней характеристического полинома на комплексной плоскости [1-3]. Как известно, при отсутствии нулей в передаточной функции вид переходного процесса определяется полюсами передаточной функции замкнутой системы [4-5]. Если же в передаточной функции есть и нули, то необходимо предварительно отделить соответствующие корни для их компенсации [6-7] и далее рассматривать оставшийся полином пониженного порядка с учётом желаемого расположения оставшихся корней. Стандартными формами для обеспечения желаемого переходного процесса являются полином Баттерворта, в котором корни распределяются по полуокружности в левой части комплексной плоскости, и бином Ньютона, в котором корни расположены в точке пересечения полуокружности с действительной осью. При робастном управлении необходимо получать условия нахождения корней в областях, а не в фиксированных точках комплексной плоскости, так как корни могут изменять своё положение при изменении параметров системы [8-9]. Известны условия локализации корней в открытых областях с границами в виде прямых и кривых второго порядка, имеются предложения о применении кривых четвертого и выше порядков [10-11]. В [12] дано фундаментальное обобщение матричного уравнения Ляпунова о локализации спектра матрицы во многих областях комплексной плоскости. Развитие этого подхода на многосвязные области произвольной формы приведено в [13], в котором применяются кривые четвертого порядка - овалы Кассини [14]. Проблема локализации корней актуальна для систем робастного управления [15–16] и управления мультиагентными системами. Для получения относительно простых выражений в данной статье применен подход из теории функций комплексных переменных – метод конформных

отображений [17-19]. Рассматривается метод размещения корней характеристического полинома в усечённой угловой области, определяемой желаемыми показателями качества замкнутой системы. Аналитические формулы позволяют определить положение корней замкнутой системы произвольного порядка для заданного набора значений угла наклона верхней и нижней сторон области. В результате формируется характеристический полином системы и рассчитываются ограничения на его коэффициенты.

Методы

Рассмотрим линейную управляемую динамическую систему с n-мерным вектором состояния, с постоянной матрицей, зависящей от нескольких подлежащих выбору параметров:

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \;\; x = (x_1, \dots, x_n)^T, \;\; A = \left|\left|a_{ik}\right|\right|_1^n. \qquad (1)$$

Расположение на комплексной плоскости $\mathbb{C}$ спектра собственных значений матрицы A определяет свойства управляемой системы. Будем рассматривать задачу обеспечения расположения спектра матрицы A в пределах специальной области D на комплексной плоскости $\mathbb{C}$. Данная область формируется путем пересечения двух геометрических фигур:

– бесконечной вертикальной полосы D_1, шириной $(\xi - \eta)$:

$$D_1 = \{s: \mathrm{Re}(s) \in (\xi - \eta)\}, \qquad (2)$$

– бесконечной угловой области D_2 в виде сектора с заданным углом при вершине, равным 2φ:

$$D_2 = \{s: \mathrm{Arg}(s) \in (\pi - \varphi, \pi + \varphi)\}, \qquad (3)$$

где η – желаемая степень устойчивости динамической системы, ξ – задаваемое ограничение на величину предельного удаления корней от мнимой оси в левую сторону комплексной плоскости $\xi \in (\infty, \eta)$, φ – определяет желаемую колебательность μ системы: $tg\varphi = \mu$.

Таким образом, будем искать условия нахождения спектра матрицы в области:

$$D = D_1 \cap D_2. \qquad (4)$$

Примечания:

1. Угол φ области D_2 обычно назначается близким к значению $\pi/4$, либо меньшим, если требуется обеспечить более существенное затухание переходного процесса за период.
2. Высоту трапеции $(\xi - \eta)$ обычно назначают небольшой.

Следует отметить, что задача в такой постановке считается сложной и не имеющей аналитического решения.

Для получения аналитического решения несколько модифицируем задачу. Приблизим угловую область D_2 угловой областью D_2', у которой угол при вершине может принимать одно из возможных значений, заданных формулой $\varphi = \frac{\pi}{2\gamma}, \gamma = 2,3,4 \ldots$, при этом вершину угла мы также можем переместить из начала координат O на расстояние ζ в новую точку O_1, заданную из условия, что боковые стороны области $D_2{}'$ мало отклонялись от боковых сторон исходной области D_2. Будем рассматривать задачу о локализации спектра матрицы A во внутренней области трапеции:

$$D' = D_1 \cap D_2{}'. \tag{5}$$

Такая модификация исходной задачи допустима в рамках принятой точности приближения области D областью D'.

Решение задачи

Выполним в характеристической матрице системы $M = (Es - A)$ три замены переменных: $s = z_1 - \eta$, $s = -z_2 - \xi$, $s = z_4 + \zeta$. Получим:

$$M = Ez_1 - A_1 = -(Ez_2 - A_2) = Ez_4 - A_4, \tag{6}$$

при:

$$A_1 = A + E\eta, A_2 = -A - E\eta, A_4 = A - E\zeta. \tag{7}$$

Тогда необходимое и достаточное условие локализации спектра матрицы A в полосе D_1 эквивалентно выполнению $2n$ условий гурвицевости матриц A_1 и A_2.

Рассмотрим матрицу $A_3 = (-1)^{\gamma+1}A_4^{\gamma}$ и степенное преобразование $z_3 = (-1)^{\gamma+1}z_4^{\gamma}$. По свойству функций от матрицы [20] собственные значения матриц A_3 и A_4 связаны соотношениями:

$$z_{3i} = (-1)^{\gamma+1}z_{4i}^{\gamma}, \ i = 1, \ldots, n. \tag{8}$$

Преобразование отображает угол величиной $2\varphi = \pi/\gamma$ на плоскости z_4 в левую полуплоскость плоскости z_3. При этом стороны и отрицательная полуось $z_4 = r\exp(\pi \pm \varphi)j$, $z_4 = -r$ отображаются соответственно в мнимые полуоси и отрицательную полуось.

Тогда необходимым и достаточным условием локализации спектра матрицы A в области D' является выполнение условий Гурвица для матриц $A_i, i = 1,2,3$.

Примечание:

Для систем высокого порядка коэффициенты a_k^i трех характеристических многочленов $\det(E\lambda - A_i)$ можно получить методом Лаверье по рекуррентным формулам Фаддеева:

$$A_1^i = A_i, \qquad a_1^i = -tr\, A_1^i,$$
$$A_2^i = A_i\left(A_1^i + a_1^i E\right), \;\; a_2^i = -\frac{1}{2} tr\, A_2^i,$$
$$A_3^i = A_i\left(A_2^i + a_2^i E\right), \;\; a_3^i = -\frac{1}{3} tr\, A_3^i\,, \tag{10}$$
$$\ldots$$
$$A_n^i = A_i\left(A_{n-1}^i + a_{n-1}^i E\right), \;\; a_n^i = -\frac{1}{n} tr\, A_n^i.$$

Пример

Дана система управления с характеристическим многочленом:

$$P_4(s) = s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4. \tag{11}$$

Коэффициенты уравнения подлежат выбору из условия, чтобы одна пара корней имела заданные значения:

$$s_{3,4} = -1 \pm 2j. \tag{12}$$

Прочие же два корня располагались в области D' с параметрами:

$$\eta = 1, \;\; \varphi = \frac{\pi}{4}\,, \;\; \xi = +\infty, \;\; \zeta = 0. \tag{13}$$

Разделим $P_4(s)$ на квадратичный полином:

$$(s - s_3)(s - s_4) = s^2 + 2s + 5. \tag{14}$$

Получим многочлен второй степени:

$$P_2(s) = s^2 + a_1 s + a_2, \tag{15}$$

где коэффициенты $a_{1,2}$ будем считать подлежащими определению, при этом параметры b_i исходного полинома находятся из соотношений:

$$b_1 = a_1 + 2, \;\; b_2 = a_2 + 2a_1 + 5, \;\; b_3 = 2a_2 + 5a_1, \;\; b_4 = 5a_2. \tag{16}$$

Многочлену $P_2(s)$ сопоставим сопровождающую матрицу A.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

По матрице A получим матрицы $A_{1,3}$:

$$A_1 = A_1 = A + E = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -a_2 & 1 - a_1 \end{bmatrix}; \tag{18}$$

$$A_3 = -A^2 = \begin{bmatrix} a_2 & a_1 \\ -a_1 a_2 & a_2 - a_1^2 \end{bmatrix}. \tag{19}$$

Характеристические полиномы матриц $A_{1,3}$ имеют вид:

$$det(E\lambda - A_1) = \lambda^2 + (a_1 - 2)\lambda + (a_2 - a_1 + 1)\,; \tag{20}$$

$$\det(E\lambda - A_3) = \lambda^2 + (a_1^2 - 2a_2)\lambda + a_2^2. \tag{21}$$

Коэффициенты характеристических полиномов:

$$p_1^{(1)} = a_1 - 2,\ p_2^{(1)} = a_2 - a_1 + 1; \quad (22)$$

$$p_1^{(3)} = a_1^2 - 2a_2,\ p_2^{(2)} = a_2^2. \quad (23)$$

Условия Гурвица для многочленов второй степени сводятся к положительности всех коэффициентов многочленов $p_k > 0$. Получаем ограничения на значения параметров:

$$a_1 > 2,\ a_1 - 1 < a_2 < \frac{1}{2}a_1^2. \quad (24)$$

Заключение

Рассмотрена задача робастного расположения корней динамических систем в желаемой угловой области комплексной плоскости. Задаваемая область обеспечивает системе требуемые показатели качества переходных процессов. Для решения задачи было предложено изменение её постановки: ограничение предельного значения отрицательных вещественных частей корней системы и аппроксимация полученной замкнутой области. Это позволяет добиться требуемой точности расположения корней. В результате формируется характеристический полином системы и рассчитываются ограничения для его коэффициентов. Важным преимуществом метода является его относительная простота, что расширяет область его практического применения в сложных задачах [21-23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. — 752 с.

[2] Aleksandrov, A. Y. Asymptotic stability of a satellite with electrodynamic attitude control in the orbital frame / A. Y. Aleksandrov, A. A. Tikhonov // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 139. – P. 122-129. – DOI 10.1016/j.actaastro.2017.06.033. – EDN XNGMZT.

[3] Evgrafov, A.N., Petrov, G.N., Khlebosolov, I.O., Andrienko, P.A. (2024). On the Issue of Dynamics of Program-Controlled Machines. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_2

[4] Nikitin, D. Y. Attitude stabilization of a spacecraft equipped with large electrostatic protection screens / D. Y. Nikitin, A. A. Tikhonov // AIP Conference Proc. : 8th Polyakhov's Reading: Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics, Saint Petersburg– P. 040011. – DOI 10.1063/1.5034614.

[5] Evgrafov, A. N. Influence of the Control Object Mass on the Stability Region / A. N. Evgrafov, V. A. Tereshin // Adv. in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, Russia– Cham: Springer, 2022. – P. 9-17. – DOI 10.1007/978-3-030-91553-7_2.
[6] Abramovich, B. N. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter / B. N. Abramovich, D. A. Ustinov, W. J. Abdallah // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 1007-1025. – DOI 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1007-1025.
[7] Asadulagi, M.-A.M., Fedorov, M.S., Trushnikov, V.E. (2023). Control Methods of Mineral Water Wells. Proceedings of 2023 5th International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2023, 152-155. https://doi.org/10.1109/CTS59431.2023.10288866
[8] Гайворонский, С. А. Определение области заданного качества управления подводным аппаратом в пространстве его конструктивных параметров / С. А. Гайворонский, Т. А. Езангина, И. В. Хожаев // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2019. – Т. 8. – С. 322-328. – EDN BFGPUW.
[9] Kotov, D.D., Pervukhin, D.A., Davardoost, H., Afanasyeva, O.V. (2024). Prospects for the Use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to Solve the Problems of the Mineral Resources Complex (MRC) of the Russian Federation. Journal of Maritime Research, 21(1), 309-317.
[10] He, K., Peng, C. Iterative algorithm for the conformal mapping from the unit disk to domains with regular boundaries. Arch Appl Mech 95, 36 (2025). https://doi.org/10.1007/s00419-024-02749-5
[11] Перепелкин, Е. А. Управление спектром матричной системы второго порядка с обратной связью по вектору ускорения / Е. А. Перепелкин // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – С. 23-28. – DOI 10.17223/19988605/63/3. – EDN SEQXXU.
[12] Gutman S., Jury E.I. A general theory for root-clustering in subregions of the complex plane // IEEE Trans. Automat. Control. 1981. V. 26. P. 853-863.
[13] Melnikov, V. G. Method of forbidden regions in the dynamic system matrices root clustering problem / V. G. Melnikov, N. A. Dudarenko // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, No. 8. – P. 1393-1401. – DOI 10.1134/S0005117914080049.
[14] Grabusts, P. Applications of the Symmetrical Structures of Cassini Ovals / P. Grabusts, O. Uzhga-Rebrov // Symmetry. – 2024. – Vol. 16, No. 3. – P. 334. – DOI 10.3390/sym16030334.
[15] Rovenski, V., Stepanov S., and Tsyganok I. 2021. "A Generalized Bochner Technique and Its Application to the Study of Conformal Mappings" *Axioms* 10, 4: 333. https://doi.org/10.3390/axioms10040333

[16] Trubaev, N. A. Solution of the parameter problem of the Schwarz-Christoffel conformal mapping of the interior (exterior) of a circle onto the interior (exterior) of a polygon / N. A. Trubaev // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2023. – No. 82. – P. 28-38. – DOI 10.17223/19988621/82/3. – EDN JUKDRV.
[17] Turner, M.R., Bridges, T.J. Time-dependent conformal mapping of doubly-connected regions. *Adv Comput Math* **42**, 947–972 (2016). https://doi.org/10.1007/s10444-015-9448-6
[18] Andrei-Florin Albişoru, Dorin Ghişa, "Conformal Self-Mappings of the Complex Plane with Arbitrary Number of Fixed Points," WSEAS Transactions on Mathematics, vol. 22, pp. 971-979, 2023, DOI:10.37394/23206.2023.22.106
[19] Baiguera, S., Harmark, T., Lei, Y. *et al.* Conformal mapping of non-Lorentzian geometries in SU(1, 2) Conformal Field Theory. *J. High Energ. Phys.* **2025**, 100 (2025). https://doi.org/10.1007/JHEP03(2025)100
[20] Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. — 5-е изд. — Москва : Физматлит, 2010. — 559 с
[21] Automatic Control System for Thermal State of Reverberatory Furnaces in Production of Nickel Alloys / V. E. Q. Cabascango, V. Y. Bazhin, S. A. Martynov, F. R. O. Pardo // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66, No. 1-2. – P. 104-116. – DOI 10.1007/s11015-022-01304-3.
[22] Ануфриев, А. С. Новые подходы для повышения эффективности автоматизированных систем управления переделами рудоподготовки / А. С. Ануфриев, Е. А. Лебедик, В. Ю. Бажин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 2. – С. 76-92. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.
[23] Mathematical Logic Model for Analysing the Controllability of Mining Equipment / P. V. Shishkin, B. V. Malozyomov, N. V. Martyushev [et al.] // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 11. – P. 1660. – DOI 10.3390/math12111660.

V. G. Melnikov[1], N. A. Dudarenko[2], A. M. Grigorov[1]

DESIGN OF LINEAR CONTROL SYSTEMS UNDER STABILITY AND OSCILLATION CONSTRAINTS

[1]St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Russia;
[2] ITMO university, St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers a new approach to analytical conditions for placing the roots of a closed-loop control system in a desired region of a complex plane to achieve specified characteristics of the quality of its transient processes. Two parameters are often used as desired quality indicators: the oscillation of the system and the degree of its stability [1]. With this approach, the roots of the characteristic equation should be located in the open truncated angular region of the left half-plane of the complex plane. In this paper, analytical formulas are obtained for placing the roots of a closed system of arbitrary order inside such a domain. At the same time, two variants of the problem formulation are considered. In the first variant, the conditions for root localization are obtained for a fixed set of values of the angle of inclination of the upper and lower sides of the region. In the second variant, for an area with an arbitrary angle of inclination of the sides, it is proposed to apply a limitation of the limit value of the negative real parts of the roots of the system with a further approximation of the resulting closed area. As a result, the characteristic polynomial of the system is formed and the constraints imposed on its coefficients are calculated. An important advantage of the method is its relative simplicity, which greatly simplifies its practical application.

Key words: roots and poles of a characteristic polynomial, modal control, robust control

REFERENCES

[1] Besekerskij V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya / V.A. Besekerskij, E.P. Popov. — 4-e izd., pererab. i dop. — SPb.: Izd-vo «Professiya», 2003. — 752p. (in Russian)

[2] Aleksandrov, A. Y. Asymptotic stability of a satellite with electrodynamic attitude control in the orbital frame / A. Y. Aleksandrov, A. A. Tikhonov // Acta Astronautica. – 2017. – Vol. 139. – P. 122-129. – DOI 10.1016/j.actaastro.2017.06.033. – EDN XNGMZT.

[3] Evgrafov, A.N., Petrov, G.N., Khlebosolov, I.O., Andrienko, P.A. (2024). On the Issue of Dynamics of Program-Controlled Machines. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_2
[4] Nikitin, D. Y. Attitude stabilization of a spacecraft equipped with large electrostatic protection screens / D. Y. Nikitin, A. A. Tikhonov // AIP Conference Proc. : 8th Polyakhov's Reading: Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics, Saint Petersburg– P. 040011. – DOI 10.1063/1.5034614.
[5] Evgrafov, A. N. Influence of the Control Object Mass on the Stability Region / A. N. Evgrafov, V. A. Tereshin // Adv. in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, Russia– Cham: Springer, 2022. – P. 9-17. – DOI 10.1007/978-3-030-91553-7_2.
[6] Abramovich, B. N. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter / B. N. Abramovich, D. A. Ustinov, W. J. Abdallah // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2022. – Vol. 13, No. 2. – P. 1007-1025. – DOI 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1007-1025.
[7] Asadulagi, M.-A.M., Fedorov, M.S., Trushnikov, V.E. (2023). Control Methods of Mineral Water Wells. Proceedings of 2023 5th International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2023, 152-155. https://doi.org/10.1109/CTS59431.2023.10288866
[8] Gajvoronskij, S. A. Opredelenie oblasti zadannogo kachestva upravleniya podvodny`m apparatom v prostranstve ego konstruktivny`x parametrov / S. A. Gajvoronskij, T. A. Ezangina, I. V. Xozhaev // Texnicheskie problemy` osvoeniya Mirovogo okeana. – 2019. – T. 8. – p. 322-328. (in Russian)
[9] Kotov, D.D., Pervukhin, D.A., Davardoost, H., Afanasyeva, O.V. (2024). Prospects for the Use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to Solve the Problems of the Mineral Resources Complex (MRC) of the Russian Federation. Journal of Maritime Research, 21(1), 309-317.
[10] He, K., Peng, C. Iterative algorithm for the conformal mapping from the unit disk to domains with regular boundaries. Arch Appl Mech 95, 36 (2025). https://doi.org/10.1007/s00419-024-02749-5
[11] Perepelkin, E. A. Upravlenie spektrom matrichnoj sistemy` vtorogo poryadka s obratnoj svyaz`yu po vektoru uskoreniya / E. A. Perepelkin // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vy`chislitel`naya texnika i informatika. – 2023. – № 63. – S. 23-28. – DOI 10.17223/19988605/63/3. (in Russian).
[12] Gutman S., Jury E.I. A general theory for root-clustering in subregions of the complex plane // IEEE Trans. Automat. Control. 1981. V. 26. P. 853-863.

[13] Melnikov, V. G. Method of forbidden regions in the dynamic system matrices root clustering problem / V. G. Melnikov, N. A. Dudarenko // Automation and Remote Control. – 2014. – Vol. 75, No. 8. – P. 1393-1401. – DOI 10.1134/S0005117914080049.
[14] Grabusts, P. Applications of the Symmetrical Structures of Cassini Ovals / P. Grabusts, O. Uzhga-Rebrov // Symmetry. – 2024. – Vol. 16, No. 3. – P. 334. – DOI 10.3390/sym16030334.
[15] Rovenski, V., Stepanov S., and Tsyganok I. 2021. "A Generalized Bochner Technique and Its Application to the Study of Conformal Mappings" *Axioms* 10, 4: 333. https://doi.org/10.3390/axioms10040333
[16] Trubaev, N. A. Solution of the parameter problem of the Schwarz-Christoffel conformal mapping of the interior (exterior) of a circle onto the interior (exterior) of a polygon / N. A. Trubaev // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2023. – No. 82. – P. 28-38. – DOI 10.17223/19988621/82/3. – EDN JUKDRV.
[17] Turner, M.R., Bridges, T.J. Time-dependent conformal mapping of doubly-connected regions. *Adv Comput Math* **42**, 947–972 (2016). https://doi.org/10.1007/s10444-015-9448-6
[18] Andrei-Florin Albişoru, Dorin Ghişa, "Conformal Self-Mappings of the Complex Plane with Arbitrary Number of Fixed Points," WSEAS Transactions on Mathematics, vol. 22, pp. 971-979, 2023, DOI:10.37394/23206.2023.22.106
[19] Baiguera, S., Harmark, T., Lei, Y. *et al.* Conformal mapping of non-Lorentzian geometries in SU(1, 2) Conformal Field Theory. *J. High Energ. Phys.* **2025**, 100 (2025). https://doi.org/10.1007/JHEP03(2025)100
[20] Gantmaxer, F.R. Teoriya matricz / F. R. Gantmaxer. — 5-e izd. — Moskva : Fizmatlit, 2010. — 559p (in Russian)
[21] Automatic Control System for Thermal State of Reverberatory Furnaces in Production of Nickel Alloys / V. E. Q. Cabascango, V. Y. Bazhin, S. A. Martynov, F. R. O. Pardo // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66, No. 1-2. – P. 104-116. – DOI 10.1007/s11015-022-01304-3.
[22] Anufriev, A. S. Novy`e podxody` dlya povy`sheniya e`ffektivnosti avtomatizirovanny`x sistem upravleniya peredelami rudopodgotovki / A. S. Anufriev, E. A. Lebedik, V. Yu. Bazhin // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten` (nauchno-texnicheskij zhurnal). – 2024. – № 2. – S. 76-92. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76. (in Russian)
[23] Mathematical Logic Model for Analysing the Controllability of Mining Equipment / P. V. Shishkin, B. V. Malozyomov, N. V. Martyushev [et al.] // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, No. 11. – P. 1660. – DOI 10.3390/math12111660

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 539.43, 621.87
doi:10.18720/SPBPU/2/id-109

В.Г. Мельников[1], М.Ю. Насонов[2], Н.А. Дударенко[3], А.М. Григоров[4]

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗНОСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ



[1]Виталий Геннадьевич Мельников,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 328-82-22, E-mail: v.g.melnikov@yandex.ru.



[2]Михаил Юрьевич Насонов,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Россия, Москва
Тел.: (812) 328-82-22, E-mail: nasonov_myu@pers.spmi.ru.



[3]Наталия Александровна Дударенко,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 232-05-80, dudarenko@itmo.ru



[4]Андрей Михайлович Григоров,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921)857-97-41, Grigorov.andrey1@yandex.ru.

Аннотация

В данной работе рассматривается проблема диагностики усталостного разрушения металлоконструкций. Предложен новый метод и разработано устройство нового датчика для диагностики металлоконструкции, находящейся под действием циклического нагружения. Датчик состоит из нескольких прямоугольных пластин, жестко закрепленных на поверхности металлоконструкции, в средней части каждой из пластины выполнены

пропилы различной глубины. Показано, что применение предложенного датчика позволяет визуально оценивать накопленный износ металлоконструкции по состоянию его металлических пластин.

Ключевые слова: металлоконструкции, напряжения, циклы нагружения, трещины, датчик.

Введение

На сегодняшний день основным способом добычи полезных ископаемых является открытый способ, им добывается около 80% всех полезных ископаемых [1]. Добыча полезного ископаемого в разрезах может осуществляться карьерными экскаваторами, осуществляющими непосредственную выемку полезного ископаемого, и автосамосвалами, транспортирующими горную массу на внутренние отвалы или на склады [2]. Использование автомобильной техники позволяет упростить процесс добычи полезного ископаемого ввиду отсутствия необходимости предварительного монтажа специальной инфраструктуры, как, например, монтаж рельсового полотна, при транспортировании полезного ископаемого железнодорожным транспортом. Автомобильная техника, как и экскаваторы, в процессе своей эксплуатации подвергаются широкому спектру механических нагрузок. Как следствие - основная часть отказов оборудования и его внепланового ремонта связана, в первую очередь с механическими повреждениями [3,4]. В процессе эксплуатации оборудование может испытывать вибрации, удары, связанные с неровностью поверхности дороги для самосвалов или неоднородностью добываемой породы для экскаваторов [6,7,8]. Циклические нагрузки могут вызывать появление и развитие трещин, которые, как правило, также связаны с различными дефектами и неоднородностью металла [9]. В результате, циклические нагрузки приводят к постепенной утрате прочности металла и последующему разрушению металла [10]. В то же время развитие трещин до критических значений, которые уже могут приводить к разрушению металлоконструкции, обычно происходит за достаточно продолжительное время [11]. Отдельно можно отметить влияние и других факторов условий эксплуатации оборудования, например - холодного климата, который может привести к хрупкому разрушению детали [5]. Прогнозирование эксплуатационного ресурса автосамосвалов в зависимости от различных факторов, таких как время года, износ дорожного полотна, приведен в [12]. Использование микроэлектроники для диагностирования автосамосвалов описаны в [13]. Различные методы по определению напряжений и деформаций в металлических конструкциях рассмотрены в [14-16].

Одним из наиболее часто применяемых методов для оценивания внутренних напряжений и деформаций объектов экспериментальным путем можно считать тензометрический способ [17]. При деформации объекта происходит изменение электрического сопротивления тензорезистора установленного на нём. На основе зафиксированных изменений сопротивления рассчитывают величину деформации объекта [18], оценивают возникающие в материале механические напряжения и вероятность появления трещин. Существенным недостатком данного метода является сложность учета влияния температурного воздействия на результаты измерений. Степень этого влияния зависит от множества переменных параметров, погодных условий и других факторов окружающей среды, а также режима работы оборудования. В результате электрическое сопротивление датчика может меняться непредсказуемым образом, что существенно затрудняет получение точных и воспроизводимых измерений.

Другим известным подходом к диагностике состояния изделия является ультразвуковой метод, который позволяет обнаруживать дефекты и трещины в материале [20]. Реже применяется магнитопорошковый метод, основанный на взаимодействии магнитных полей с ферромагнитными частицами [21], который используется для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах. Для определения дефектов в проводящих материалах может применяться вихретоковый метод, использующий взаимодействие переменного магнитного поля с электрическими токами, индуцированными в материале [22]. Для определения внутренних дефектов в материалах применяется радиационный подход использующий ионизирующее излучение. Общим недостатком всех перечисленных выше методов и подходов является невозможность или сложность размещения реализующих их устройств на работающем в сложных погодных и технических условиях подвижном объекте при необходимости обеспечения его непрерывного мониторинга и диагностики развития в нем трещин и дефектов.

В статье предлагается новый метод определения степени накопления усталостных повреждений металлоконструкциями, который отвечает следующим критериям: дешевизна, простота, возможность применения метода в процессе работы объекта, автономность и полная энергонезависимость.

Конструкция датчика

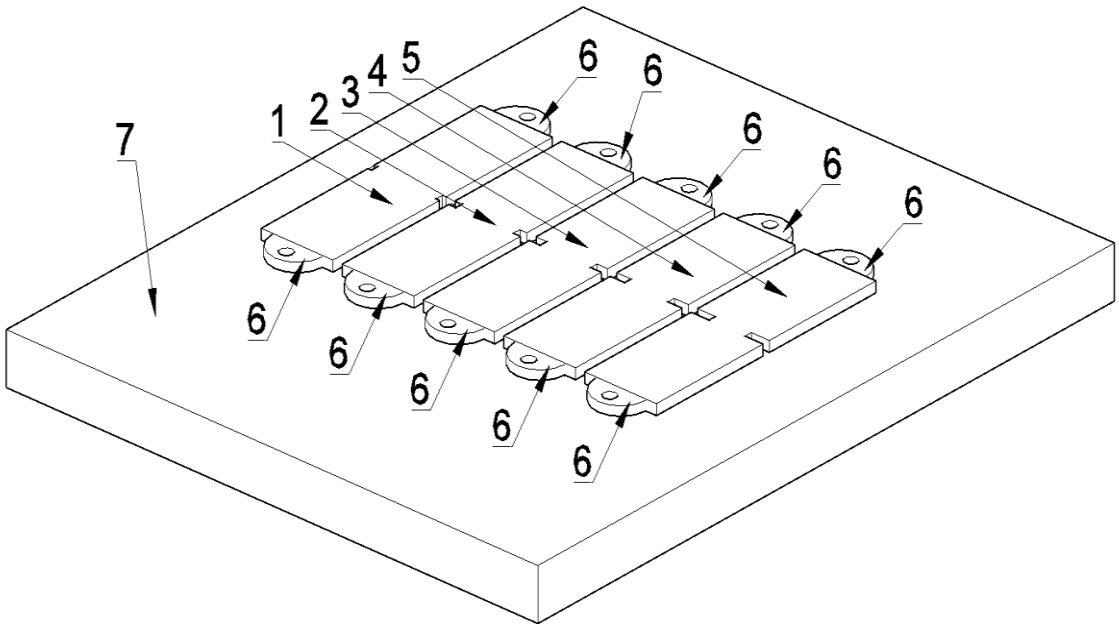


Рис. 1. Устройство составного датчика: 1-5 – прямоугольные пластины с надрезами различной длины по середине пластин, 6 – места крепления пластин к объекту, 7 – исследуемый объект

На рис. 1 показан разработанный датчик с чувствительными элементами в виде прямоугольных пластинами, неподвижно закрепленный на измеряемой металлоконструкции [23]. Датчик позволяет визуально контролировать число циклов нагружения, полученных металлоконструкцией, а также степень её износа и остаточный ресурс при условии известного характера циклического нагружения. Для неподвижного закрепление датчика на поверхности измеряемой металлоконструкции возможно применение соединения клеевого, точечно-сварного или другого типа. Для обеспечения точности и воспроизводимости результатов измерения материал пластин желательно выбирать имеющим характеристики близкие к характеристикам материала измеряемой металлоконструкции.

Используемые допущения

В работе считаем сцепление металлоконструкции и датчика идеальным. Все деформации, возникающие в металлоконструкции в месте крепления датчика, считаем передающимися ему без потерь. Кроме того, будем считать, что поверхность датчика не подвергается каким-либо дополнительным сторонним внешним нагрузкам и его деформация обусловлена исключительно деформациями, передаваемыми датчику

металлоконструкцией, к которой он прикреплен, напряжениями, перпендикулярными к поверхности датчика будем пренебрегать, а напряженное состояние датчика будем считать плоским. Характер циклического нагружения датчика считаем известным.

Методы

Рассмотрим датчик с чувствительными элементами - пластинами, выполненными из одного материала, различающимися только глубиной пропилов. Число циклов нагружения исследуемого объекта можно визуально оценить по размерам трещин в пластинах датчика при помощи формулы Пэриса:

$$N = \frac{2}{(n-2)\cdot C\cdot M^{(n/2)}\cdot \Delta\sigma^{n}}\cdot\left[\frac{1}{a_{o}^{(n-2)/2}}-\frac{1}{a_{к}^{(n-2)/2}}\right], \quad (1)$$

где n и C – параметры циклической трещиностойкости материала пластин; M – параметр формы данной пластины и формы трещины; Δσ – размах напряжений в пластинах, полученный из предварительных исследований; a_0, $a_к$ – начальный и конечный размер трещины.

Критический размер трещины может быть найден через коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Он вычисляется по следующей формуле:

$$K_{max} = y_1 \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi a_c}, \quad (2)$$

где K_{max} – максимальное значение КИН для материала пластины за один цикл нагружения; a_c – критическая длина трещины; y_1 – поправочный коэффициент для пластины с боковыми трещинами, σ_{max} – максимальное напряжение за один цикл нагружения.

Поправочный коэффициент зависит от вида трещины, места ее расположения, особенности нагружения объекта и рассчитывается по соответствующей формуле, которая может быть подобрана для каждого случая по справочникам и учебникам. Так, например, для пластины с двумя боковыми трещинами поправочный коэффициент вычисляется по формуле [24]:

$$y_1 = 1{,}12 + 0{,}203 \cdot (a/b) - 1{,}197 \cdot (a/b)^2 + 1{,}93 \cdot (a/b)^3, \quad (3)$$

где a и b – начальная длина трещины и ширина пластины соответственно, при этом $a/b < 0{,}7$.

Отметим, что точные значения параметров, используемых в формуле 1, обычно определяются экспериментальным путем, но для стандартных видов сталей известны их средние значения [24].

Результаты

Выполним анализ влияния глубины пропила на усталостную прочность пластин, а именно – установим взаимосвязь между глубиной пропила и количеством циклов до разрушения пластины.

Рассмотрим пять одинаковых образцов пластин с пропилами разной глубины, которая начинается с минимального значения в 5 мм и заканчивается максимальным пропилом в 25 мм с каждой стороны. При этом ширина самих пластин составляет 400 мм. Для проведения расчетов используем следующие значения параметров: в качестве материала образца используем сталь А514. Начальную длину трещины с каждой стороны пластины примем для всех образцов одинаковой и равной $a_0 = 5$ мм. Максимальное напряжение для пластины без пропилов: $\sigma_{max} = 400$ Н/мм^2, минимальное напряжение для пластины без пропилов $\sigma_{min} = 200$ Н/мм^2. Размах напряжений: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 200$ Н/мм^2.

Аналогично поправочному коэффициенту значение КИН может быть рассчитан по различным формулам в зависимости от конкретного случая. Для пластины с двумя симметричными краевыми трещинами при изгибе значение коэффициента интенсивности нагружения можно определить по формуле [25]:

$$K_{max} = \frac{6 \cdot M}{t \cdot W^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_0} \cdot F_1(\alpha), \quad (4)$$

где М – изгибающий момент, Н · мм; t – толщина пластины, мм; W – ширина пластины, мм; безразмерный коэффициент $F_1(\alpha)$, определяемый по известным графикам [25].

Определим значение коэффициента интенсивности нагружения для пластины с пропилом 5 мм с каждой стороны. Примем толщину пластины t = 0,05 мм; изгибающий момент примем равным: М = 1000 Нм = 10^6 Н · мм; безразмерный коэффициент $F_1(\alpha)$ для этого случая равен, приблизительно, 1,094. Тогда:

$$K_{max} = \frac{6 \cdot 1000000 \text{ Н} \cdot \text{мм}}{0{,}05 \text{ мм} \cdot 390 \text{ мм}^2} \cdot \sqrt{\pi \cdot 5 \text{ мм}} \cdot 1{,}094 = 3419{,}94 \text{ Н/мм}^{3/2}.$$

Критическую длину трещины можно определить в соответствии с критерием Ирвина $K_{1C} = K_{max}$ по следующей формуле:

$$a_c = \left(\frac{K_{1c}}{y_1 \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi}}\right)^2. \quad (5)$$

Для пластины с пропилом 10 мм с каждой стороны критическая длина трещины равна:

$$a_c = \left(\frac{3419{,}94}{1{,}12445 \cdot 440 \cdot \sqrt{3{,}14}}\right)^2 = 15{,}272 \text{ мм}.$$

Выполнение в пластинах пропилов уменьшает площадь самих пластин, поэтому величины напряжений, возникающих в пластинах, также будут изменяться, при этом на уменьшение площади влияет не только глубина

пропила, но также и ширина пропила. Примем, что выполнение пропила глубиной 5 мм с каждой стороны уменьшает площадь пластины на 10%, а поскольку величина напряжения прямо пропорциональна площади, то напряжения, возникающие в пластине, увеличатся на 10%.

Результаты расчета критической длины трещины для пластин сведем в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчета критической длины трещины

Ширина пластины с учетом пропилов b, мм	σ_{max}, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$	Поправочный коэффициент y_1	$\frac{a_0}{b}$	Критическая длина трещины, мм
390	440	1,12241	0,0128	15,272
380	480	1,12247	0,0132	14,236
370	520	1,12253	0,0135	13,495
360	560	1,12259	0,0139	12,982
350	600	1,12266	0,0143	12,656

Построим график зависимости критического размера трещины от ширины пластины (Рис. 2.).

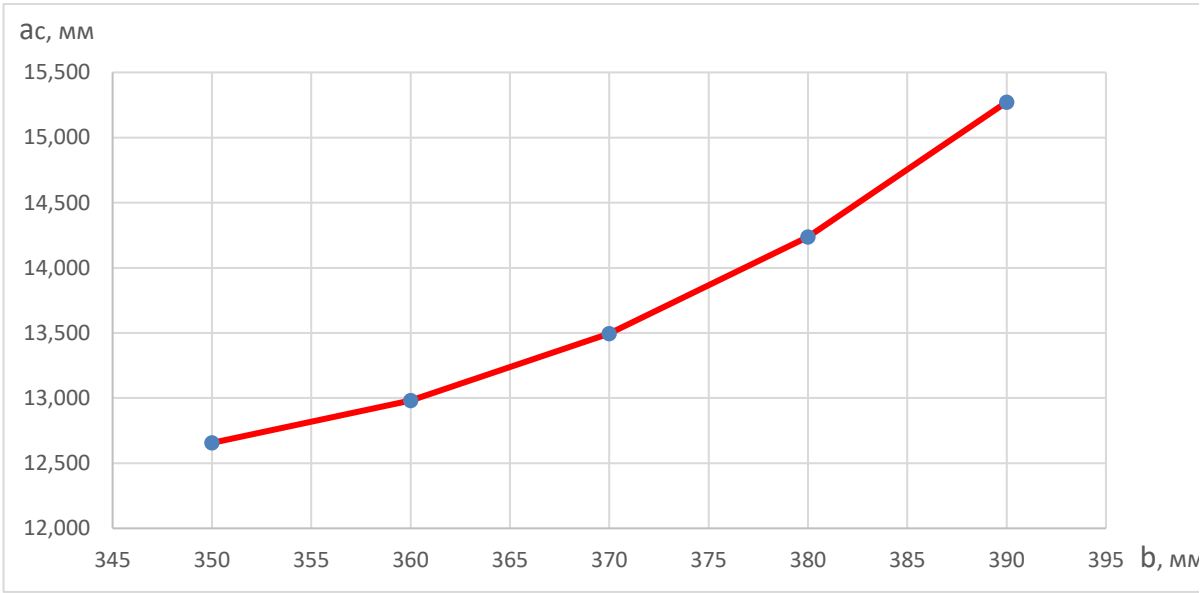


Рис. 2. График зависимости критической длины трещины от ширины пластины с учетом пропилов

Определим количество циклов нагружения пластины. Для этого произведем расчет по формуле 1:

$$N = \frac{2}{(n-2)\cdot C\cdot M^{\left(\frac{n}{2}\right)}\cdot \Delta\sigma^{n}}\cdot\left[\frac{1}{a_0^{\frac{n-2}{n}}}-\frac{1}{a_c^{\frac{n-2}{n}}}\right]=$$

$$=\frac{2}{(3-2)\cdot 1{,}84\cdot 10^{-13}\cdot(1{,}124^2\cdot\pi)^{\left(\frac{3}{2}\right)}\cdot 200^3}\cdot\left[\frac{1}{5^{\frac{3-2}{3}}}-\frac{1}{15{,}272^{\frac{3-2}{3}}}\right]=$$

$= 31386{,}24$ циклов,

где $M = y_1^2\pi$; параметр n может принимать значения в пределах 2..6, примем n=3; параметр C можно определить по корреляционной зависимости [24]: C=1,32*10^(-4)*(1/895^n)=1,84*10^-13.

Результаты расчета для пластин другой ширины сведем в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета количества циклов нагружения

Ширина пластины с учетом пропилов b (мм)	Критическая длина трещины, мм	Количество циклов нагружения N, тыс. циклов
390	15,272	31386,24
380	14,236	29733,06
370	13,495	28446,00
360	12,982	27498,95
350	12,656	26869,08

Из таблицы 2 видно, что на количество циклов нагружения также, как и на критический размер трещины, влияет ширина пластины в месте выполнения пропилов. Построим график зависимости количества циклов нагружения от ширины пластины (Рис. 3).

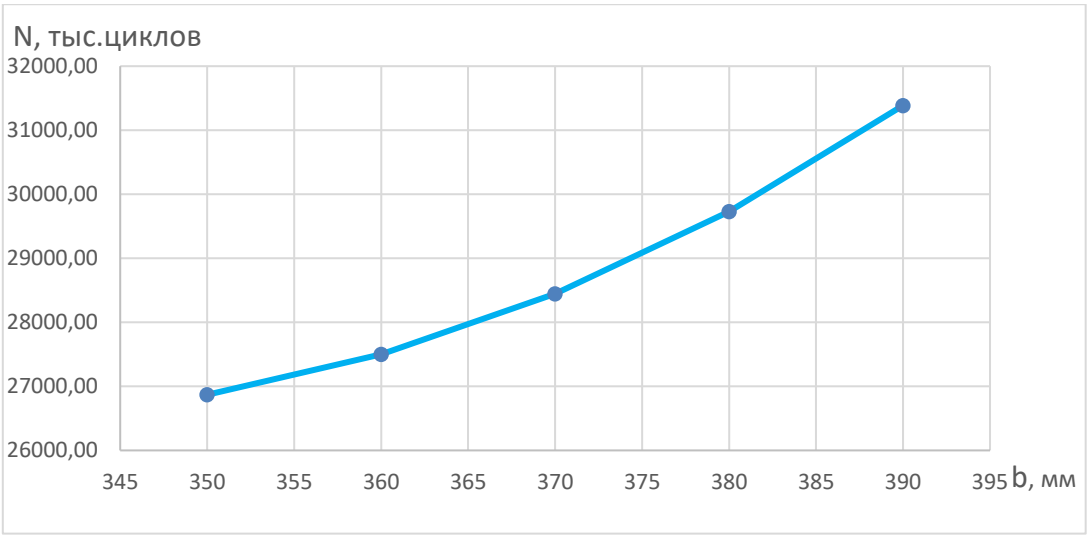


Рис. 3. График зависимости количества циклов нагружения от ширины пластины

Как видно из рис. 3, чем больше будет глубина пропила, тем быстрее будет разрушена пластина с этим пропилом, поскольку в пластине с пропилом большой глубины границы сильнее влияют на скорость развития трещины.

Обсуждение

Использование предлагаемого составного датчика позволяет упростить процесс оценки износа металлоконструкции, находящейся под действием циклического нагружения. Низкая стоимость, автономность, энергонезависимость и простота такого датчика обеспечивает широкую область его применения. Используемые в датчике пластины с различной глубиной пропила, а также конструкция датчика и способ его закрепления на измеряемом объекте являются предметом дальнейшей оптимизации и совершенствования.

Заключение

В работе предложен новый составной датчик степени износа металлоконструкции, имеющий несколько чувствительных элементов, имеющих пропилы в средней части чувствительного элемента.

Данный датчик позволяет визуально оценивать степень износа металлоконструкции по последовательному разрушению пластин. На примере было продемонстрировано влияние глубины пропила в пластинах на процесс разрушения этих пластин. Пластины будут поочередно разрушаться, начиная с пластины с наибольшим пропилом и заканчивая пластиной с пропилом наименьшей глубины. Были приведены расчетные значения поправочных коэффициентов для пластин с двумя симметричными трещинами, а также значения критической длины трещины для пластин с разной глубиной пропилов. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что способ, в виду своей эффективности, простоты, дешевизны, энергонезависимости, автономности, а также возможности применения на изделиях в процессе их работы для контроля их текущего состояния, может найти широкое применение в различных областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за I полугодие 2023 года // Уголь. 2023. № 9. С. 5-13. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-5-13.

[2] Добыча угля открытым способом в провинциях Фри-Стейт и Мпумаланга на территории Южно-Африканской Республики по данным спутниковой съемки / И. В. Зеньков, Чинь Ле Хунг, Е. В. Логинова [и др.] // Уголь. – 2024. – № 1(1176). – С. 109-112. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-109-112. – EDN NGOEVK.
[3] Overload and variable amplitude load effects on the fatigue strength of welded joints / K. Grönlund, A. Ahola, Ja. Riski [et al.] // Welding in the World. – 2024. – Vol. 68, No. 2. – P. 411-425. – DOI 10.1007/s40194-023-01642-z. – EDN FPLICG.
[4] Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil. REM // International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3, p. 443-449. DOI: 10.1590/0370-44672017710189
[5] Соколов, С. А. Исследование разрушения сварного узла при отрицательной температуре / С. А. Соколов, А. А. Грачев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 405-417. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-548. – EDN DYQZKO.
[6] Рябикин, А. Ю. Карта режимов изнашивания износостойких сталей / А. Ю. Рябикин, М. А. Скотникова, Г. В. Иванова // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 259-274. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-537. – EDN HWFEIE.
[7] Ershov, D. Vibration amplitude and frequency parameters of technological equipment drives / D. Ershov, I. Lukyanenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 187. – P. 537-548. – DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_44. – EDN OVZZLQ.
[8] I N Budilov, V S Zhernakov, and K V Koneva Calculation of force and energy parameters of fracture in the area of the front of the crack in the shell of the reactor of coke chambers / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 709 (2020) 033026 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/709/3/033026
[9] Vibration Protection of the Robotic Arm from External Effects on the Base / S. Ivanov, T. Zudilova, L. Ivanova [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 514-522. – EDN QFCDZC.
[10] Crack Formation in Metal Structures of Heavy Dump Trucks during Operation at Kuzbass Open Pit Mines / A. Pokatilov, A. Shirokolobova, R. Dobrynin, A. Vinidiktov // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 03020. – DOI 10.1051/e3sconf/202017403020. – EDN UQCAZI.
[11] Изюмова, А. Ю. Развитие экспериментальной методики оценки эволюции усталостной трещины в титановых сплавах на основе энергетического подхода / А. Ю. Изюмова, А. Н. Вшивков, О. А.

Плехов // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 5. – С. 61-70. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_5_61. – EDN RVUCEA.
[12] Vinogradova A, Gogolinskii K, Umanskii A, Alekhnovich V, Tarasova A, Melnikova A. Method of the Mechanical Properties Evaluation of Polyethylene Gas Pipelines with Portable Hardness Testers. Inventions. 2022; 7(4):125. https://doi.org/10.3390/inventions7040125.
[13] Повышение эффективности эксплуатации карьерных самосвалов БЕЛАЗ с ГМП, оснащенных бортовыми системами диагностирования / С. А. Рынкевич, А. Н. Егоров, В. П. Тарасик, А. Н. Максименко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 1(34). – С. 99-106. – DOI 10.53078/20778481_2012_1_99. – EDN OZAASR.
[14] Захаров, М. Н. Оценка напряженного состояния в зоне силового контакта деталей машин методом конечных элементов по различным теориям прочности / М. Н. Захаров, И. В. Магнитский, А. В. Медовщиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 6(771). – С. 32-39. – EDN TPRRLE.
[15] Bokarev, S. A. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders / S. A. Bokarev, K. O. Zhunev, A. M. Usol'tsev // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 8(84). – P. 119-129. – DOI 10.18720/MCE.84.12. – EDN RVTGIB.
[16] О возможности применения магнитного метода неразрушающего контроля для оценки напряженности и остаточного ресурса металлических силовых конструкций объектов наземной космической инфраструктуры / К. В. Алексеев, А. Н. Добролюбов, А. С. Лебедев, Д. П. Мохнаткин // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2015. – № 646. – С. 124-127. – EDN TSNEMN.
[17] Экспериментально-расчетный метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок / Д. А. Троценко, А. К. Давыдов, А. Н. Зайцев [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 1. – С. 25-28. – EDN JUQBPN.
[18] До, Д. Ч. Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / До Дык Чонг, 2022. – 104 с. – EDN CFBWTA.
[19] Deshpande, Radhika & Tumminello, Silvana & Ayachi, Sahar & Mueller, Eckhard & Boor, Johannes. (2022). Effect of joining temperature on the interconnection zone and electrical resistance of Ag/n-Mg 2 Si and Ag/n-Mg 2 Sn contacts. Materials Advances. 10.1039/D2MA00038E.
[20] Косов, Д. А. Анализ напряженно-деформированного состояния алюминиевого сплава Д16Т при сложном напряжённом состоянии с

учетом повреждённости / Д. А. Косов, Д. И. Федоренков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 45-53. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.4.05. – EDN HPYNQK.
[21] Крицкий, Д. Ю. Организация мониторинга стрел экскаваторов-драглайнов в режиме эксплуатации / Крицкий Д. Ю., Мутыгуллин А. В., Шигин А. О., Бардаков В. В. // Горный журнал. 2018. № 2. С. 91-96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
[22] Загидулин, Р. В. Эмпирический метод распознавания группы стресс-коррозионных трещин в металле по сигналу накладного вихретокового преобразователя / Р. В. Загидулин, А. Т. Бакиев, Т. А. Бакиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 11. – С. 149-159. – DOI 10.18799/24131830/2022/11/3666. – EDN EIUXEQ.
[23] Патент на полезную модель № 231380 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/32. Устройство для визуального контроля износа металлических конструкций : заявл. 24.10.2024 : опубл. 24.01.2025 / В. Г. Мельников, М. Ю. Насонов, А. М. Григоров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II". – EDN KESXIP.
[24] Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: в 2 т. Т. 2/ В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. Киев: Наукова думка, 1987. – 1302 с. – 1, 2 т.
[25] Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : в 2 т. Т. 1 / пер. с англ. ; под ред. Ю. Мураками. — М. : Мир, 1990. — 448 с. : ил.

V. G. Melnikov[1], M. Yu. Nasonov[1], N.A.Dudarenko[2], A. M. Grigorov[1]

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SENSORS FOR ASSESSING WEAR OF METAL STRUCTURES UNDER CYCLIC LOADING

[1]St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Russia;
[2]ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

In this paper, the problem of diagnosing fatigue failure of metal structures is considered. A new method has been proposed and a new sensor device has been developed for diagnosing metal structures under cyclic loading. The sensor consists of several rectangular plates rigidly fixed to the surface of the metal structure, with cuts of varying depths in the middle part of each plate. It is shown

that the use of the proposed sensor makes it possible to visually assess the accumulated wear of a metal structure based on the condition of its metal plates.

Key words: metal structures, stresses, loading cycles, cracks, sensor.

REFERENCES

[1] Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. The results of the work of the Russian coal industry for the first half of 2023 // Coal. 2023. No. 9. pp. 5-13. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-5-13.

[2] Open-pit coal mining in the provinces of Free State and Mpumalanga in the territory of the Republic of South Africa according to satellite imagery / I. V. Zenkov, Chin Le Hung, E. V. Loginova [et al.] // Coal. – 2024. – № 1(1176). – Pp. 109-112. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-109-112. – EDN NGOEVK.

[3] Overload and variable amplitude load effects on the fatigue strength of welded joints / K. Grönlund, A. Ahola, Ja. Riski [et al.] // Welding in the World. – 2024. – Vol. 68, No. 2. – P. 411-425. – DOI 10.1007/s40194-023-01642-z. – EDN FPLICG.

[4] Campelo Ana Carla de Melo Moreira, Marin Tatiane. The impact of payload truck factor use in mine performance reports for an open pit copper mine in Brazil. REM // International Engineering Journal. 2018. Vol. 71. Iss. 3, p. 443-449. DOI: 10.1590/0370-44672017710189

[5] Sokolov, S. A. Investigation of the destruction of a welded joint at a negative temperature / S. A. Sokolov, A. A. Grachev // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – PP. 405-417. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-548. – EDN DYQZKO.

[6] Ryabikin, A. Y. Map of wear modes of wear-resistant steels / A. Y. Ryabikin, M. A. Skotnikova, G. V. Ivanova // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – PP. 259-274. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-537. – EDN HWFEIE.

[7] Ershov, D. Vibration amplitude and frequency parameters of technological equipment drives / D. Ershov, I. Lukyanenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – Vol. 187. – P. 537-548. – DOI 10.1007/978-981-15-5580-0_44. – EDN OVZZLQ.

[8] Zhernakov, V. S. Calculation of force and energy parameters of fracture in the area of the front of the crack in the shell of the reactor of coke chambers / V. S. Zhernakov, I. N. Budilov, K. V. Koneva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 709, 3, Issue 2. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 033026. – DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033026. – EDN OEPYNM.

[9] Vibration Protection of the Robotic Arm from External Effects on the Base / S. Ivanov, T. Zudilova, L. Ivanova [et al.] // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – No. 26. – P. 514-522. – EDN QFCDZC.
[10] Crack Formation in Metal Structures of Heavy Dump Trucks during Operation at Kuzbass Open Pit Mines / A. Pokatilov, A. Shirokolobova, R. Dobrynin, A. Vinidiktov // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 03020. – DOI 10.1051/e3sconf/202017403020. – EDN UQCAZI.
[11] Izyumova A. Yu., Vshivkov A. N., Plekhov O. A. Development of an experimental methodology for assessing the evolution of fatigue cracks in titanium alloys based on an energy approach // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 5. – pp. 61-70. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_5_61. – EDN RVUCEA.
[12] Bochkarev, Yu. S. Increasing the efficiency of operation of quarry dump trucks during the development of alluvial deposits of the North / Yu. S. Bochkarev, I. V. Zyryanov // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2022. – No. 5-2. – P. 80-90. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_52_0_80. – EDN GCMLFJ.
[13] Increasing the operating efficiency of BELAZ mining dump trucks with GMP equipped with on-board diagnostic systems / S. A. Rynkevich, A. N. Egorov, V. P. Tarasik, A. N. Maksimenko // Bulletin of the Belarusian-Russian University. – 2012. – No. 1(34). – pp. 99-106. – DOI 10.53078/20778481_2012_1_99. – EDN OZAASR.
[14] Zakharov, M. N. Assessment of the stress state in the zone of force contact of machine parts by the finite element method according to various strength theories / M. N. Zakharov, I. V. Magnitsky, A.V. Medovshchikov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mechanical engineering. – 2024. – № 6(771). – Pp. 32-39. – EDN TPRRLE.
[15] Bokarev, S. A. Stress-strain behavior of welded joints in railway girders / S. A. Bokarev, K. O. Zhunev, A. M. Usol'tsev // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 8(84). – P. 119-129. – DOI 10.18720/MCE.84.12. – EDN RVTGIB.
[16] On the possibility of using the magnetic method of non-destructive testing to assess the stress and residual life of metal power structures of ground-based space infrastructure objects / K. V. Alekseev, A. N. Dobrolyubov, A. S. Lebedev, D. P. Mokhnatkin // Proceedings Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. – 2015. – No. 646. – P. 124-127. – EDN TSNEMN.
[17] Experimental and computational method for predicting the residual life of metal structures of bridge cranes using metal films / D. A. Trotsenko, A. K.

Davydov, A. N. Zaitsev [etc.] // Labor safety in industry. – 2006. – No. 1. – P. 25-28. – EDN JUQBPN.
[18] Do, D. H. Assessment of the load on the main metal structures of EKG-10 excavators operating in coal mines in Vietnam : specialty 05.05.06 "Mining machines" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Do Duc Chong, 2022. – 104 p. – EDN CFBWTA.
[19] Deshpande, Radhika & Tumminello, Silvana & Ayachi, Sahar & Mueller, Eckhard & Boor, Johannes. (2022). Effect of joining temperature on the interconnection zone and electrical resistance of Ag/n-Mg 2 Si and Ag/n-Mg 2 Sn contacts. Materials Advances. 10.1039/D2MA00038E.
[20] Kosov, D. A. Analysis of the stress-strain state of D16T aluminum alloy under complex stress conditions, taking into account damage / D. A. Kosov, D. I. Fedorenkov // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. – 2023. – No. 4. – pp. 45-53. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.4.05. – EDN HPYNQK.
[21] Kritsky, D. Yu. Organization of monitoring of the booms of dragline excavators in operating mode / Kritsky D. Yu., Mutygullin A. V., Shigin A. O., Bardakov V. V. // Mining Journal. 2018. No. 2. P. 91-96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
[22] Zagidulin, R.V. Empirical method for recognizing a group of stress-corrosion cracks in metal using a signal from an attached eddy current transducer / R.V. Zagidulin, A.T. Bakiev, T.A. Bakiev // News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. – 2022. – T. 333, No. 11. – P. 149-159. – DOI 10.18799/24131830/2022/11/3666. – EDN EIUXEQ.
[23] Utility Model Patent No. 231380 U1 Russian Federation, IPC G01N 3/32. Device for visual wear monitoring of metal structures : application no. 10/24/2024 : published on 01/24/2025 / V. G. Melnikov, M. Y. Nasonov, A.M. Grigorov ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II." – EDN KESXIP.
[24] Troshchenko V.T. Fatigue resistance of metals and alloys: in 2 volumes vol. 2/ V.T. Troshchenko, L.A. Sosnovsky. Kiev: Naukova dumka, 1987. – 1302 p. – 1, 2 t.
[25] Handbook of stress intensity coefficients : in 2 volumes Vol. 1 / translated from English ; edited by Yu. Murakami. — M. : Mir, 1990. — 448 p. : ill

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 629.5.081
doi:10.18720/SPBPU/2/id-110

Н.А. Поляков[1], С.Г. Чулкин[2]

СТАТИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА СБОРНОГО ГРЕБНОГО ВИНТА ЧЕРЕЗ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА МАСС ЕГО СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



[1]Никита Александрович Поляков,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-950-000-64-41, E-mail: nik.polyackov2010@yandex.ru.



[2]Сергей Георгиевич Чулкин,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-911-226-17-01 E-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы балансировки гребного винта через суперпозицию отбалансированных его элементов с контролем балансировки через определение смещения центра масс его составных элементов. В результате аналитических исследований выведены критерии отбалансированного элемента гребного винта в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства. Также в работе составлены выражения для определения координат центра масс изделия, установленного на платформу балансировочного стенда.

Ключевые слова: судостроение, гребной винт, статическая балансировка, центр масс.

Введение

Общая тенденция в промышленности к увеличению мощности, скорости работы различных устройств, связанных с передачей или преобразованием энергии, в частности таких как турбины и пропульсивные

комплекты, приводит к необходимости особого внимания к изготовлению их деталей. Так дисбаланс роторов турбин, гребных винтов снижает надежность и безопасность эксплуатации данных технических объектов и комплексов в целом. Так в немалом количестве работ в области судостроения проводились исследования вибрации в пропульсивном комплексе и ее влияние на понижение точности центровки валолинии, усталостное разрушение валопровода, подшипников, корпуса судна, воздействие на условия труда и отдыха персонала судна, а также повышение уровня акустического загрязнения окружающей среды [1-5]. Столь обширное воздействие вибраций на судно приводит к необходимости поиска способов ее анализа, прогноза и снижения уровня ее негативного воздействия [6-8].

Для гребных винтов эффективным способом снижения вибраций является их балансировка. Винты в зависимости от скоростей эксплуатации подвергаются статической и динамической балансировке [9].

Ранее были разработаны различные конструкции стендов и специальных приспособлений для статической балансировки цельнолитых гребных винтов [10-15], а также сборных гребных винтов регулируемого шага [16,17]. Наиболее полно обобщен и систематизирован теоретический и практический опыт балансировки гребных винтов в книге С.М. Гороховского [18]. Из работ [18,19] видно, что самым простым и распространенным способом статической балансировки гребных винтов является балансировка на ножах. Данный способ балансировки, а также альтернативные рассмотренные выше, ввиду современного уровня науки и техники являются нетехнологичными, особенно для крупногабаритных, сборных гребных винтов, винтов регулируемого шага ввиду следующих аспектов.

На крупногабаритных сборных винтах внутренняя поверхность обтекателя подвергается формообразованию путем литья и не подлежит механической обработке. В случае смещения полуформ литьевой оснастки и, как следствие, смещения главной оси инерции относительно геометрической оси вращения обтекателя, возникнет дисбаланс, которой невозможно оценить ввиду применения при балансировке гребного винта на ножах фальш вала, проходящего сквозь ступицу гребного винта и место установки обтекателя;

Балансировка тяжеловесных гребных винтов, масса которых может превышать 100 т, а диаметральный размер более 7м, становится сложной для реализации технической задачей недоступной для материального оснащения многих производств. Также большие массы изделий и оснастки снижают точность балансировки ввиду пропорционально высоких сил трения;

Для обеспечения взаимозаменяемости лопастей сборного гребного винта необходима балансировка на фальш валу относительно эталонной лопасти с наименьшей массой, выбранной из всего объема поставки. Такой подход не позволяет производить балансировку и сборку винта сразу после получения отливок. Возможна балансировка лопастей относительно эталона, однако целесообразно изготовления эталона после взвешивания всех лопастей, что также не позволяет производить балансировку и сборку винтов до окончательной механической обработки последней лопасти в партии.

Балансировка на ножах не позволяет отбалансировать винты с изменяемым шагом относительно оси вращения лопастей.

Исходя из вышеперечисленной проблематики, авторы видят решение в балансировке крупногабаритных сборных гребных винтов через определение смещения центра масс их составных элементов на измерительной платформе (балансировочном стенде) относительно допускаемой области с последующим аналитическим расчетом места и объема снимаемого дисбалансирующего материала.

Балансировочные стенды для определения положения центра масс объекта широко исследуются и применяются в ракетостроении. Ранее были опубликованы работы по разработке стендов работающих по разным принципам, через взвешивание на крану с применением специальных траверс и им подобных приспособлений [20-26], через маятниковую систему с грузами на качающейся платформе [27-29], через измерение амплитуды колебаний измерительной платформы с объектом измерения [30], через измерение тензодатчиками усилий воздействия измерительной платформы [31-34], а также улучшенный предыдущий вариант измерительной платформы позволяющая измерять также и в динамике тензор инерции [35].

Рассмотрев разработанные варианты стендов, можно сказать, что прототипов и технических решений достаточно для их переосмысления и применения в судостроении.

Целью данной работы является создание теоретической базы для определения дисбаланса сборных гребных винтов через определение центра тяжести их элементов.

Задачи работы:

-определить условие отбалансированного гребного винта через координаты центра тяжести элемента гребного винта;

-теоретически сформулировать порядок расчета координат центра тяжести элементов гребного винта исходя из выбранной конструкции балансировочного стенда.

Методы

Поставленные задачи в настоящей работе решаются аналитическим методом. Научная значимость данной работы заключается в создании формализированной связи требований Российского морского регистра судоходства (РМРС) и методикой балансировки гребных винтов через определение центра масс (ц.м.)

Результаты

По ГОСТ 8054 [36], а также по требованиям РМРС [37] гребной винт считается сбалансированным, если масса контрольного груза, приводящего винт во вращение при установке его на конец каждой горизонтально расположенной лопасти винта, меньше:

$$m \leq K \frac{m_в}{R}, \quad (1)$$

где m - масса контрольного груза, кг;
$m_в$- масса гребного винта, т;
R - радиус гребного винта, м;
K - коэффициент, принимаемый по таблице 1 [36, 37].

Таблица 1 Коэффициент К для гребных винтов

Номинальная частота вращения гребного винта, об/мин.	Коэффициент К для гребных винтов массой	
	До 10 т	Свыше 10 т
До 3,33 (200)	0,75	0,50
Св 3,33 до 8,33 (св.200 до 500)	0,5	
Св. 8,33 (500)	0,25	

Момент, приводящий гребной винт во вращение, должен превышать момент, вызванный его смещённым центром тяжести. Причем для выполнения условия взаимозаменяемости лопастей сборного гребного винта [40] примем, что каждая лопасть может создать статический момент не более определенной части общего допускаемого момента на гребной винт, определяемый отношением $s_э/n$, где n- коэффициент допуска балансировки на элемент гребного винта (в случае упрощенного расчета может быть принят равным количеству лопастей в винте). Таким образом, максимальный допустимый статический момент элемента гребного винта (э.г.в.) можно определить по формуле:

$$s_э = K \frac{m_в g R}{R} = K \frac{m_в g}{n}, \quad (2)$$

где $s_э$ – максимальная допускаемая величина статического момента создаваемого элементом гребного винта, Н*м.

Статический момент в гребном винте относительно оси гребного вала будет возникать при изменении координат центра тяжести и массы э.г.в. относительно номинального/проектного исполнения.

$$\Delta r * m_э \leq s_э\,, \tag{3}$$

где $m_э$ - масса элемента гребного винта, кг;
Δr-расстояние от номинального до фактического центра масс, м;
$s_э$-максимальный допустимый статический момент создаваемый лопастью.

Также можно представить уравнение (3) через изменение массы э.г.в. и расстояние от номинального центра масс до центра масс дисбаланса:

$$l * \Delta m_э \leq s_э\,, \tag{4}$$

где $\Delta m_э$ – отклонение э.г.в., кг;

l-расстояние от номинального центра масс винта до центра масс дисбаланса (добавленного или недостающего объема материала относительно номинальной лопасти/геометрии лопасти), м;
$s_э$-максимальный допустимый статический момент создаваемый э.г.в.

Величина допуска на координаты центра тяжести может быть сформулирована в виде зависимости от величины фактической массы лопасти и выражена из уравнения (5).

$$\Delta r \leq \frac{s_э}{m_э}, \tag{5}$$

где $m_э$ - масса лопасти, кг;
Δr-расстояние от номинального до фактического центра масс, м;
$s_э$-максимальный допустимый статический момент создаваемый лопастью.

Тогда условием отбалансированного гребного винта будет выполнение условия (5) для всех значимых с точки зрения создаваемого момента элементов гребного винта.

Определение центра тяжести лопасти

Для определения величины статического момента, создаваемого э.г.в. балансировки лопасти с целью проверки выполнения условия (5), необходимо определить расположение центра тяжести. Определение предлагается при помощи балансировочного стенда, представляющего из себя рабочий стол, опирающийся на 3 тензодатчика (рис.1). На рабочий стол устанавливается элементы гребного винта лопасти, обтекатели, ступицы, после определения нагрузок воспринимаемых тензодатчиками определяется координаты центра тяжести измеряемого изделия.

Для определения координат центра тяжести достаточно составить уравнения моментов относительно осей плоскости рабочего стола стенда согласно уравнениям (4) и (5) из которых можно выразить координаты центра масс измеряемого изделия – уравнения (6) и (7).

Для измерения центра тяжести могут быть применены разные конструкции балансировочного стенда в зависимости от типа гребного винта. Для ВФШ достаточно определения двух координат центра масс в сечении оси вращения винта. Для ВРШ необходимо также определение 3й координаты центра масс лопасти. Для определения координат центра тяжести лопасти во всех сечениях может быть применена специальная оснастка с установкой лопасти на рабочий стол балансировочного стенда в разных положениях, либо применение наклонной платформы стенда. В таком случае (рис.2) зная угол наклона рабочего стола α и величину смещение координат центра тяжести (согласно расчетной схеме на рис.3) можно определить координату центра тяжести по высоте лопасти с помощью формулы 8.

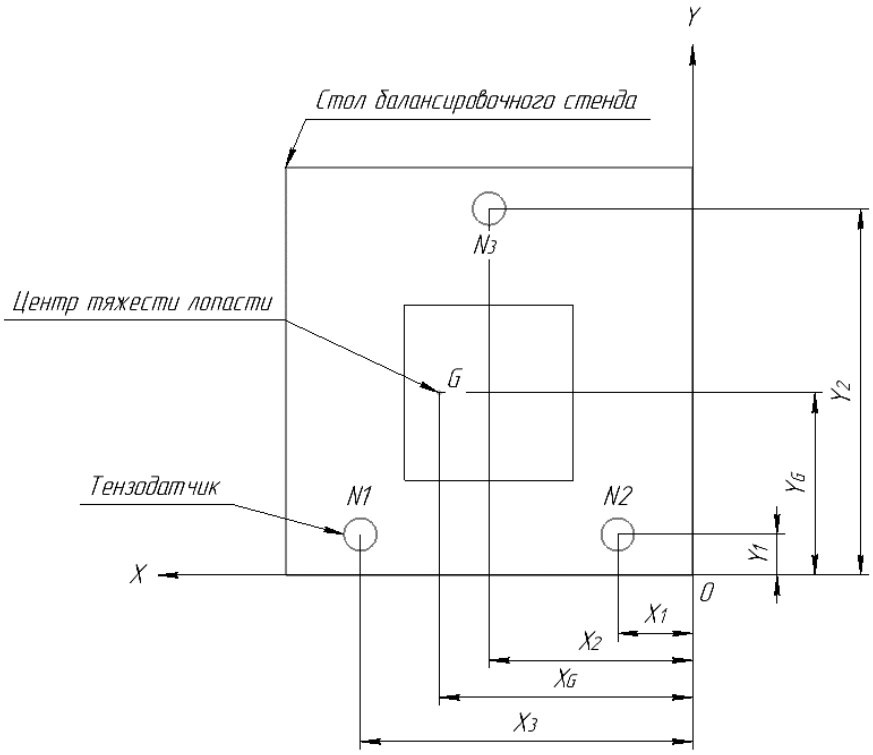


Рис. 1. Расчет центра тяжести лопасти.
N1, N2, N3 – реакции фиксируемые тензодатчиками

$$\sum M_{ox} = Y_1(N_1 + N_2) + Y_2(N_3) - GY_G = 0 \qquad (6)$$

$$\sum \quad M_{oy} = X_1(N_2) + X_2(N_3) + X_3(N_1) - GX_G = 0 \tag{7}$$

$$Y_G = \frac{Y_1(N_1 + N_2) + Y_2(N_3)}{G} \tag{8}$$

$$X_G = \frac{X_1(N_2) + X_2(N_3) + X_3(N_1)}{G} \tag{9}$$

Тогда согласно расчетной схеме 3, длину отрезка $Z_G G_X$ можно вычислить по формуле:

$$Z_G G_X = \frac{X_G - X_{GA}}{tga} = \frac{GxGa}{tga} \tag{10}$$

где $Z_G G_X$ - координата центра тяжести по координате Z;
X_G-координата центра тяжести до наклона рабочего стола;
X_{GA}-координата центра тяжести после наклона рабочего стола.

X_{GA} и X_G-определяются по формуле (9).

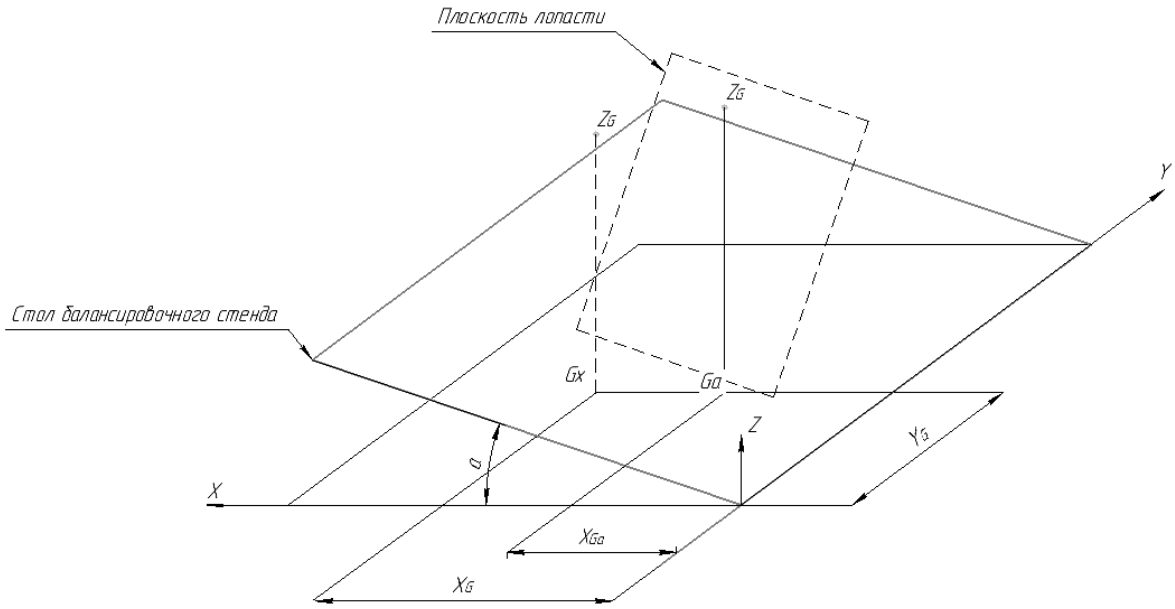


Рис. 2. Схематичное изображение наклона стола на угол α

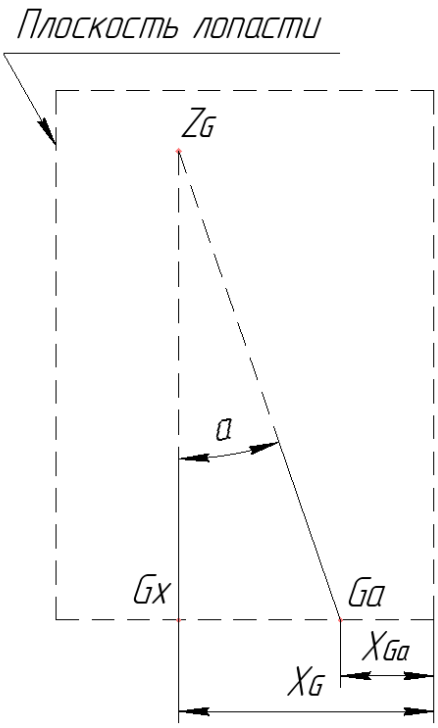


Рис. 3. Расчётная схема определение положения

Обсуждение

Полученный результат работы предоставляет возможность применения новой конструкции балансировочного стенда для балансировки крупногабаритных сборных и цельнолитых гребных винтов.

Дополнительным направлением к последующим исследованием будет определение коэффициента допуска балансировки для каждого элемента гребного винта, что позволит рационально перераспределить допуска на центры масс в гребном винте.

После рассмотрения стендов из ракетостроительной отрасли, можно сказать, что конструкция стендов для судостроения окажется проще благодаря меньшему количеству измеряемых параметров и не столь высоких требований к точности измерений. Однако определение требований к точности измерения координат центра масс элементов гребного винта является дополнительным вопросам к последующим работам.

Заключение

Таким образом сформированы базовые положения для определения дисбаланса сборных гребных винтов через определение центра тяжести их элементов.

Определено условие отбалансированного гребного винта через координаты центра тяжести его составных элементов.

Теоретически сформулирован порядок расчета координат центра тяжести элементов гребного винта исходя из выбранной конструкции балансировочного стенда.

Полученные результаты закладывают основу для создания теоретической базы балансировки сборных гребных винтов путём определения центра масс их составных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Sharma, S. K. Propelling precision of longitudinal vibration mitigation in ship propeller shafts through advanced nonlinear intelligent semi-active control leveraging adaptive neuro-fuzzy inference system with linear quadratic regulator / S. K. Sharma, R. Ch. Sharma, Ja. Lee // Journal of Vibration and Control. – 2024. – DOI 10.1177/10775463241244836.

[2] Korczewski, Z. Energy Analysis of the Propulsion Shaft Fatigue Process in a Rotating Mechanical System Part II Identification Studies – Developing the Fatigue Durability Model of a Drive Shaft / Z. Korczewski, K. Marszałkowski // Polish Maritime Research. – 2020. – Vol. 27, No. 2. – P. 120-124. – DOI 10.2478/pomr-2020-0033.

[3] Kolle Kleivane, S. Reliability Analysis of Crack Growth Occurrence for a Secondary Hull Component Due to Vibration Excitation / S. Kolle Kleivane, B. J. Leira, S. Steen // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2024. – Vol. 146, No. 5. – DOI 10.1115/1.4064499.

[4] Minchev, Yu. Mechano-mathematical model and experimental results on the dynamic relation between marine propeller oscillation and main Ship engine / Yu. Minchev, I. Minchev // Environment. Technology. Resources. – 2024. – Vol. 3. – P. 185-189. – DOI 10.17770/etr2024vol3.8125.

[5] Frequency Based Damage Detection and Localization of Propeller Shaft of a Ship Using Experimental Modal Analysis // Journal of Science and Technolgy. – 2020. – No. Volume 5. – P. 188-198. – DOI 10.46243/jst.2020.v5.i4.pp188-198.

[6] Analysis of the Underwater Radiated Noise Generated by Hull Vibrations of the Ships / R. F. Javier, R. Jaime, P. Pedro [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 1035. – DOI 10.3390/s23021035.

[7] Beltrán Palomo, P. The great challenge of propeller cavitation in shipbuilding. Continuous control with the innovative Non-Intrusive Cavitation Detection System (Ni-CDS) / P. Beltrán Palomo, R. García Méndez, L. A. Piqueras // Ciencia y tecnología de buques. – 2023. – Vol. 17, No. 33. – P. 21-32. – DOI 10.25043/19098642.239.

[8] Analytical study on longitudinal vibration characteristics of the coupled shaft and conical-cylindrical shell / C. Zhang, Y. Tian, D. Xie, L. Yang // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 223. – P. 108691. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2021.108691.
[9] Яковлев, Л. П. Балансировка гребных винтов / Л. П. Яковлев // Современные проблемы логистики, экономики, управления в эпоху глобальных вызовов : материалы II Международной заочной научно-практической конференции, Астрахань, 14 декабря 2022 года. – Астрахань: Индивидуальный предприниматель Сорокин Роман Васильевич (Издатель: Сорокин Роман Васильевич), 2023. – С. 233-238.
[10] Авторское свидетельство № 1504525 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для статической балансировки изделий : № 4015122 : заявл. 03.02.1986 : опубл. 30.08.1989 / П. В. Рехкалайнин, Г. Е. Гладков, Е. С. Миркович.
[11] Авторское свидетельство № 1562721 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для статической балансировки : № 4452650 : заявл. 01.07.1988 : опубл. 07.05.1990 / И. В. Апраксин, Б. В. Бушев ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-1944.
[12] Авторское свидетельство № 781645 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для статической балансировки вращающихся изделий : № 2536710 : заявл. 26.10.1977 : опубл. 23.11.1980 / В. Т. Гох, О. В. Стецюк, И. Н. Чичин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я М-5828.
[13] Авторское свидетельство № 794409 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Стенд для статической балансировки гребных винтовых : № 2725409 : заявл. 16.02.1979 : опубл. 07.01.1981 / А. М. Кац, К. А. Пугач, В. Я. Хейфец ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4780.
[14] Авторское свидетельство № 540181 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Стенд для статической балансировки гребных винтов : № 1981083 : заявл. 24.12.1973 : опубл. 25.12.1976 / А. Е. Гриншпун, В. Б. Файнман, В. Я. Хейфец.
[15] Авторское свидетельство № 920416 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Стенд для статической балансировки гребных винтов : № 2966250 : заявл. 21.07.1980 : опубл. 15.04.1982 / А. М. Кац, К. А. Пугач ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4780.
[16] Авторское свидетельство № 1062125 A1 СССР, МПК B63H 1/14, G01M 1/12. Устройство для статической балансировки съемных лопастей преимущественно гребного винта : № 3489509 : заявл. 07.09.1982 : опубл. 23.12.1983 / А. В. Минаенко, О. Л. Потемкин, В. И. Лосев ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4217.
[17] Авторское свидетельство № 115058 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Приспособление для определения двух ортогональных статических

моментов отъемных лопастей гребных винтов : № 571302 : заявл. 16.04.1957 : опубл. 01.01.1958 / Г. И. Копелиович.
[18] Гороховский С.М. Балансировка гребных винтов. — Ленинград : Судостроение, 1964. — 143 с.
[19] Чулкин С. Г. Технология создания морской техники учебное пособие, / С.Г. Чулкин, П.М. Лысенков, В.И. Черненко; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный морской технический университет". — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГМТУ, 2017. — 167 с. ил., табл.; 20. — ISBN 978-5-88303-575-2
[20] Макаров, И. И. Преимущества и недостатки горизонтального расположения изделий при определении координат центра масс / И. И. Макаров // Технология машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 43-49.
[21] Автоматизированный стенд компьютерного контроля инерционных характеристик изделий в сборочном производстве / Е. В. Кочкин, Е. В. Матвеев, А. В. Медарь, В. И. Меденков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10. – С. 15-17.
[22] Автоматизированный стенд компьютерного контроля инерционных характеристик изделий в сборочном производстве / Е. В. Кочкин, Е. В. Матвеев, А. В. Медарь, В. И. Меденков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10. – С. 15-17.
[23] Авторское свидетельство № 1252678 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для определения координат центра масс изделий : № 3834847 : заявл. 04.01.1985 : опубл. 23.08.1986 / Ю. Я. Черных, А. Н. Бурдин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-7650.
[24] Патент № 2100783 C1 Российская Федерация, МПК G01G 19/14. способ определения координат центра массы объекта : № 4918701/28 : заявл. 29.12.1990 : опубл. 27.12.1997 / Ю. Д. Мешков.
[25] Патент на полезную модель № 133824 U1 Российская Федерация, МПК B66F 11/00. устройство для определения центра масс : № 2013131701/11 : заявл. 10.07.2013 : опубл. 27.10.2013 / С. М. Шершаков, А. В. Сафронов, С. И. Лемесев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова".
[26] Патент на полезную модель № 114526 U1 Российская Федерация, МПК G01M 1/12. устройство для определения продольной координаты центра масс изделия : № 2011146517/28 : заявл. 16.11.2011 : опубл. 27.03.2012 / С. В. Качалов, Г. А. Качалова, В. В. Воронцова ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Сатурн".

[27] Авторское свидетельство № 1310649 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для определения координат центра масс изделий : № 3660406 : заявл. 02.11.1983 : опубл. 15.05.1987 / В. А. Борисов, Ю. Н. Воеводин, Л. А. Жучков [и др.].
[28] Патент № 2027159 C1 Российская Федерация, МПК G01M 1/12. Способ определения координат центра масс изделия и устройства для его осуществления : № 5055020/28 : заявл. 28.05.1992 : опубл. 20.01.1995 / В. В. Крылов, В. В. Крылов, И. П. Сайдачаков, Е. Я. Лукьянцев.
[29] Авторское свидетельство № 845032 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Способ определения координат центра масс изделий : № 2677728 : заявл. 19.10.1978 : опубл. 07.07.1981 / В. Б. Бурыкин, В. В. Крылов, А. М. Плахов [и др.] ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-2190.
[30] Авторское свидетельство № 1795317 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Способ определения положения центра масс объекта : № 4849137 : заявл. 09.07.1990 : опубл. 15.02.1993 / В. А. Комаров, В. Л. Кущ, Н. Ф. Хильченко, А. В. Егоршев ; заявитель КИЕВСКОЕ ВЫСШЕЕ ВОЕННОЕ АВИАЦИОННОЕ ИНЖЕНЕРНОЕ УЧИЛИЩЕ.
[31] Авторское свидетельство № 1460630 A1 СССР, МПК G01M 1/12, G01L 7/02. Устройство для определения положения и координат центра масс изделия : № 4253260 : заявл. 01.06.1987 : опубл. 23.02.1989 / Д. М. Гориневский ; заявитель ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ АН СССР.
[32] Патент № 2458328 C1 Российская Федерация, МПК G01M 1/12. Устройство для определения массы и положения центра масс изделия : № 2011116229/28 : заявл. 26.04.2011 : опубл. 10.08.2012 / Е. В. Матвеев, Е. В. Кочкин, А. В. Медарь, В. И. Меденков ; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ТЕХНОМАШ".
[33] Патент № 2485466 C1 Российская Федерация, МПК G01M 1/12. Способ определения массы и положения центра масс изделия и устройство для его осуществления : № 2011151309/28 : заявл. 16.12.2011 : опубл. 20.06.2013 / Е. В. Матвеев, А. В. Блинов, Е. В. Кочкин ; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ТЕХНОМАШ".
[34] Авторское свидетельство № 1265505 A1 СССР, МПК G01M 1/12. Устройство для определения массы и координат центра масс изделия : № 3921478 : заявл. 03.07.1985 : опубл. 23.10.1986 / В. И. Феофилактов ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-8597.
[35] Патент № 2830397 C1 Российская Федерация, МПК G01M 1/10. Стенд для измерения массы, координат центра масс и моментов инерции

изделий : № 2024117666 : заявл. 26.06.2024 : опубл. 18.11.2024 / М. М. Богатырев, С. В. Дыцков, В. В. Лютов [и др.] ; заявитель Федеральное автономное учреждение "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского".
[36] ГОСТ 8054-81 ИПК Издательство стандартов. Винты гребные металлические. Общие технические условия, 1981-10 с;
[37] Российский морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть 7, СПб., 2025. – 109 с

N. Polyakov, S. Chulkin

STATIC BALANCING OF A PREFABRICATED PROPELLER BY DETERMINING THE CENTER OF MASS OF ITS COMPONENTS

Saint Petersburg State Maritime Technical University,
Russia, Saint Petersburg

Abstract

The paper considers the issues of balancing a propeller through a superposition of its balanced elements with balancing control through determining the displacement of the center of mass of its constituent elements. As a result of the work, the criteria for a balanced propeller element are derived in accordance with the requirements of the RMRS. Expressions for determining the coordinates of the center of mass of a product mounted on a balancing stand platform are also compiled in the work.

Key words: shipbuilding, propeller, static balancing, center of mass.

REFERENCES

[1] Sharma, S. K. Propelling precision of longitudinal vibration mitigation in ship propeller shafts through advanced nonlinear intelligent semi-active control leveraging adaptive neuro-fuzzy inference system with linear quadratic regulator / S. K. Sharma, R. Ch. Sharma, Ja. Lee // Journal of Vibration and Control. – 2024. – DOI 10.1177/10775463241244836.
[2] Korczewski, Z. Energy Analysis of the Propulsion Shaft Fatigue Process in a Rotating Mechanical System Part II Identification Studies – Developing the Fatigue Durability Model of a Drive Shaft / Z. Korczewski, K. Marszałkowski // Polish Maritime Research. – 2020. – Vol. 27, No. 2. – P. 120-124. – DOI 10.2478/pomr-2020-0033.
[3] Kolle Kleivane, S. Reliability Analysis of Crack Growth Occurrence for a Secondary Hull Component Due to Vibration Excitation / S. Kolle Kleivane,

B. J. Leira, S. Steen // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 2024. – Vol. 146, No. 5. – DOI 10.1115/1.4064499.
[4] Minchev, Yu. Mechano-mathematical model and experimental results on the dynamic relation between marine propeller oscillation and main Ship engine / Yu. Minchev, I. Minchev // Environment. Technology. Resources. – 2024. – Vol. 3. – P. 185-189. – DOI 10.17770/etr2024vol3.8125.
[5] Frequency Based Damage Detection and Localization of Propeller Shaft of a Ship Using Experimental Modal Analysis // Journal of Science and Technolgy. – 2020. – No. Volume 5. – P. 188-198. – DOI 10.46243/jst.2020.v5.i4.pp188-198.
[6] Analysis of the Underwater Radiated Noise Generated by Hull Vibrations of the Ships / R. F. Javier, R. Jaime, P. Pedro [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 1035. – DOI 10.3390/s23021035.
[7] Beltrán Palomo, P. The great challenge of propeller cavitation in shipbuilding. Continuous control with the innovative Non-Intrusive Cavitation Detection System (Ni-CDS) / P. Beltrán Palomo, R. García Méndez, L. A. Piqueras // Ciencia y tecnología de buques. – 2023. – Vol. 17, No. 33. – P. 21-32. – DOI 10.25043/19098642.239.
[8] Analytical study on longitudinal vibration characteristics of the coupled shaft and conical-cylindrical shell / C. Zhang, Y. Tian, D. Xie, L. Yang // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 223. – P. 108691. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2021.108691.
[9] Yakovlev, L. P. Balancing propellers / L. P. Yakovlev // Modern problems of logistics, economics, management in the era of global challenges : proceedings of the II International Correspondence Scientific and Practical Conference, Astrakhan, December 14, 2022. Astrakhan: Individual Entrepreneur Sorokin Roman Vasilyevich (Publisher: Sorokin Roman Vasilyevich), 2023. pp. 233-238. (rus.)
[10] Copyright certificate No. 1504525 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Device for static balancing of products : No. 4015122 : application 02/03/1986 : published 08/30/1989 / P. V. Rekhkalainin, G. E. Gladkov, E. S. Mirkovich. (rus.)
[11] Copyright certificate No. 1562721 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Static balancing device : No. 4452650 : application 07/01/1988 : published 05/7/1990 / I. V. Apraksin, B. V. Bushev ; applicant COMPANY P/I A-1944. (rus.)
[12] Copyright certificate No. 781645 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Device for static balancing of rotating products : No. 2536710 : application no. 10/26/1977 : published 11/23/1980 / V. T. Gokh, O. V. Stetsiuk, I. N. Chichin ; applicant COMPANY P/I M-5828. (rus.)
[13] Copyright certificate No. 794409 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Stand for static balancing of propellers : No. 2725409 : application. 02/16/1979 :

published. 01/7/1981 / A.M. Katz, K. A. Pugach, V. Ya. Kheifets ; applicant COMPANY P/I G-4780. (rus.)
[14] Copyright certificate No. 540181 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Stand for static balancing of propellers : No. 1981083 : application no. 12/24/1973 : published on 12/25/1976 / A. E. Grynshpun, V. B. Fineman, V. Ya. Kheifets. (rus.)
[15] Copyright certificate No. 920416 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Stand for static balancing of propellers : No. 2966250 : application 07/21/1980 : published 04/15/1982 / A.M. Katz, K. A. Pugach ; applicant COMPANY P/I G-4780. (rus.)
[16] Copyright certificate No. 1062125 A1 USSR, IPC B63H 1/14, G01M 1/12. Device for static balancing of removable blades mainly of a propeller : No. 3489509 : application 07.09.1982 : published 23.12.1983 / A.V. Minaenko, O. L. Potemkin, V. I. Losev ; applicant COMPANY P/I G-4217. (rus.)
[17] Copyright certificate No. 115058 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Device for determining two orthogonal static moments of detachable propeller blades : No. 571302 : application 04/16/1957 : published 01/01/1958 / G. I. Kopeliovich. (rus.)
[18] Gorokhovsky S.M. Balancing propellers. Leningrad : Sudostroenie Publ., 1964, 143 p. (rus.)
[19] Chulkin S. G. Technology of creating marine equipment a textbook, / S.G. Chulkin, P.M. Lysenkov, V.I. Chernenko; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Maritime Technical University". — Saint Petersburg : Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2017. - 167 p. ill., table.; 20. — ISBN 978-5-88303-575-2. (rus.)
[20] Makarov, I. I. Advantages and disadvantages of horizontal positioning of products when determining the coordinates of the center of mass / I. I. Makarov // Technology of mechanical engineering. – 2016. – No. 1. – pp. 43-49. (rus.)
[21] An automated stand for computer control of inertial characteristics of products in assembly production / E. V. Kochkin, E. V. Matveev, A.V. Medar, V. I. Medenkov // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering. – 2014. – № 10. – pp. 15-17. (rus.)
[22] An automated stand for computer control of inertial characteristics of products in assembly production / E. V. Kochkin, E. V. Matveev, A.V. Medar, V. I. Medenkov // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering. – 2014. – № 10. – pp. 15-17. (rus.)
[23] Copyright certificate No. 1252678 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. A device for determining the coordinates of the center of mass of products :

No. 3834847 : application 04.01.1985 : published 08/23/1986 / Yu. Ya. Chernykh, A. N. Burdin ; applicant COMPANY P/Ya A-7650. (rus.)
[24] Patent No. 2100783 C1 Russian Federation, IPC G01G 19/14. method for determining the coordinates of the center of mass of an object : No. 4918701/28 : application 29.12.1990 : published 27.12.1997 / Yu. D. Meshkov. (rus.)
[25] Utility model patent No. 133824 U1 Russian Federation, IPC B66F 11/00. device for determining the center of mass : No. 2013131701/11 : application 10.07.2013 : published 27.10.2013 / S. M. Shershakov, A.V. Safronov, S. I. Lemesev [et al.] ; applicant Federal State Unitary Enterprise "Central Institute of Aviation Engine Engineering named after P.I. Baranov. (rus.)
[26] Utility model patent No. 114526 U1 Russian Federation, IPC G01M 1/12. device for determining the longitudinal coordinate of the center of mass of a product : No. 2011146517/28 : application 16.11.2011 : published 27.03.2012 / S. V. Kachalov, G. A. Kachalova, V. V. Vorontsova ; applicant Open Joint Stock Company Scientific and Production Association Saturn". (rus.)
[27] Copyright certificate No. 1310649 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. A device for determining the coordinates of the center of mass of products : No. 3660406 : application 02.11.1983 : published 15.05.1987 / V. A. Borisov, Yu. N. Voevodin, L. A. Zhuchkov [et al.]. (rus.)
[28] Patent No. 2027159 C1 Russian Federation, IPC G01M 1/12. A method for determining the coordinates of the center of mass of a product and a device for its implementation : No. 5055020/28 : application 05/28/1992 : published 01/20/1995 / V. V. Krylov, V. V. Krylov, I. P. Saidachakov, E. Ya. Lukyantsev. (rus.)
[29] Copyright certificate No. 845032 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Method for determining the coordinates of the center of mass of products : No. 2677728 : application 19.10.1978 : published 07.07.1981 / V. B. Burykin, V. V. Krylov, A.M. Plakhov [et al.] ; applicant COMPANY P/I V-2190. (rus.)
[30] Copyright certificate No. 1795317 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Method for determining the position of the center of mass of an object : No. 4849137 : application 07/09/1990 : published 02/15/1993 / V. A. Komarov, V. L. Kushch, N. F. Khilchenko, A.V. Egorshev ; applicant KIEV HIGHER MILITARY AVIATION ENGINEERING SCHOOL. (rus.)
[31] Copyright certificate No. 1460630 A1 USSR, IPC G01M 1/12, G01L 7/02. Device for determining the position and coordinates of the center of mass of the product : No. 4253260 : application. 06/01/1987 : published. 02/23/1989 / D. M. Gorinevsky ; applicant INSTITUTE OF PROBLEMS OF INFORMATION TRANSMISSION of the USSR Academy of Sciences. (rus.)

[32] Patent No. 2458328 C1 Russian Federation, IPC G01M 1/12. A device for determining the mass and position of the center of mass of a product : No. 2011116229/28 : application 04/26/2011 : published 08/10/2012 / E. V. Matveev, E. V. Kochkin, A.V. Medar, V. I. Medenkov ; applicant FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE SCIENTIFIC AND PRODUCTION ASSOCIATION TECHNOMASH. (rus.)
[33] Patent No. 2485466 C1 Russian Federation, IPC G01M 1/12. A method for determining the mass and position of the center of mass of a product and a device for its implementation : No. 2011151309/28 : application 16.12.2011 : published 20.06.2013 / E. V. Matveev, A.V. Blinov, E. V. Kochkin ; applicant FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE SCIENTIFIC AND PRODUCTION ASSOCIATION TECHNOMASH. (rus.)
[34] Copyright certificate No. 1265505 A1 of the USSR, IPC G01M 1/12. Device for determining the mass and coordinates of the center of mass of the product : No. 3921478 : application 07/03/1985 : published 10/23/1986 / V. I. Feofilaktov ; applicant COMPANY P/I V-8597. (rus.)
[35] Patent No. 2830397 C1 Russian Federation, IPC G01M 1/10. A stand for measuring the mass, coordinates of the center of mass and moments of inertia of products : No. 2024117666 : application 26.06.2024 : published 18.11.2024 / M. M. Bogatyrev, S. V. Dytskov, V. V. Lyutov [and others] ; applicant Federal Autonomous Institution Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky. (rus.)
[36] GOST 8054-81 IPK Publishing House of Standards. Propellers are metal propellers. General technical specifications, 1981-10 c. (rus.)
[37] Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the classification and construction of naval vessels. Part 7, St. Petersburg, 2025. – 109 p. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 531.53
doi:10.18720/SPBPU/2/id-111

А.С. Смирнов[1], Б.А. Смольников[2]

ДИССИПАТИВНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ О ГЛОБАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЯХ СФЕРИЧЕСКОГО МАЯТНИКА



[1]Алексей Сергеевич Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7778, E-mail: smirnov.alexey.1994@gmail.com



[2]Борис Александрович Смольников
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7778, E-mail: smolnikovba@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются глобальные модели движения сферического маятника при наличии внешнего или внутреннего трения. Выводятся уравнения движения системы для углов нутации и прецессии, при этом в обоих случаях далее удается исключить из рассмотрения угол прецессии и получить единственное уравнение для угла нутации, которое приводится к удобному безразмерному виду. При помощи численного интегрирования для каждого варианта диссипации определяется зависимость угла нутации от безразмерного времени, которая отображается в графической форме. Для большей наглядности на графиках также строятся огибающие линии, которые находятся из известного ранее приближенного аналитического решения, и они очень хорошо согласуются с результатами численного исследования. Сделанные выводы представляют интерес для динамики диссипативных маятниковых систем и могут быть полезными на практике.

Ключевые слова: сферический маятник, угол нутации, угол прецессии, внешнее трение, внутреннее трение, глобальная модель.

Введение

Вопросам динамического поведения сферического маятника (далее – СМ) в различных условиях его движения посвящено достаточно большое количество публикаций, растущее с каждым годом, поскольку СМ является наиболее известной нелинейной маятниковой системой с двумя степенями свободы. История задачи о СМ насчитывает более трех столетий, и с ней связаны имена известных ученых прошлого – Р. Гука [1], А. Клеро [2], В. Пюизе [3], Ф. Тиссерана [4], А. Резаля [5], М. де Спарра [6], Н. Тиссо [7], Ж. Альфена [8], А. де Сен-Жермена [9], А. Гринхилла [10], А. Н. Крылова [11] и многих других. Среди современных научных работ по механике СМ, относящихся к последним десятилетиям, можно отметить работы [12-23] на русском языке, часть из которых имеет переводные версии; работы [24-30] на английском языке; а также книгу авторов настоящей статьи [31]. Следует подчеркнуть, что изучение динамики СМ имеет не только фундаментальное теоретическое значение, но также позволяет описать поведение более сложных систем, встречающихся в различных приложениях. В самом деле, СМ является структурным элементом многих технических устройств, например, грузоподъемных устройств типа мостовых и башенных кранов, разнообразных тренажеров и спортивно-развлекательных комплексов, тросовых систем и прочих конструкций [22].

Немалый теоретический и практический интерес представляет учет диссипативных сил при движении СМ и изучение влияния этих сил на его траекторию [32]. При этом обычно учитывается вязкое или квадратичное сопротивление со стороны окружающей среды [33-36], а также вязкое или сухое трение в кардановом подвесе при соответствующей реализации СМ [31]. Однако серьезное внимание привлекает и задача о движении СМ под действием внутреннего трения в стержневом элементе, обусловленного его переменными деформациями [36]. При этом следует иметь в виду, что в рамках традиционной расчетной схемы СМ стержень является абсолютно твердым, т. е. он не обладает упругими свойствами, а потому он лишен возможности рассеивать энергию. Тем не менее, в отсутствие прочих сил трения внутреннее трение оказывается единственным диссипативным фактором, который необходимо принимать во внимание. В этой связи построение и изучение достаточно простой и в то же время адекватной модели внутреннего трения при движении СМ также представляется весьма актуальной задачей, заслуживающей отдельного рассмотрения.

Учитывая вышесказанное, естественно принять в качестве основной цели настоящей работы подробное обсуждение моделей внешнего и внутреннего трения при движении СМ в глобальной постановке, т. е. при произвольных начальных условиях движения.

Глобальные уравнения движения сферического маятника с учетом диссипативных сил

Обратимся к традиционной расчетной схеме СМ с абсолютно жестким стержнем, который подвешен в поле силы тяжести. Будем полагать, что масса концевого груза СМ есть m, а длина СМ равна l_0 (рис. 1).

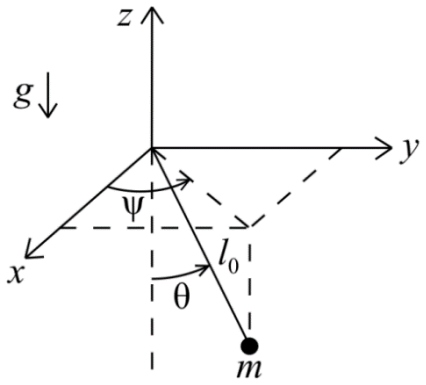


Рис. 1. Расчетная схема сферического маятника

Принимая в качестве обобщенных координат угол нутации θ и угол прецессии ψ, запишем кинетическую и потенциальную энергии системы:

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}ml_0^2\left(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2\sin^2\theta\right), \quad \Pi = mgz = -mgl_0\cos\theta, \tag{1}$$

где v – скорость концевого груза СМ, а z – его аппликата.

Сначала рассмотрим модель движения СМ при наличии внешнего вязкого трения со стороны окружающей среды. Тогда диссипативная функция может быть представлена в традиционном виде:

$$R = \frac{1}{2}Bv^2 = \frac{1}{2}Bl_0^2\left(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2\sin^2\theta\right) = \frac{B}{m}T, \tag{2}$$

где B – диссипативный коэффициент. Подставляя (1) и (2) в уравнения Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial\dot{\theta}} - \frac{\partial T}{\partial\theta} = -\frac{\partial\Pi}{\partial\theta} - \frac{\partial R}{\partial\dot{\theta}}, \quad \frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial\dot{\psi}} - \frac{\partial T}{\partial\psi} = -\frac{\partial\Pi}{\partial\psi} - \frac{\partial R}{\partial\dot{\psi}}, \tag{3}$$

получим из первого уравнения

$$ml_0^2\ddot{\theta} + Bl_0^2\dot{\theta} - ml_0^2\sin\theta\cos\theta\dot{\psi}^2 + mgl_0\sin\theta = 0, \tag{4}$$

тогда как второе уравнение может быть приведено к виду:

$$\dot{p} = -\frac{B}{m}p, \tag{5}$$

где сделано обозначение: $p = \partial T / \partial\dot{\psi}$. Интегрируя уравнение (5), находим:

$$p = p_0 e^{-\frac{B}{m}t}, \tag{6}$$

где p_0 – начальное значение величины p. Принимая во внимание, что $p = ml_0^2\sin^2\theta\dot{\psi}$, находим из (6) следующее выражение для $\dot{\psi}$:

$$\dot{\psi} = \frac{p_0 e^{-\frac{B}{m}t}}{ml_0^2 \sin^2\theta}. \qquad (7)$$

Если подставить это выражение в (4), то получим единственное уравнение, которое будет определять поведение угла нутации с течением времени:

$$ml_0^2\ddot{\theta} + Bl_0^2\dot{\theta} - \frac{p_0^2 \cos\theta}{ml_0^2 \sin^3\theta} e^{-\frac{2B}{m}t} + mgl_0 \sin\theta = 0. \qquad (8)$$

Для того чтобы привести это уравнение к виду, удобному для численного интегрирования, введем в рассмотрение следующие величины:

$$k = \sqrt{\frac{g}{l_0}}, \quad \tau = kt, \quad \delta = \frac{p_0}{ml_0^2 k}, \quad \nu = \frac{B}{mk}. \qquad (9)$$

Поясним их физический смысл: k – частота малых колебаний обычного маятника длиной l_0, τ – безразмерное время, δ – обезразмеренная величина p_0, а ν – безразмерный диссипативный параметр. Обозначая далее штрихом производную по безразмерному времени τ, т. е. полагая $(\ )' = d/d\tau$, приведем уравнение (8) к окончательному виду:

$$\theta'' + \nu\theta' + \sin\theta - \frac{\delta^2 \cos\theta}{\sin^3\theta} e^{-2\nu\tau} = 0. \qquad (10)$$

Остается отметить, что при наличии внешнего трения будет происходить полное затухание движений СМ с течением времени.

Перейдем теперь к учету внутреннего трения в стержне СМ. Ясно, что наиболее идейно простой способ описания движения СМ под действием внутреннего трения в стержне заключается в том, чтобы снабдить его дополнительной степенью свободы, отвечающей за растяжимость стержня, и наделить его упругими свойствами, в результате чего мы придем к классической модели внутренней диссипации. Однако такой путь заметно усложняет математическую модель и ее последующий анализ. Помимо этой модели существует также и другая модель внутреннего трения, которую можно назвать эволюционной, поскольку она не требует введения новой степени свободы, но в то же время позволяет описать эволюционное поведение СМ при наличии диссипативных эффектов в стержне [31, 36]. Естественно, что изучение такой модели внутренней диссипации при движении СМ имеет большое значение для механики маятниковых конструкций и динамики диссипативных систем.

Приступая к ее построению, сформируем диссипативную функцию внутреннего трения в стержне, считая, что оно имеет вязкий характер. Ясно, что если бы длина стержня l выступала бы в качестве обобщенной координаты, то эту диссипативную функцию можно было бы представить в виде квадратичной функции микроскорости перемещения груза вдоль стержня, а именно:

$$S = \frac{1}{2} b \dot{l}^2, \tag{11}$$

где b – исходный диссипативный коэффициент. Однако в рамках эволюционной модели длина стержня l не является третьей обобщенной координатой, поэтому она исключается из рассмотрения при помощи следующего подхода [31]. Нетрудно понять, что усилие в стержне N, вызываемое центробежными и гравитационными силами, вызывает малые переменные удлинения и укорочения стержня СМ, а, стало быть, и микродвижения груза СМ вдоль стержня. При этом можно предположить, что эти микродвижения фактически не будут вносить никакого ощутимого вклада в выражения для кинетической и потенциальной энергий, вследствие чего они и принимаются такими же, как и для СМ постоянной длины. Однако эти микродвижения будут непрерывно рассеивать энергию макроскопических движений СМ. Это обстоятельство позволяет перейти от длины стержня l к усилию N, имея в виду, что согласно закону Гука $N = c(l - l_0)$, где c – жесткость стержня, а величина l_0 трактуется как длина стержня СМ в недеформированном состоянии. Тогда $\dot{N} = c\dot{l}$, а потому диссипативная функция (11) может быть переписана в виде:

$$S = \frac{1}{2} \beta \dot{N}^2, \quad \beta = \frac{b}{c^2}, \tag{12}$$

где β – приведенный диссипативный коэффициент. Таким образом, с этого момента степень свободы, отвечающая длине стержня l, становится скрытой и исключается из анализа, и в рассмотрении остаются только две исходные степени свободы. Далее все сводится к вычислению усилия N в стержне СМ, причем длина стержня считается величиной постоянной и равной l_0. Как известно, выражение для усилия имеет вид [31]:

$$N = m\left[l_0 \left(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \sin^2 \theta \right) + g \cos \theta \right]. \tag{13}$$

После этого необходимо вычислить величину $\dot{N}$, причем для упрощения дальнейших выкладок мы будем заменять значения возникающих при этом обобщенных ускорений $\ddot{\theta}$ и $\ddot{\psi}$ их значениями на невозмущенном, т. е. на консервативном движении СМ. В рамках глобальной консервативной модели уравнения движения СМ имеют известный вид [31]:

$$\ddot{\theta} - \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta + \frac{g}{l_0} \sin \theta = 0, \quad \ddot{\psi} + 2 \operatorname{ctg} \theta \dot{\psi} \dot{\theta} = 0. \tag{14}$$

Тогда искомое выражение для $\dot{N}$ примет достаточно простую структуру:

$$\dot{N} = -3mg \sin \theta \dot{\theta}, \tag{15}$$

а диссипативная функция (12) приведется к следующей форме:

$$S = \frac{1}{2} b_0 \sin^2 \theta \dot{\theta}^2, \quad b_0 = 9\beta m^2 g^2, \tag{16}$$

где b_0 – новый диссипативный коэффициент. Заменяя в уравнениях (3) диссипативную функцию R на S и подставляя в них выражения (1) и (16), получим из первого уравнения

$$ml_0^2\ddot{\theta} + b_0 \sin^2\theta\dot{\theta} - ml_0^2 \sin\theta\cos\theta\dot{\psi}^2 + mgl_0 \sin\theta = 0, \qquad (17)$$

а из второго уравнения будем иметь $\dot{p} = 0$, где, напомним, $p = \partial T / \partial\dot{\psi}$. В самом деле, координата ψ здесь является циклической, т. к. кинетическая и потенциальная энергии и отвечающая ей обобщенная диссипативная сила равны нулю. Поэтому имеет место циклический интеграл

$$p = \frac{\partial T}{\partial\dot{\psi}} = ml_0^2 \sin^2\theta\dot{\psi} = p_0 = \text{const}. \qquad (18)$$

Выражая отсюда циклическую скорость $\dot{\psi}$

$$\dot{\psi} = \frac{p_0}{ml_0^2 \sin^2\theta} \qquad (19)$$

и подставляя ее в (17), получим единственное уравнение для угла нутации:

$$ml_0^2\ddot{\theta} + b_0 \sin^2\theta\dot{\theta} - \frac{p_0^2 \cos\theta}{ml_0^2 \sin^3\theta} + mgl_0 \sin\theta = 0. \qquad (20)$$

Для приведения его к безразмерному виду будем использовать первые три величины из (9), а также введем безразмерный диссипативный параметр для случая внутреннего трения по формуле $\mu = b_0 / (ml_0^2 k)$. Тогда уравнение (20) приведется к окончательной форме:

$$\theta'' + \mu \sin^2\theta\theta' + \sin\theta - \frac{\delta^2 \cos\theta}{\sin^3\theta} = 0. \qquad (21)$$

Нетрудно понять, что конечным режимом движения СМ с внутренним трением будет коническое движение. В самом деле, диссипация согласно (16) прекращается именно при $\theta = \theta_* = \text{const}$, а из (19) в этой ситуации вытекает, что $\dot{\psi} = \dot{\psi}_* = \text{const}$. При этом величина θ_* при заданном значении величины δ определяется из уравнения, которое вытекает из (21):

$$\sin^4\theta_* = \delta^2 \cos\theta_*, \qquad (22)$$

и, конечно, угол θ_* в коническом режиме движения является острым. Остается подчеркнуть, что этот режим движения является устойчивым относительно θ, $\dot{\theta}$ и $\dot{\psi}$ [31].

Приближенное аналитическое решение

Прежде чем осуществлять численное интегрирование уравнений (10) и (21), представим найденное в работе [36] приближенное аналитическое решение для моделей внешнего и внутреннего трения, приспособив его для нужд настоящего исследования. При получении указанного решения в

качестве обобщенных координат задачи в [36] принимались декартовы координаты x и y груза СМ, которые трактовались как малые величины при не очень больших отклонениях от нижнего положения равновесия вместе с соответствующими скоростями. Кроме того, в данной работе также вводилась комплексная переменная $w = x + iy$, для которой была найдена приближенная зависимость от времени при помощи метода усреднения. Из рис. 1 нетрудно понять, что

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{l_0} = \frac{\sqrt{w\bar{w}}}{l_0}, \tag{23}$$

где $\bar{w}$ – комплексно-сопряженная величина по отношению к $\bar{w}$. Поскольку приближенное решение из [36] имеет вид $w = Ae^{ikt} + Be^{-ikt}$, где $A = A(t)$ и $B = B(t)$ – медленно меняющиеся комплекснозначные функции времени, то огибающими колебательной зависимости

$$w\bar{w} = |A|^2 + |B|^2 + 2|A||B|\cos(2kt + \arg A - \arg B) \tag{24}$$

будут, очевидно, функции $\left(|A| + |B|\right)^2$ и $\left(|A| - |B|\right)^2$, касающиеся (24) при $\cos(2kt + \arg A - \arg B) = \pm 1$. Поскольку выражений для этих огибающих будет вполне достаточно, чтобы установить из (23) поведение угла нутации с течением времени и тем самым оценить результаты численного исследования для моделей внешнего и внутреннего трения, то остается обратиться к выражениям для $|A|$ и $|B|$ из работы [36] и записать их в терминах настоящей статьи с учетом использованных обозначений, представив их также в безразмерной форме путем деления на l_0.

Так, для случая внешнего трения имеем:

$$f_1(\tau) = \frac{|A|}{l_0} = \frac{|A_0|}{l_0} e^{-\frac{\nu\tau}{2}}, \quad f_2(\tau) = \frac{|B|}{l_0} = \frac{|B_0|}{l_0} e^{-\frac{\nu\tau}{2}}, \tag{25}$$

тогда как для случая внутреннего трения эти зависимости будут:

$$f_1(\tau) = \frac{|A|}{l_0} = \sqrt{\frac{\delta e^{\mu\delta\tau}}{e^{\mu\delta\tau} - 1 + \dfrac{\delta}{|A_0|^2 / l_0^2}}}, \quad f_2(\tau) = \frac{|B|}{l_0} = \sqrt{\frac{\delta e^{-\mu\delta\tau}}{1 - e^{-\mu\delta\tau} + \dfrac{\delta}{|B_0|^2 / l_0^2}}}, \tag{26}$$

где A_0 и B_0 – начальные значения величин A и B, τ – безразмерное время, δ – обезразмеренная величина p_0, а ν и μ – безразмерные диссипативные параметры для внешнего и внутреннего трения соответственно.

Чтобы записать выражения для $|A_0| / l_0$ и $|B_0| / l_0$, фигурирующие в (25) и (26), используем следующие начальные условия движения при $t = 0$: $\theta = \theta_0 > 0$, $\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 = 0$, $\psi = \psi_0 = 0$, $\dot{\psi} = \dot{\psi}_0 > 0$. Учитывая, что в уравнениях

(10) и (21) для угла нутации используются безразмерные величины, то следует записать начальные условия, необходимые для их решения, в виде: $\theta = \theta_0 > 0$, $\theta' = \theta'_0 = 0$, а для p_0 будем иметь выражение: $p_0 = ml_0^2 \sin^2\theta_0 \dot{\psi}_0$, через которое можно определить и величину δ согласно третьей формуле (9). При этом для декартовых координат x и y заданные выше начальные условия движения могут быть представлены в виде: $x_0 = l_0 \sin\theta_0$, $y_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$ и $\dot{y}_0 = l_0 \sin\theta_0 \dot{\psi}_0$, т. е. они достигаются путем отклонения СМ в направлении оси x и задания начальной скорости в направлении оси y. Учитывая, что $\dot{\psi}_0 = k\delta / \sin^2\theta_0$, то последнее из этих начальных условий приводится к виду $\dot{y}_0 = k\delta l_0 / \sin\theta_0$. Вновь используя формулы из работы [36], будем иметь:

$$\frac{|A_0|}{l_0} = \frac{1}{2}\left|\frac{x_0}{l_0} + \frac{\dot{y}_0}{kl_0}\right| = \frac{1}{2}\left|\sin\theta_0 + \frac{\delta}{\sin\theta_0}\right|, \quad \frac{|B_0|}{l_0} = \frac{1}{2}\left|\frac{x_0}{l_0} - \frac{\dot{y}_0}{kl_0}\right| = \frac{1}{2}\left|\sin\theta_0 - \frac{\delta}{\sin\theta_0}\right|. \quad (27)$$

Таким образом, для применения формул (27) следует знать только значения θ_0 и δ, которые и целесообразно задавать. Тогда огибающие $\theta_1(\tau)$ и $\theta_2(\tau)$ зависимости $\theta(\tau)$ отвечают выражениям:

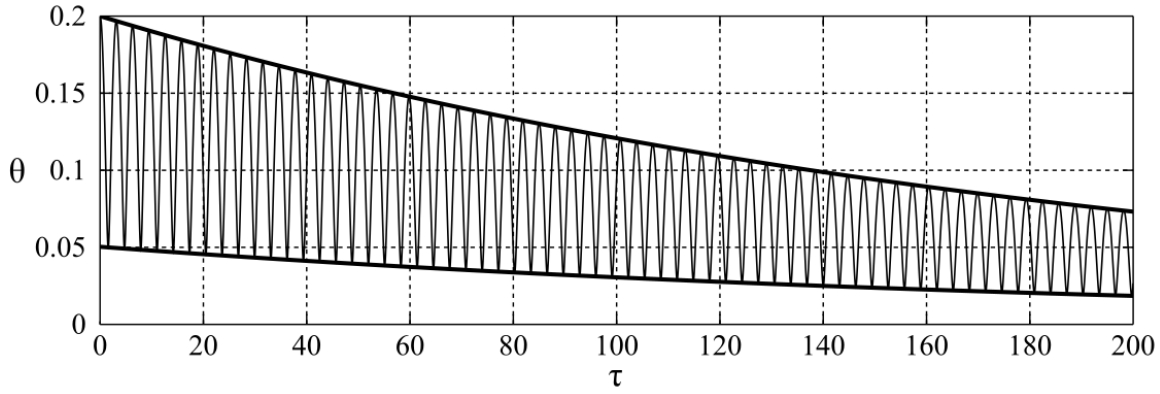
$$\sin\theta_1(\tau) = f_1(\tau) + f_2(\tau), \quad \sin\theta_2(\tau) = \left| f_1(\tau) - f_2(\tau)\right|, \quad (28)$$

и они смогут оценить результаты численного интегрирования при не очень больших отклонениях СМ от нижнего положения равновесия.

Графическая иллюстрация

Перейдем теперь к численному интегрированию уравнений (10) и (21). Для этого положим $\theta_0 = 0.2$, $\delta = 0.01$, $\nu = 0.01$, $\mu = 0.2$. Зависимости угла нутации θ от безразмерного времени τ для случаев внешнего и внутреннего трения, найденные посредством численного анализа, даны на рис. 2 и рис. 3 соответственно, где полужирными линиями приведены огибающие указанных зависимостей из приближенного аналитического решения согласно (28). Нетрудно видеть, что это приближенное решение в обоих случаях корректно отражает характер изменения угла нутации с течением безразмерного времени при принятых достаточно небольших начальных условиях движения, как того и следовало ожидать. При этом, как уже говорилось выше, в случае внешнего трения происходит полное затухание движений СМ, а в случае внутреннего трения движение СМ выходит на конический режим. Отметим, что затухание под действием внутреннего трения в реальности происходит весьма медленно, и для того чтобы по графику зависимости $\theta(\tau)$ можно было наблюдать постепенное уменьшение диапазона, в котором изменяется угол нутации, на интервале

времени, сопоставимом с несколькими десятками периодов колебаний,



значение диссипативного параметра μ было выбрано не столь малым.

Рис. 2. Зависимость $\theta(\tau)$ для случая внешнего трения

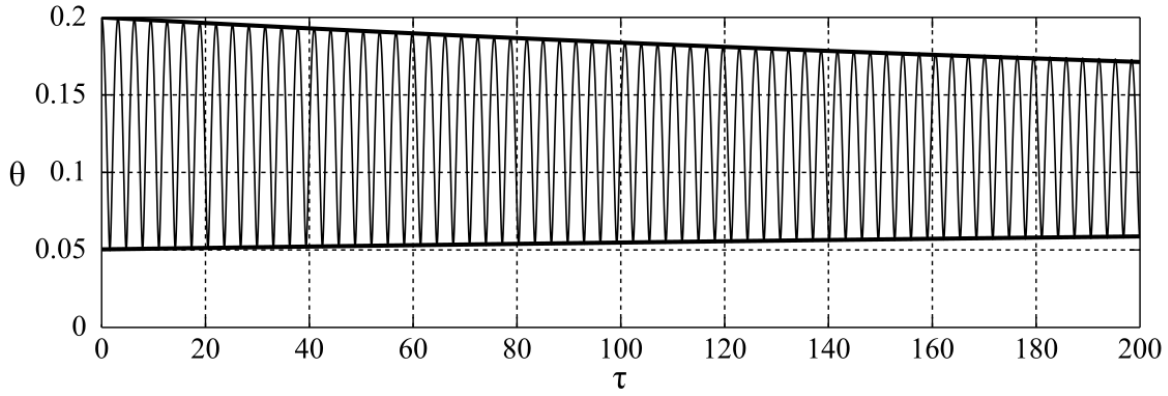


Рис. 3. Зависимость $\theta(\tau)$ для случая внутреннего трения

Заключение

В настоящей работе был рассмотрен вопрос о построении и анализе глобальной модели движения СМ при наличии сначала внешнего, а затем и внутреннего трения. В процессе анализа данных моделей были получены уравнения для угла нутации, приведенные к удобному безразмерному виду, к которым было применено численное интегрирование. В результате для каждого из этих вариантов были определены зависимости угла нутации от безразмерного времени, представленные в графической форме. Кроме того, было дано сопоставление этих колебательных зависимостей с их огибающими, которые отвечают найденному ранее приближенному аналитическому решению, вследствие чего было обнаружено весьма хорошее соответствие численных и аналитических результатов друг другу. Приведенные в работе результаты представляют теоретический интерес, а изученная в ней эволюционная модель внутреннего трения при движении

СМ, которая не учитывает дополнительную степень свободы и трактует ее как скрытую, может быть рекомендована в силу простоты и адекватности для использования и в других задачах прикладной теории колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Боголюбов А.Н. Роберт Гук (1635–1703). М.: Наука, 1984. 240 с.

[2] Clairaut, A.C. Examen des différentes oscillations qu'un corps suspendu par un fil peut faire lorsqu'on lui donne une impulsion quelconque. Mémoires de l'Académie royale des sciences Paris, 1735 (1738), pp. 281–298.

[3] Puiseux, V.A. Sur le mouvement d'un point matériel pesant sur une sphère. Journal de Mathématiques pures et appliquées, 1842, s. 1, vol. 7, pp. 517–520.

[4] Tisserand, F.F. Sur le mouvement du pendule conique. Bulletin des Sciences Mathématiques et Astronomiques, 1881, s. 2, vol. 5, no 1, pp. 448–454.

[5] Resal, H.A. Traité de mécanique générale: comprenant les leçons professées a l'École Polytechnique. V. 1. Cinématique. Théorèmes généraux de la Mécanique. De l'équilibre et du mouvement des corps solides. Paris: Gauthier-Villars, 1873. 449 p.

[6] Sparre de, M.L.M. Sur le mouvement du pendule conique dans le cas des petites oscillations. Annales des Société scientifique de Bruxelles, 1902, vol. XXVI, p. 2.

[7] Tissot, N.A. Thesis de Mécanique. Journal de Mathématiques, 1852, vol. 17, pp. 88–116.

[8] Halphen, G.H. Traité des fonctions elliptiques. Vol. 2. Paris: 1888. 659 p.

[9] Saint-Germain de, A.L. Théorie du pendule sphérique. Mémoires de l'Académie nationale des sciences, arts et belleslettres de Caen, 1901, pp. 3–11.

[10] Greenhill, A.G. The applications of elliptic functions. London: MacMillan and co, 1892. 380 p.

[11] Крылов А.Н. Собрание трудов. В 12 т. Т. 8. М., Л.: изд-во АН СССР, 1950. 498 с.

[12] Глухих Ю.Д. Колебания сферического маятника с вибрирующей точкой подвеса. Механика твердого тела: межведомственный сборник научных трудов. 2005. Вып. 35. С. 109–114.

[13] Петров А.Г. Об уравнениях движения сферического маятника с колеблющейся точкой подвеса. Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 1. С. 51–55.

[14] Буланчук П.О., Петров А.Г. Об управлении движением сферического маятника с помощью вибрации точки подвеса. Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. № 5. С. 627–630.
[15] Маркеев А.П. О невырожденности функции Гамильтона сферического маятника. Доклады Академии наук. 2010. Т. 430. № 2. С. 189–194.
[16] Неспирный В.Н., Королев В.А. Стационарные режимы сферического маятника с подвижной точкой подвеса. Механика твердого тела. 2011. Вып. 41. С. 225–232.
[17] Стадник А.Н., Периг А.В., Дериглазов А.И. Применение относительных декартовых координат для сложного движения сферического маятника. Вестник Севастопольского национального технического университета. Механика, энергетика, экология. 2013. № 137. С. 24–31.
[18] Довбыш С.А. Расщепление сепаратрис, ветвление решений и неинтегрируемость многомерных систем. Приложения к задаче о движении сферического маятника с колеблющейся точкой подвеса. Фундаментальная и прикладная математика. 2014. Т. 19. Вып. 3. С. 23–90.
[19] Мамонов Д.В. Задача о сферическом маятнике. Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики». 17–19 ноября 2014 г., Томск. 2015. С. 72–75.
[20] Заика В.В., Масленников А.Л. Математическое моделирование однозвенного сферического маятника в сферической системе координат. Политехнический молодежный журнал. 2019. № 9 (38). С. 1–12.
[21] Кочетков А.В., Федотов П.В. Новые методические подходы решения сферического маятника в элементарных функциях. Введение в топологическую механику. Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11. № 2. С. 1–26.
[22] Смольников Б.А., Смирнов А.С. О соответствии слабо-нелинейной и глобальной моделей сферического маятника. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник тезисов докладов в 4 томах. Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 г. Т. 1. Общая и прикладная механика. 2023. С. 343–346.
[23] Полехин И.Ю. О доказательстве существования вынужденных колебаний с помощью добавления диссипативных сил на примере сферического маятника. Теоретическая и математическая физика. 2022. Т. 211. № 2. С. 295–305.
[24] Worland, R.S., Moelter, M.J. Two-dimensional pendulum experiments using a spark generator. The Physics Teacher, 2000, 38 (8), pp. 489–492.

[25] Leung, A.Y.T., Kuang, J.L. On the chaotic dynamics of a spherical pendulum with a harmonically vibrating suspension. Nonlinear Dynamics, 2006, 43 (3), pp. 213–238.
[26] Liu, G., Nesic, D., Mareels, I. Non-local stabilization of a spherical inverted pendulum. International Journal of Control, 2008, 81 (7), pp. 1035–1053.
[27] Myung-Gon, Y. Dynamics and stabilization of a spherical inverted pendulum on a wheeled cart. International Journal of Control. Automation and Systems, 2010, 8 (6), pp. 1271–1279.
[28] Dullin, H.R. Semi-global symplectic invariants of the spherical pendulum. Differential Equations, 2013, 254 (7), pp. 2942–2963.
[29] Litak, G., Margielewicz, J., Gąska, D., Yurchenko, D., Dąbek, K. Dynamic response of the spherical pendulum subjected to horizontal Lissajous excitation. Nonlinear Dynamics, 2020, 102, pp. 2125–2142.
[30] Trentin, J.F.S., Santos, D.A., da Silva, S., Schaub, H. Dynamic modeling and control of a spherical pendulum with a VSCMG. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44, 335.
[31] Смирнов А.С., Смольников Б.А. Механика сферического маятника. СПб.: Политех-пресс, 2019. 266 с.
[32] Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. 560 с.
[33] Ламб Г. Теоретическая механика. Т. 2. Динамика. М., Л.: ОНТИ ГТТИ, 1935. 312 с.
[34] Шаин Ю.Ф. Исследование системы уравнений, описывающих движения сферического маятника в случае наличия сопротивления // Дифференциальные уравнения. 1967. Т. 3. № 9. С. 1477–1483.
[35] Лагранж Ж. Аналитическая механика. Т. 2. М.: ГИТТЛ, 1950. 440 с.
[36] Смирнов А.С., Смольников Б.А. Движение сферического маятника со слабой нелинейностью при наличии внешнего или внутреннего трения. Современное машиностроение: Наука и образование 2024. Материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года. 2024. С. 129–148.

A.S. Smirnov[1,2], B.A. Smolnikov[1,2]

DISSIPATIVE MODELS IN THE PROBLEM OF GLOBAL MOTIONS OF A SPHERICAL PENDULUM

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract

The article considers global models of motion of a spherical pendulum in the presence of external or internal friction. Equations of the system motion for the angles of nutation and precession are derived, and in both cases it is possible to exclude the precession angle from consideration and obtain a single equation for the nutation angle, which is reduced to a convenient dimensionless form. Using numerical integration for each dissipation variant, the dependence of the nutation angle on dimensionless time is determined, which is displayed in graphical form. For greater clarity, envelope lines are also plotted on the graphs, which are found from a previously known approximate analytical solution, and they are in very good agreement with the results of the numerical study. The conclusions made are of interest for the dynamics of dissipative pendulum systems, and they can be useful in practice.

Key words: spherical pendulum, nutation angle, precession angle, external friction, internal friction, global model.

REFERENCES

[1] Bogolyubov, A.N. Robert Hooke (1635–1703). Moscow: Nauka, 1984. 240 p. (rus.)
[2] Clairaut, A.C. Examen des différentes oscillations qu'un corps suspendu par un fil peut faire lorsqu'on lui donne une impulsion quelconque. Mémoires de l'Académie royale des sciences Paris, 1735 (1738), pp. 281–298.
[3] Puiseux, V.A. Sur le mouvement d'un point matériel pesant sur une sphère. Journal de Mathématiques pures et appliquées, 1842, s. 1, vol. 7, pp. 517–520.
[4] Tisserand, F.F. Sur le mouvement du pendule conique. Bulletin des Sciences Mathématiques et Astronomiques, 1881, s. 2, vol. 5, no 1, pp. 448–454.
[5] Resal, H.A. Traité de mécanique générale: comprenant les leçons professées a l'École Polytechnique. V. 1. Cinématique. Théorèmes généraux de la Mécanique. De l'équilibre et du mouvement des corps solides. Paris: Gauthier-Villars, 1873. 449 p.
[6] Sparre de, M.L.M. Sur le mouvement du pendule conique dans le cas des petites oscillations. Annales des Société scientifique de Bruxelles, 1902, vol. XXVI, p. 2.
[7] Tissot, N.A. Thesis de Mécanique. Journal de Mathématiques, 1852, vol. 17, pp. 88–116.
[8] Halphen, G.H. Traité des fonctions elliptiques. Vol. 2. Paris: 1888. 659 p.

[9] Saint-Germain de, A.L. Théorie du pendule sphérique. Mémoires de l'Académie nationale des sciences, arts et belleslettres de Caen, 1901, pp. 3–11.
[10] Greenhill, A.G. The applications of elliptic functions. London: MacMillan and co, 1892. 380 p.
[11] Krylov, A.N. Collection of works. In 12 volumes. Vol. 8. Moscow, Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1950. 498 p. (rus.)
[12] Glukhikh, Yu.D. Oscillations of a spherical pendulum with a vibrating suspension point. Mechanics of Solids: interdepartmental collection of scientific papers, 2005, iss. 35, pp. 109–114. (rus.)
[13] Petrov, A.G. On the equations of motion of a spherical pendulum with a fluctuating support. Doklady Physics, 2005, 50 (11), pp. 588–592.
[14] Bulanchuk, P.O., Petrov, A.G. Controlling spherical-pendulum motion with the help of suspension-point vibration. Doklady Physics, 2010, 55 (2), pp. 85–88.
[15] Markeev, A.P. In nondegeneracy of the Hamiltonian function for a spherical pendulum. Doklady Physics, 2010, 55 (1), pp. 33–38.
[16] Nespirnyy, V.N., Korolyov, V.A. Stationary modes of spherical pendulum with movable suspension point. Mechanics of Solids, 2011, 41, pp. 225–232. (rus.)
[17] Stadnik, A.N., Perig, A.V., Deriglazov, A.I. Introduction of Relative Cartesian Coordinates for the Compound Motion of Spherical Pendulum. Bulletin of Sevastopol National Technical University. Mechanics, Energy, Ecology, 2013, 137, pp. 24–31. (rus.)
[18] Dovbysh, S.A. The Splitting of Separatrices, the Branching of Solutions, and Nonintegrability of Many-Dimensional Systems. Application to the Problem of the Motion of a Spherical Pendulum with an Oscillating Suspension Point. Journal of Mathematical Sciences, 2016, 214 (6), pp. 755–801.
[19] Mamonov, D.V. Problem about a spherical pendulum. International youth scientific conference "Topical problems of modern continuum mechanics and celestial mechanics". November 17–19, 2014, Tomsk. 2015, pp. 72–75. (rus.)
[20] Zaika, V.V., Maslennikov, A.L. Single-joint spherical pendulum mathematical modeling in spherical coordinate system. Politechnical Student Journal, 2019, 9 (38), pp. 1–12. (rus.)
[21] Kochetkov, A.V., Fedotov, P.V. New methodical approaches of the solution of the spherical pendulum in elementary functions. Introduction to topological mechanics. The Eurasian Scientific Journal, 2019, 2 (11), pp. 1–26. (rus.)
[22] Smolnikov, B.A., Smirnov, A.S. On the correspondence between weakly nonlinear and global models of a spherical pendulum. XIII All-Russian

Congress on Theoretical and Applied Mechanics. Collection of report abstracts in 4 volumes. St. Petersburg, August 21–25, 2023. Vol. 1. General and applied mechanics. 2023, pp. 343–346. (rus.)
[23] Polekhin, I.Y. The existence proof for forced oscillations by adding dissipative forces in the example of a spherical pendulum. Theoretical and Mathematical Physics, 2022, 211 (2), pp. 692–700.
[24] Worland, R.S., Moelter, M.J. Two-dimensional pendulum experiments using a spark generator. The Physics Teacher, 2000, 38 (8), pp. 489–492.
[25] Leung, A.Y.T., Kuang, J.L. On the chaotic dynamics of a spherical pendulum with a harmonically vibrating suspension. Nonlinear Dynamics, 2006, 43 (3), pp. 213–238.
[26] Liu, G., Nesic, D., Mareels, I. Non-local stabilization of a spherical inverted pendulum. International Journal of Control, 2008, 81 (7), pp. 1035–1053.
[27] Myung-Gon, Y. Dynamics and stabilization of a spherical inverted pendulum on a wheeled cart. International Journal of Control. Automation and Systems, 2010, 8 (6), pp. 1271–1279.
[28] Dullin, H.R. Semi-global symplectic invariants of the spherical pendulum. Differential Equations, 2013, 254 (7), pp. 2942–2963.
[29] Litak, G., Margielewicz, J., Gąska, D., Yurchenko, D., Dąbek, K. Dynamic response of the spherical pendulum subjected to horizontal Lissajous excitation. Nonlinear Dynamics, 2020, 102, pp. 2125–2142.
[30] Trentin, J.F.S., Santos, D.A., da Silva, S., Schaub, H. Dynamic modeling and control of a spherical pendulum with a VSCMG. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44, 335.
[31] Smirnov, A.S., Smolnikov, B.A. Spherical pendulum mechanics. St. Petersburg: Polytech-press, 2019. 266 p. (rus.)
[32] Strelkov, S.P. Mechanics. Moscow: Nauka, 1975. 560 p. (rus.)
[33] Lamb H. Dynamics. Cambridge: The University press, 1914. 344 p.
[34] Shain, Yu.F. Study of the system of equations describing the motion of a spherical pendulum in the presence of resistance. Differential Equations, 1967, vol. 3, no. 9, pp. 1477–1483. (rus.)
[35] Lagrange J.-L. Mécanique Analytique. T. 2. Paris: Ve Courcier, 1815. 378 p.
[36] Smirnov A.S., Smolnikov B.A. Motion of a spherical pendulum with weak nonlinearity in the presence of external or internal friction. Modern mechanical engineering: Science and education 2024. Proceedings of the 13th International scientific conference, June 20, 2024. 2024, pp. 129–148. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 531.538
doi:10.18720/SPBPU/2/id-112

А.С. Смирнов[1], Д.А. Снетков[2]

КОЛЕБАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНОГО ДВОЙНОГО МАЯТНИКА СО СЛАБОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ



[1]Алексей Сергеевич Смирнов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7778, E-mail: smirnov.alexey.1994@gmail.com



[2]Даниил Алексеевич Снетков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7778, E-mail: snetkov-d.a@mail.ru

Аннотация

В работе изучаются колебания двойного математического маятника с идентичными параметрами звеньев и концевых грузов, шарнирные оси которого образуют прямой угол. Даются точные нелинейные уравнения движения, и из них получаются как линейная модель малых колебаний, в которой уравнения не связаны друг с другом, так и модель со слабой нелинейностью, в которой удерживаются нелинейные слагаемые третьего порядка малости. Для последней из этих моделей производится построение приближенного аналитического решения при помощи асимптотических методов, в процессе которого устанавливаются его основные особенности. Полученные результаты приводятся в графической форме и сравниваются с аналитическим решением для линейной модели и численным решением для исходной нелинейной модели. Эти результаты представляют интерес для динамики маятниковых конструкций и могут оказаться полезными при решении конкретных прикладных задач в области робототехники.

Ключевые слова: ортогональный двойной маятник, модель со слабой нелинейностью, асимптотические методы, численное интегрирование.

Введение

Двойной маятник и его многочисленные модификации представляют большой интерес как в теоретическом, так и в практическом отношении, и изучению их динамического поведения посвящено немало научных работ [1–11]. На этом пути особое внимание привлекают пространственные варианты двухзвенных конструкций, которые исследованы значительно меньше, чем их плоские варианты [12, 13]. Среди этих конструкций можно выделить двойные маятники, имеющие неколлинеарные цилиндрические шарниры, вследствие чего их звенья будут перемещаться в различных плоскостях [14, 15]. Такие системы могут найти применение в области робототехники при разработке, конструировании и анализе динамического поведения двухзвенных манипуляторов, что обуславливает актуальность их детального изучения. В качестве простейшей системы подобного рода можно указать ортогональный двойной маятник, шарнирные оси которого составляют между собой прямой угол [16]. Нелинейная динамика этого пространственного двойного маятника исследована еще не достаточным образом, а она представляет большое значение для одного из важнейших разделов аналитической механики – динамики маятниковых систем.

В силу сказанного выше, в настоящей работе рассматривается модель колебаний ортогонального двойного маятника со слабой нелинейностью и осуществляется построение решения уравнений движения в рамках этой модели с выявлением его основных особенностей и его сопоставлением с результатами анализа линейной модели и исходной нелинейной модели.

Уравнения движения ортогонального двойного маятника

Рассмотрим ортогональный двойной маятник, полагая, что он состоит из двух математических маятников с идентичными звеньями длиной l и одинаковыми концевыми грузами массой m, причем оси цилиндрических шарниров этих маятников полагаются перпендикулярными друг другу (рис. 1). В качестве обобщенных координат будем принимать углы поворота θ_1 и θ_2 в шарнирах ортогонального двойного маятника.

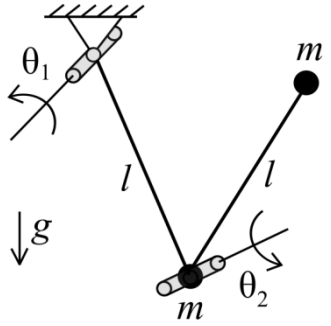


Рис. 1. Расчетная схема ортогонального двойного маятника

Точные выражения для кинетической и потенциальной энергий данной системы в рамках нелинейной модели могут быть заимствованы из работы [15], где рассматривался пространственный двойной маятник, шарниры которого не коллинеарны друг другу и образуют между собой угол α. Полагая $\alpha = \pi/2$, приходим к частному случаю ортогонального двойного маятника, и в этой ситуации кинетическая и потенциальная энергии приобретают вид:

$$T = \frac{1}{2} ml^2 \left[(2 + 2\cos\theta_2 + \cos^2\theta_2)\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 \right], \quad \Pi = mgl\left[3 - (2 + \cos\theta_2)\cos\theta_1\right]. \quad (1)$$

Точные уравнения движения ортогонального двойного маятника можно получить при помощи уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \theta_1}, \quad \frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \theta_2}, \quad (2)$$

откуда после подстановки выражений (1) и элементарных преобразований будем иметь следующую систему:

$$\begin{cases} (2 + 2\cos\theta_2 + \cos^2\theta_2)\ddot{\theta}_1 - 2(1 + \cos\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + k^2(2 + \cos\theta_2)\sin\theta_1 = 0, \\ \ddot{\theta}_2 + (1 + \cos\theta_2)\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 + k^2\sin\theta_2\cos\theta_1 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

причем здесь введено обозначение: $k = \sqrt{g/l}$ – частота малых колебаний обычного математического маятника длиной l.

Из системы уравнений (3) легко найти уравнения для наиболее простого случая малых колебаний ортогонального двойного маятника вблизи нижнего положения равновесия $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = 0$. Полагая углы θ_1 и θ_2 достаточно малыми, линеаризуем (3) и получим:

$$\begin{cases} 5\ddot{\theta}_1 + 3k^2\theta_1 = 0, \\ \ddot{\theta}_2 + k^2\theta_2 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

откуда вытекает, что углы θ_1 и θ_2 в рамках линейной модели изменяются независимо друг от друга, совершая гармонические колебания с частотами $k_{10} = \sqrt{3/5}k$ и $k_{20} = k$ соответственно:

$$\theta_1 = a_0\cos(k_{10}t + \alpha_0), \quad \theta_2 = b_0\cos(k_{20}t + \beta_0), \quad (5)$$

причем константы интегрирования a_0 и b_0 (амплитуды колебаний), а также α_0 и β_0 (начальные фазы колебаний) можно найти по начальным условиям движения $\theta_1 = \theta_{10}$, $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_{10}$, $\theta_2 = \theta_{20}$ и $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_{20}$ при $t = 0$.

Модель колебаний ортогонального двойного маятника со слабой нелинейностью

Обратимся теперь к получению уравнений движения ортогонального двойного маятника в рамках модели со слабой нелинейностью, которая

подразумевает учет кубической нелинейности. С этой целью вернемся к исходной нелинейной системе уравнений (3) и перепишем ее в виде:

$$\begin{cases} 5\ddot{\theta}_1 + 3k^2\theta_1 = u_1, \\ \ddot{\theta}_2 + k^2\theta_2 = u_2, \end{cases} \tag{6}$$

где в левой части располагаются те же самые слагаемые, что и в линейной системе (4), а в правой части стоят величины u_1 и u_2, равные

$$u_1 = (3 - 2\cos\theta_2 - \cos^2\theta_2)\ddot{\theta}_1 + 2(1+\cos\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + k^2\left[3\theta_1 - (2+\cos\theta_2)\sin\theta_1\right],$$

$$u_2 = -(1+\cos\theta_2)\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 + k^2(\theta_2 - \sin\theta_2\cos\theta_1). \tag{7}$$

Разложим далее входящие в (7) тригонометрические функции в ряды Маклорена (т. е. вблизи $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 0$) и удержим при этом только те слагаемые, которые будут содержать величины третьего порядка малости по обобщенным координатам θ_1 и θ_2, обобщенным скоростям $\dot{\theta}_1$ и $\dot{\theta}_2$, а также обобщенным ускорениям $\ddot{\theta}_1$ и $\ddot{\theta}_2$:

$$u_1 = 2\theta_2^2\ddot{\theta}_1 + 4\theta_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \frac{1}{2}k^2\theta_1(\theta_1^2 + \theta_2^2), \quad u_2 = -2\theta_2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{6}k^2\theta_2(3\theta_1^2 + \theta_2^2). \tag{8}$$

В результате модель колебаний ортогонального двойного маятника со слабой нелинейностью будет описываться системой уравнений (6) с учетом соотношений (8). Также выпишем и выражения для кинетической и потенциальной энергий в рамках данной модели, которые понадобятся нам в дальнейшем. Для этого в формулах (1) необходимо удержать лишь слагаемые четвертого порядка малости по обобщенным координатам и скоростям:

$$T = \frac{1}{2}ml^2\left[(5 - 2\theta_2^2)\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2\right], \quad \Pi = mgl\left(\frac{3\theta_1^2}{2} + \frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^4}{8} - \frac{\theta_1^2\theta_2^2}{4} - \frac{\theta_2^4}{24}\right). \tag{9}$$

Переходя к исследованию модели со слабой нелинейностью, будем использовать для этого асимптотические методы нелинейной механики. Подобное исследование ранее было проведено для случая плоского двойного маятника в работе [17]. Будем искать решение уравнений (6) в исходном приближении в виде, аналогичном (5), а именно:

$$\theta_1 = a\cos\varphi, \quad \varphi = k_1 t + \alpha, \quad \theta_2 = b\cos\psi, \quad \psi = k_2 t + \beta, \tag{10}$$

где по сравнению с (5) изменены обозначения для амплитуд a и b и начальных фаз колебаний α и β, и, кроме того, в выражениях для полных фаз фигурируют уже другие частоты колебаний k_1 и k_2, которые будут некоторым образом зависеть от амплитуд a и b. Нетрудно понять, что ввиду кубической нелинейности зависимости $k_1(a,b)$ и $k_2(a,b)$ будут квадратичными функциями величин a и b, четными как относительно a, так и относительно b. Поэтому будем искать их в следующем виде:

$$k_1 = k_{10}\left(1+\mu_1 a^2+\rho_1 b^2\right), \quad k_2 = k_{20}\left(1+\mu_2 b^2+\rho_2 a^2\right). \tag{11}$$

Коэффициенты μ_1, ρ_1, μ_2 и ρ_2 в этих выражениях определяются из следующих уравнений гармонического баланса:

$$\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}(5\ddot{\theta}_1+3k^2\theta_1-u_1)\cos\varphi\, d\varphi\, d\psi = 0, \quad \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}(\ddot{\theta}_2+k^2\theta_2-u_2)\cos\psi\, d\varphi\, d\psi = 0. \tag{12}$$

Из формул (10) и (11) можно получить выражения для $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$, $\ddot{\theta}_1$ и $\ddot{\theta}_2$ с необходимой для дальнейших вычислений точностью, т. е. с точностью до слагаемых третьего порядка малости по a и b:

$$\begin{gathered}\dot{\theta}_1 = -ak_{10}\left(1+\mu_1 a^2+\rho_1 b^2\right)\sin\varphi, \quad \dot{\theta}_2 = -bk_{20}\left(1+\mu_2 b^2+\rho_2 a^2\right)\sin\psi, \\ \ddot{\theta}_1 = -ak_{10}^2\left(1+2\mu_1 a^2+2\rho_1 b^2\right)\cos\varphi, \quad \ddot{\theta}_2 = -bk_{20}^2\left(1+2\mu_2 b^2+2\rho_2 a^2\right)\cos\psi.\end{gathered} \tag{13}$$

Чтобы получить выражения для u_1 и u_2 с той же самой точностью, достаточно подставить в формулы (7) выражения для обобщенных координат, скоростей и ускорений с точностью до первого порядка малости по a и b, а именно:

$$\begin{gathered}\theta_1 = a\cos\varphi, \quad \dot{\theta}_1 = -ak_{10}\sin\varphi, \quad \ddot{\theta}_1 = -ak_{10}^2\cos\varphi, \\ \theta_2 = b\cos\psi, \quad \dot{\theta}_2 = -bk_{20}\sin\psi, \quad \ddot{\theta}_2 = -bk_{20}^2\cos\psi.\end{gathered} \tag{14}$$

В результате этих действий после серии преобразований получим:

$$\begin{aligned}u_1 = k^2\Bigg[&\left(\frac{3}{8}a^3-\frac{7}{20}ab^2\right)\cos\varphi+\left(\sqrt{\frac{3}{5}}-\frac{7}{40}\right)ab^2\cos(2\psi-\varphi)- \\ &-\left(\sqrt{\frac{3}{5}}+\frac{7}{40}\right)ab^2\cos(2\psi+\varphi)+\frac{1}{8}a^3\cos 3\varphi\Bigg], \\ u_2 = k^2\Bigg[&\left(\frac{1}{8}b^3-\frac{7}{20}a^2b\right)\cos\psi+\frac{17}{40}a^2b\cos(2\varphi-\psi)+ \\ &+\frac{17}{40}a^2b\cos(2\varphi+\psi)+\frac{1}{24}b^3\cos 3\psi\Bigg].\end{aligned} \tag{15}$$

Подставим теперь выражения (10), (13) и (15) в уравнения гармонического баланса (12) и приравняем в их левых и правых частях поочередно коэффициенты при одинаковых комбинациях величин a и b, вследствие чего получим:

$$\mu_1 = -\frac{1}{16}, \quad \rho_1 = \frac{7}{120}, \quad \mu_2 = -\frac{1}{16}, \quad \rho_2 = \frac{7}{40}, \tag{16}$$

так что для частот колебаний (11) будем иметь следующие выражения в рамках модели со слабой нелинейностью:

$$k_1 = k_{10}\left(1-\frac{1}{16}a^2+\frac{7}{120}b^2\right), \quad k_2 = k_{20}\left(1-\frac{1}{16}b^2+\frac{7}{40}a^2\right). \tag{17}$$

Отсюда легко видеть, что частоты колебаний k_1 и k_2 могут быть как меньшими, так и большими линейных значений k_{10} и k_{20}, в зависимости от амплитуд колебаний a и b.

Далее следует уточнить выражения (10) с учетом (17), а именно, определить поправки третьего порядка малости по величинам a и b, что и приведет нас к искомому решению для модели со слабой нелинейностью. Возвращаясь к уравнениям (6) и трактуя в них u_1 и u_2 как вынуждающие эффекты, действующие в линейных системах с одной степенью свободы (для θ_1 и θ_2 соответственно), установим, какое вынужденное колебание возбуждает каждое из гармонических слагаемых в u_1 и u_2 из (15). При этом будем иметь в виду, что гармоники $\cos\varphi$ и $\cos\psi$ уже сбалансированы исходя из уравнений гармонического баланса (12), так что отвечающие им слагаемые уже учтены. Суммируя для обоих уравнений (6) все решения, отвечающие каждой гармонической составляющей в формулах (15), получим с необходимой точностью следующие выражения:

$$\tilde{\theta}_1 = \frac{\left(\sqrt{3/5} - 7/40\right)k^2ab^2}{3k^2 - 5(k_{10} - 2k_{20})^2}\cos(2\psi - \varphi) - \frac{\left(\sqrt{3/5} + 7/40\right)k^2ab^2}{3k^2 - 5(k_{10} + 2k_{20})^2}\cos(2\psi + \varphi) + \\ + \frac{k^2a^3}{8\left[3k^2 - 5(3k_{10})^2\right]}\cos 3\varphi,$$

$$\tilde{\theta}_2 = \frac{17/40k^2a^2b}{k^2 - (2k_{10} - k_{20})^2}\cos(2\varphi - \psi) + \frac{17/40k^2a^2b}{k^2 - (2k_{10} + k_{20})^2}\cos(2\varphi + \psi) + \\ + \frac{k^2b^3}{24\left[k^2 - (3k_{20})^2\right]}\cos 3\psi. \qquad (18)$$

В результате искомое решение, уточняющее формулы (10), определится как $\theta_1 = a\cos\varphi + \tilde{\theta}_1$ и $\theta_2 = b\cos\psi + \tilde{\theta}_2$, или в развернутой форме:

$$\theta_1 = a\cos\varphi - \frac{a^3}{192}\cos 3\varphi - \\ - \frac{ab^2}{320}\left[\left(17 + 33\sqrt{\frac{3}{5}}\right)\cos(2\psi - \varphi) + \left(17 - 33\sqrt{\frac{3}{5}}\right)\cos(2\psi + \varphi)\right], \qquad (19)$$

$$\theta_2 = b\cos\psi - \frac{b^3}{192}\cos 3\psi + \\ + \frac{17a^2b}{192}\left[\left(3 + \sqrt{15}\right)\cos(2\varphi - \psi) + \left(3 - \sqrt{15}\right)\cos(2\varphi + \psi)\right].$$

Таким образом, решение в рамках модели со слабой нелинейностью имеет вид (19), где $\varphi = k_1 t + \alpha$ и $\psi = k_2 t + \beta$, а выражения для k_1 и k_2 даются формулами (17). Отметим, что корректность построенного решения можно проверить, если подставить его в систему уравнений (6) с учетом (8) и убедиться в том, что оно в самом деле удовлетворяет этой системе с точностью до величин третьего порядка малости по a и b. Кроме того, проверку данного решения можно осуществить, если вычислить полную механическую энергию $E = T + \Pi$ согласно (9) и убедиться, что она не зависит от полных фаз φ и ψ, а, стало быть, и от времени, как и должно быть ввиду консервативности задачи. Это выражение имеет вид:

$$E = mgl\left(\frac{3}{2}a^2 - \frac{9}{64}a^4 + \frac{1}{2}b^2 - \frac{3}{64}b^4 - \frac{3}{80}a^2b^2\right), \qquad (20)$$

и оно зависит только от a и b, что подтверждает сказанное выше.

Обращаясь к детальному анализу формул (19), замечаем, что угол θ_1 представляет собой сумму четырех гармонических колебаний с частотами k_1, $3k_1$, $2k_2 - k_1$ и $2k_2 + k_1$, тогда как угол θ_2 есть сложение четырех гармонических колебаний с частотами k_2, $3k_2$, $2k_1 - k_2$ и $2k_1 + k_2$. Кроме того, из формул (19) как частные случаи можно получить выражения для периодических режимов движения ортогонального двойного маятника. Полагая в этих формулах поочередно $b = 0$ и $a = 0$, получим с учетом (17):

$$\begin{gathered}\theta_1 = a\cos\varphi - \frac{a^3}{192}\cos 3\varphi, \quad \theta_2 = 0, \quad k_1 = k_{10}\left(1 - \frac{1}{16}a^2\right); \\ \theta_1 = 0, \quad \theta_2 = b\cos\psi - \frac{b^3}{192}\cos 3\psi, \quad k_2 = k_{20}\left(1 - \frac{1}{16}b^2\right).\end{gathered} \qquad (21)$$

Видно, что в первом случае угол θ_1 является периодической, но уже не гармонической функцией, которая имеет частоту k_1, тогда как колебания по углу θ_2 отсутствуют, а во втором случае угол θ_2 представляет собой периодическую, но не гармоническую функцию, имеющую частоту k_2, а колебаний по углу θ_1 не происходит. При этом оба представленных режима являются идентичными по формульной записи с точностью до обозначений. Подчеркнем, что их существование можно было обнаружить изначально, поскольку уравнения (3) допускают частные решения, которые определяются из следующих соображений:

$$\begin{gathered}\ddot{\theta}_1 + k_{10}^2 \sin\theta_1 = 0, \quad \theta_2 = 0; \\ \theta_1 = 0, \quad \ddot{\theta}_2 + k_{20}^2 \sin\theta_2 = 0.\end{gathered} \qquad (22)$$

Ясно, что оба представленных уравнения для θ_1 и θ_2 есть не что иное, как уравнение движения обычного математического маятника, для которого решение в различных приближениях приведено в [18], и с необходимой

точностью оно совпадает с выражениями (21). Остается отметить, что в общем случае решение, имеющее вид (19), имеет намного более сложный характер, чем вытекающие из него периодические режимы движения (21), и в силу нелинейности задачи их суперпозиция не дает полного решения.

Обсуждение результатов

Перейдем теперь к графической иллюстрации результатов, которые получаются при использовании различных моделей, и их сопоставлению между собой. Будем отталкиваться от выражений для модели со слабой нелинейностью, которые имеют вид (19), и зададим в них некоторые не слишком малые, но и не слишком большие значения величин a и b, положив при этом начальные фазы равными нулю, т. е. примем $\alpha = 0$ и $\beta = 0$. Тогда $\varphi = k_1 t$ и $\psi = k_2 t$, где k_1 и k_2 определяются по формулам (17). Из (19) нетрудно понять, что такое движение будет реализовываться, если движение начинается из состояния покоя, т. е. при нулевых начальных угловых скоростях: $\theta_1 = \theta_{10}$, $\dot{\theta}_1 = 0$, $\theta_2 = \theta_{20}$ и $\dot{\theta}_2 = 0$ при $t = 0$, причем

$$\theta_{10} = a - \frac{a^3}{192} - \frac{17ab^2}{160}, \quad \theta_{20} = b - \frac{b^3}{192} + \frac{17a^2 b}{32}. \tag{23}$$

Если же задать в линейной модели те же самые начальные условия движения, то они согласно (5) будет удовлетворены при $a_0 = \theta_{10}$, $b_0 = \theta_{20}$, $\alpha_0 = 0$ и $\beta_0 = 0$. Наконец, следует проинтегрировать численно систему точных уравнений движения ортогонального двойного маятника (3) в рамках исходной нелинейной модели при тех же самых начальных условиях движения, вследствие чего будем иметь для данной модели численное решение. Выясним, насколько адекватными приближениями к нему будут являться решения, найденные в рамках линейной модели и модели со слабой нелинейностью.

Положим, например, $a = 0.3$ рад и $b = 0.7$ рад. Тогда по формуле (23) будем иметь следующие начальные значения углов поворота в шарнирах маятника: $\theta_{10} = 0.2842$ рад и $\theta_{20} = 0.7317$ рад. Зададим также конкретное значение величины k, например, для простоты примем $k = 1$ рад/с. Тогда согласно (17) получим: $k_1 = 0.7924$ рад/с и $k_2 = 0.9851$ рад/с. Что касается линейной модели, то для нее исходя из сказанного ранее имеем $a_0 = 0.2842$ рад и $b_0 = 0.7317$ рад, а $k_{10} = 0.7746$ рад/с и $k_{20} = 1$ рад/с.

На рис. 2 приведены графики зависимости углов поворота θ_1 и θ_2 в шарнирах маятника от времени t, которые отвечают линейной модели (красные линии), модели со слабой нелинейностью (синие точечные линии), а также исходной нелинейной модели (зеленые линии).

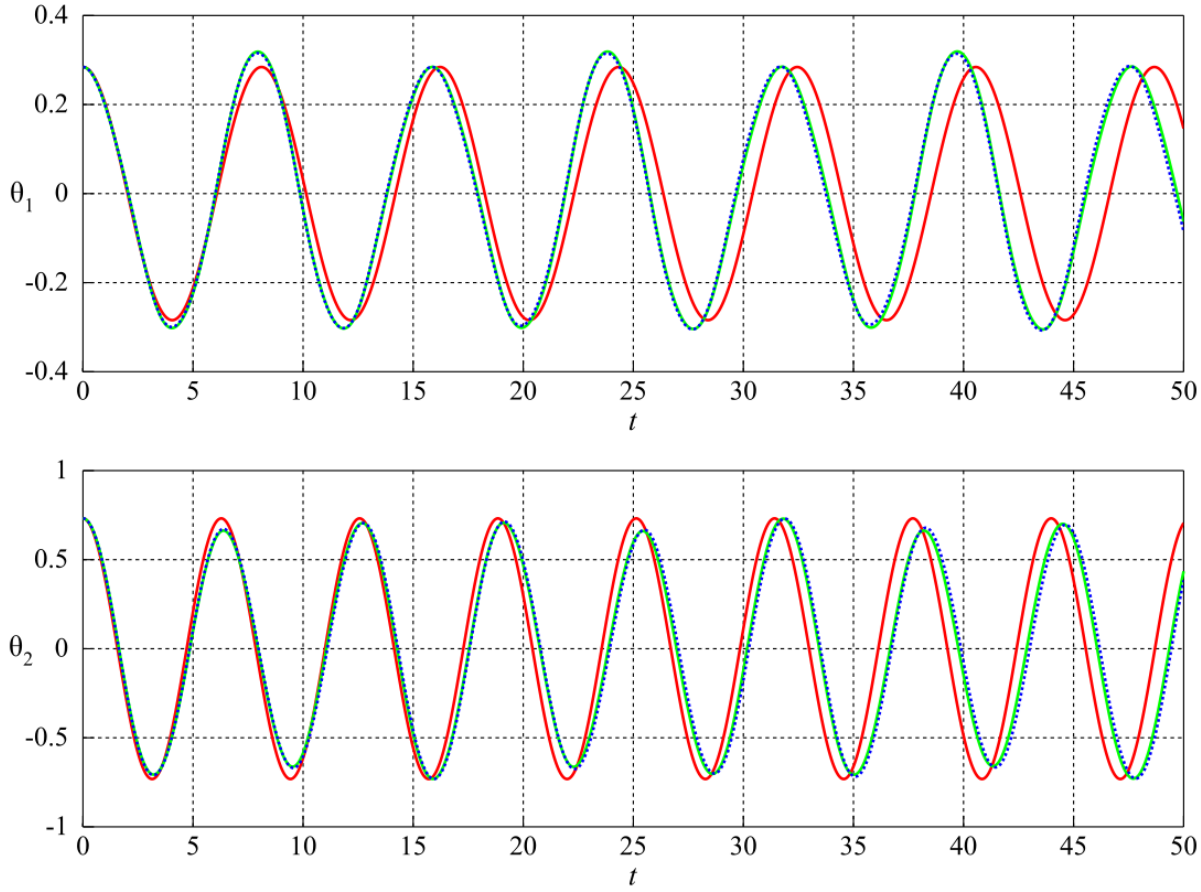


Рис. 2. Графики зависимости углов поворота θ_1 и θ_2 в шарнирах маятника от времени t в рамках линейной модели (красные линии), модели со слабой нелинейностью (синие точечные линии) и нелинейной модели (зеленые линии)

Анализируя представленные на рис. 2 графики, можно сделать вывод, что при принятых начальных условиях, которые уже не являются малыми, линейная модель дает результаты, плохо согласующиеся с численным решением для исходной нелинейной модели. Это означает, что она не позволяет получить корректную картину поведения ортогонального двойного маятника, в то время, как модель со слабой нелинейностью дает адекватные результаты, близкие к численному решению для нелинейной модели в качественном отношении, а количественные расхождения между ними весьма незначительны. Эти заключения лишний раз подтверждают целесообразность изучения модели со слабой нелинейностью.

Заключение

В настоящей работе были рассмотрены колебания ортогонального двойного маятника с идентичными параметрами его звеньев и концевых грузов с учетом слабой нелинейности третьего порядка малости. Анализ этой модели при помощи асимптотических методов позволил получить довольно компактное решение и выявить его ключевые особенности,

связанные с его нетривиальной структурой. В частности, из этого решения можно найти выражения для периодических режимов движения системы, когда колебания имеют место лишь по одной обобщенной координате, и они оказываются аналогичными колебаниям математического маятника. Полученное решение также было приведено в графической форме вместе с решениями для линейной модели и исходной нелинейной модели, причем для обсчета последней из них применялось численное интегрирование. Представленная графическая иллюстрация позволяет заключить, что модель со слабой нелинейностью адекватно описывает колебательные процессы в системе при принятых начальных условиях, которые нельзя считать малыми, а линейная модель не отражает правильным образом поведение этой системы, как того можно было ожидать. Полученные результаты имеют фундаментальное значение, а также они могут оказаться полезными при решении прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Акбиров Р.Р., Маликов А.И. Управление двойным перевернутым маятником на тележке. Вестник Казанского технического университета им. А.Н. Туполева. 2018. Т. 74. № 2. С. 168–177.

[2] Смирнов А.С., Смольников Б.А. Колебания двойного математического маятника с внутренним трением. Современное машиностроение: Наука и образование 2022. Материалы 11-й Международной научной конференции, 23 июня 2022 года. 2022. С. 113–125.

[3] Беляев А.К., Полякова О.Р., Товстик Т.П. Динамика и устойчивость двухзвенного маятника Капицы. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 2. С. 78–87.

[4] Cross, R. A double pendulum swing experiment: In search of a better bat. American Journal of Physics, 2005, 73 (4), pp. 330–339.

[5] Stachowiak, T., Okada, T. A numerical analysis of chaos in the double pendulum. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 29 (2), pp. 417–422.

[6] Rafat, M., Wheatland, M., Bedding, T. Dynamics of a double pendulum with distributed mass. American Journal of Physics, 2009, 77 (3), pp. 216–223.

[7] Maiti, S., Roy, J., Mallik, A.K., Bhattacharjee, J. Nonlinear dynamics of a rotating double pendulum. Physics Letters, 2015, 380 (3), pp. 408–412.

[8] Elbori, A., Abdalsmd, L. Simulation of Double Pendulum. Journal of Software Engineering and Simulation, 2017, 3 (7), pp. 1–13.

[9] Luo, A.C.J., Guo, C. A Period-1 Motion to Chaos in a Periodically Forced, Damped, Double-Pendulum. Journal of Vibration Testing and System Dynamics, 2019, 3 (3), pp. 259–280.
[10] Sawant, K.R., Shrikanth, V. Energy dissipation and behavioral regimes in an autonomous double pendulum subjected to viscous and dry friction damping. European Journal of Physics, 2021, 42 (5), 055008.
[11] Awrejcewicz, J., Wasilewski, G., Kudra, G., Reshmin, S.A. An experiment with swinging up a double pendulum using feedback control. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, 51 (2), pp. 176–182.
[12] Агарева О.Ю. Относительные равновесия двойного сферического маятника и их устойчивость. Деп. в ВИНИТИ 4.12.1996. № 34930-В96.
[13] Ludwicki, M., Awrejcewicz, J., Kudra, G. Spatial double physical pendulum with axial excitation: computer simulation and experimental set-up. International Journal of Dynamics and Control, 2015, 3, pp. 1–8.
[14] Bendersky, S., Sandler, B. Investigation of a spatial double pendulum: an engineering approach. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2006, pp. 1–22.
[15] Смирнов А.С., Смольников Б.А. Колебания двойного математического маятника с неколлинеарными шарнирами. Современное машиностроение: Наука и образование 2020. Материалы 9-й Международной научно-практической конференции, 25 июня 2020 года. 2020. С. 153–165.
[16] Меркин Д.Р., Бауэр С.М., Смирнов А.Л., Смольников Б.А. Теория устойчивости в примерах и задачах. М., Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 208 с.
[17] Смирнов А.С., Кравчинский С.А. Колебания двойного маятника с учетом слабой нелинейности. Труды семинара «Компьютерные методы в механике сплошной среды» 2023–2024. 2024. С. 19–33.
[18] Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Физматгиз, 1958. 408 с.

A.S. Smirnov[1,2], D.A. Snetkov[1]

OSCILLATIONS OF ORTHOGONAL DOUBLE PENDULUM WITH WEAK NONLINEARITY

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russia

Abstract

The paper studies oscillations of a double mathematical pendulum with identical parameters of links and end loads, the joint axes of which form a right angle. Exact nonlinear equations of motion are given, and both a linear model of small oscillations, in which the equations are not related to each other, and a model with weak nonlinearity, in which nonlinear terms of the third order of smallness are retained, are obtained from them. For the latter of these models, an approximate analytical solution is constructed using asymptotic methods, in the process of which its main features are established. The obtained results are presented in graphical form and compared with the analytical solution for the linear model and the numerical solution for the original nonlinear model. These results are of interest for the dynamics of pendulum structures and may also be useful in solving specific applied problems in the field of robotics.

Key words: orthogonal double pendulum, weak nonlinearity model, asymptotic methods, numerical integration.

REFERENCES

[1] Akbirov, R.R., Malikov, A.I. Control of a double inverted pendulum on a cart. Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva, 2018. 74 (2), pp. 168-177. (rus.)
[2] Smirnov, A.S., Smolnikov, B.A. Oscillations of double mathematical pendulum with internal friction. Modern mechanical engineering: Science and education 2022. Proceedings of the 11th International scientific conference, June 23, 2022. 2022, pp. 113–125. (rus.)
[3] Belyaev, A.K., Polyakova, O.R., Tovstik, T.P. Dynamics and stability of Kapitsa's two-link pendulum. PNRPU Mechanics Bulletin, 2023, 2, pp. 78–87. (rus.)
[4] Cross, R. A double pendulum swing experiment: In search of a better bat. American Journal of Physics, 2005, 73 (4), pp. 330–339.
[5] Stachowiak, T., Okada, T. A numerical analysis of chaos in the double pendulum. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 29 (2), pp. 417–422.

[6] Rafat, M., Wheatland, M., Bedding, T. Dynamics of a double pendulum with distributed mass. American Journal of Physics, 2009, 77 (3), pp. 216–223.
[7] Maiti, S., Roy, J., Mallik, A.K., Bhattacharjee, J. Nonlinear dynamics of a rotating double pendulum. Physics Letters, 2015, 380 (3), pp. 408–412.
[8] Elbori, A., Abdalsmd, L. Simulation of Double Pendulum. Journal of Software Engineering and Simulation, 2017, 3 (7), pp. 1–13.
[9] Luo, A.C.J., Guo, C. A Period-1 Motion to Chaos in a Periodically Forced, Damped, Double-Pendulum. Journal of Vibration Testing and System Dynamics, 2019, 3 (3), pp. 259–280.
[10] Sawant, K.R., Shrikanth, V. Energy dissipation and behavioral regimes in an autonomous double pendulum subjected to viscous and dry friction damping. European Journal of Physics, 2021, 42 (5), 055008.
[11] Awrejcewicz, J., Wasilewski, G., Kudra, G., Reshmin, S.A. An experiment with swinging up a double pendulum using feedback control. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2012, 51 (2), pp. 176–182.
[12] Agareva, O.Yu. Relative equilibria of a double spherical pendulum and their stability. Dep. v VINITI 4.12.1996. N3493-B96. (rus.)
[13] Ludwicki, M., Awrejcewicz, J., Kudra, G. Spatial double physical pendulum with axial excitation: computer simulation and experimental set-up. International Journal of Dynamics and Control, 2015, 3, pp. 1–8.
[14] Bendersky, S., Sandler, B. Investigation of a spatial double pendulum: an engineering approach. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2006, pp. 1–22.
[15] Smirnov, A.S., Smolnikov, B.A. Oscillations of double mathematical pendulum with noncollinear joints. Modern mechanical engineering: Science and education 2020. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference, June 25, 2020. 2020, pp. 153–165. (rus.)
[16] Merkin, D.R., Bauer, S.M., Smirnov, A.L., Smolnikov, B.A. The theory of stability in examples and problems. Moscow, Izhevsk: Regular and Chaotic Dynamics, 2007. 208 p. (rus.)
[17] Smirnov, A.S., Kravchinskiy, S.A. Oscillations of a double pendulum with a weak nonlinearity. Transactions of seminar “Computer methods in continuum mechanics” 2023–2024. 2024, pp. 19–33. (rus.)
[18] Bogoliubov, N.N., Mitropolsky, Y.A. Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. Moscow: GIFML, 1958. 408 p. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 531.11
doi:10.18720/SPBPU/2/id-113

А.Н. Стариков

САМОТОРМОЖЕНИЕ ЦАНГОВОГО МЕХАНИЗМА



Альберт Николаевич Стариков,
Владимирский государственный университет
имени А. Г. и Н. Г Столетовых, Россия, Владимир
Тел.: (0922) 479-636, E-mail: alstars@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена определению условий фиксации металлорежущего инструмента. Анализ ведётся с позиций теории самоторможения механизмов. Рассматривается последовательная компоновка составного механизма, основанного на простейших механизмах, *наклонная плоскость* и *клиновой механизм*. Получены аналитические зависимости для определения момента затягивания гайки цангового механизма для фиксации инструмента с требуемым запасом по самоторможению как по вращению, так и по осевому смещению.

Ключевые слова: самоторможение, механизм наклонная плоскость, клиновая пара.

Введение

Повышение качества функционирования технологической оснастки есть актуальная задача машиностроения. Цанговые соединений предназначены для быстрой и надёжной фиксации инструмента. В материалах [1-3] рассмотрен теория и методы расчёта данных устройств.

Поскольку здесь нет отдельных тормозных устройств, то качественная оценка стопорения фрезы в цанговом патроне можно рассматривать по характеристике надёжность самоторможения механизма. Изучение данного вопроса представлено как в трудах российских учёных: В. В. Панюхина [4], А. И. Турпаева [5], В. Л. Вейца [6-9], Н. И. Левитский [10] Н. И. Колчина

[11], и др., так и зарубежных: Роано (Швейцария) [12]; Поппер (Израиль) [13]; И.Д. Хоуэлл (США), Мюнстер (ФРГ), Метраль, ЛеБера (Франция) [14].

Научный подход к теории данного вопроса уходит во времена Леонардо-да-Винчи, Гийома Амонтона Огюстена Кулона, [15-17].

В современных источниках уместно отметить работы как фундаментального, – П. А. Андриенко [18], В. И. Побжелко [19], так и прикладного характера, – А. А. Суханов [20, 21], а также [22-28]. Работы А. А. Суханова наиболее близки к области научных интересов автора: теория взаимодействия тел по плоскости.

Целью исследования ставится повышение прогнозируемости надёжности фиксации инструмента. Задачами являются:

- рассмотрение самоторможения фрезы в цанговом патроне методом Ассура, – метода разложения на простейшие.
- получение аналитических зависимостей запаса надёжности фиксации инструмента, – запас по самоторможению – в тангенциальном и осевом направлениях.

Методы

Цанговый механизм является составным, в котором используется клиновой механизм для зажима вала инструмента с целью исключения его проскальзывания относительно патрона, – как по вращению, так и по осевому движению, рис. 1

а) *б)*

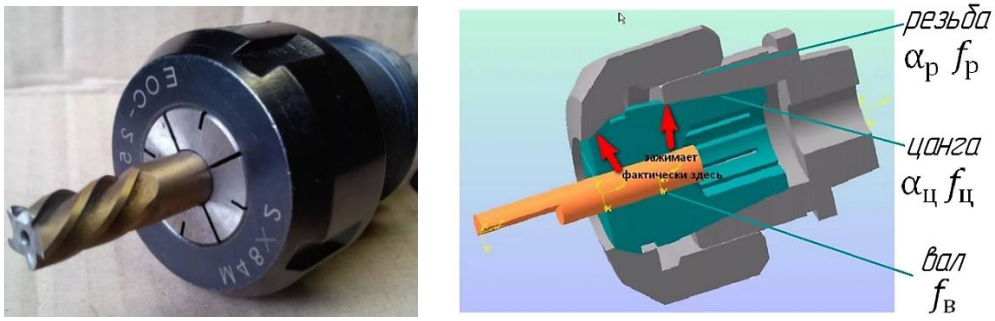


Рис. 1. Цанговое соединение (механизм)
а) фото; б) 3D-модель

Принято полагать, что основным функциональным элементом, определяющим свойства данного устройства, является конусная разрезная втулка. Главным параметром которой выступает угол скоса цанги $\alpha_ц$, рис. 2.

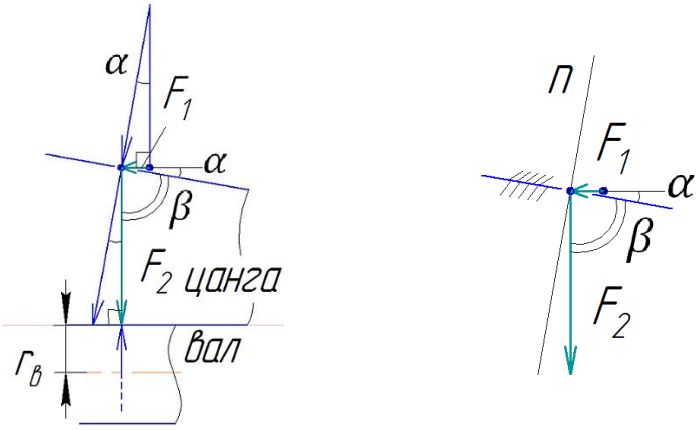


Рис. 2. *Силовая схема цангового зажима*
F_1 – сила осевой затяжки цанги;
F_2 – сила воздействия на вал инструмента

Силовой баланс по условию «непроворачивания» вала инструмента относительно цанги будет:

$$M_{\text{вал}} \leq F_{\text{тр}} r_{\text{в}} \, \varphi_{\text{в}} \,,$$

где $M_{\text{вал}}$ – момент на валу, который необходимо обеспечить;

$r_{\text{в}}$ – радиус вала;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения в месте контакта вал-цанга, $F_{\text{тр}} = f_{\text{в}} \, F_2$, рис. 2;

$f_{\text{в}}$ – коэффициент трения пары *вал-цанга*;

$\varphi_{\text{в}}$ – коэффициент запаса, – во сколько раз удерживающий момент больше требуемого от проворачивания в сопряжении *вал-цанга*, – *запас по самоторможению* вала в цанге;

Сила осевого воздействия цанги F_1 и сила воздействия на вал инструмента F_2 связаны соотношением

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{1 - f \; tg \, \alpha_{\text{ц}}}{f + tg \, \alpha_{\text{ц}}} \qquad (1)$$

Сила F_1, в свою очередь, также является следствием работы клинового механизма, – гайки, затягивающей цангу.

Применяя метод разбиения на простейшие и номенклатуру простейших механизмов, [28], можно представить синтез цангового механизма следующим образом, рис. 3.

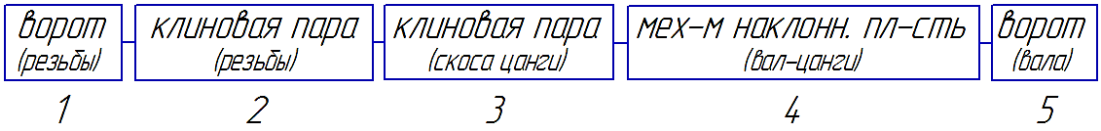


Рис. 3. Разложение цангового механизма на составляющие

Основным функционалом цангового механизма (в целом) является быстросъемность инструмента и отсутствие проскальзывания его вала при работе. Это достигается синтезом через последовательную компоновку трёх *простейших механизмов*:

- рис. 3, п. 2 – *клиновой механизм* резьбы гайка-винт с уверенным самоторможением;
- п. 3 – *клиновая пара* скоса цанги. Из практики известно, что здесь имеет место граничное состояние по самоторможению. При незатянутой гайке фиксация инструмента имеется, но при вибрации во время работы или легкого бокового удара по цанге – соединение нарушается;
- п. 4 – *механизм наклонная плоскость*, который перестаёт быть подвижным и входит во внутреннюю область равновесия, с необходимым запасом по удержанию вала инструмента, вследствие действия двух выше обозначенных механизмов.

Результаты

Общая аналитическая зависимость передачи усилий от затягивания гайки цанги к фиксации вала по вращению будет выглядеть следующим образом:

$$M_{з} \cdot \frac{1}{r_{р}} \cdot \frac{1 - f_{р}\, tg\, \alpha_{р}}{f_{р} + tg\, \alpha_{р}} \cdot \frac{1 - f_{ц}\, tg\, \alpha_{ц}}{f_{ц} + tg\, \alpha_{ц}} \cdot f_{в} \cdot r_{в} \cdot \frac{1}{\varphi_{в}} = M_{вал} \qquad (2)$$

где $M_{з}$ – момент затяжки в резьбе гайки (ключом, приводом);

$f_{р}$ – коэффициент трения в резьбе затягивающей гайки, рис. 1, *б*;

$\alpha_{р}$ – средний угол подъёма резьбы (угол профиля резьбы не учитывается);

$f_{ц}$ – коэффициент трения в паре гайка-цанга;

$\alpha_{ц}$ – угол скоса поверхности цанги;

$f_{в}$ – коэффициент трения вал-цанга;

$r_{в}$ – радиус вала;

$\varphi_{в}$ – запас по самоторможению на валу

$M_{вал}$ – момент на валу, который необходимо обеспечить.

Из (2) можно определить необходимый момент затяжки гайки цанги, как функции от величины момента фиксации инструмента

$$M_{з} = M_{вал} \cdot \left(\frac{r_{в}}{r_{р}} \cdot \frac{1 - f_{р}\, tg\, \alpha_{р}}{f_{р} + tg\, \alpha_{р}} \cdot \frac{1 - f_{ц}\, tg\, \alpha_{ц}}{f_{ц} + tg\, \alpha_{ц}} \cdot f_{в} \cdot \frac{1}{\varphi_{в}} \right)^{-1}, \qquad (3)$$

С определённой степенью допущения можно полагать, что $f_{р}$=$f_{ц}$=$f_{в}$. Зная или задавая требуемый запас по самоторможению $\varphi_{в}$ можно определить необходимый момент затягивания гайки для известного нагрузочного момента на инструменте.

Рассмотрим детально действие этих трёх механизмов в соответствии с кинематической последовательностью их действия.

Клиновая пара резьбы, рис. 3 – п. 2.

Запас по самоторможению относительный выглядит следующим образом

$$\varphi_{р} = \frac{2 f_{р}}{f_{р} + tg\, \alpha_{р}}. \qquad (4)$$

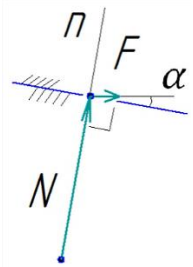
Под ним понимается – во сколько величина потенциальной силы терния больше реальной. Вывод здесь не приводится.

Полагается, что нет дополнительного подпирающего воздействия со стороны затягивающей цангу гайки. Как, например, включённый двигатель привода или ключ, оставленный с пред натягом по закручиванию.

Этот механизм не участвует непосредственно в передаче вращательного движения. Тем ни менее он создаёт осевое усилие для клинового механизма скоса цанги п. 3, рис. 3, – для зажима вала инструмента, – п. 4;

Клиновая пара скоса цанги резьбы, рис. 3 – п. 3.

Для случая отсутствия подпирающей гайки запас по самоторможению в цанге будет



$$\varphi_{\text{ц}} = f_{\text{ц}}\, ctg\, \alpha_{\text{ц}} \qquad (5)$$

Этот способ фиксации инструмента применяется в конусных посадках, например – конус Морзе у свёрл, рис. 4.

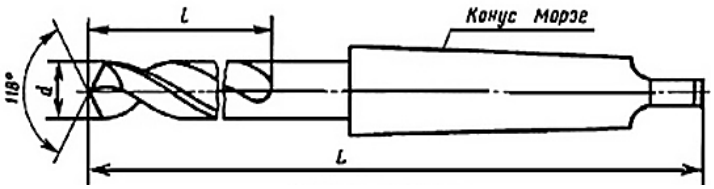


Рис. 4. Конусная посадка сверла

Для цангового же механизма имеет место подпирающая гайка. Этот факт необходимо учитывать. С учётом формулы (1) получим

$$\varphi_{\text{ц}} = \frac{f_{\text{ц}}\, F_2 \cos \alpha_{\text{ц}}}{F_2 \sin \alpha_{\text{ц}} - F_1}\,. \qquad (6)$$

где с учётом формулы (2) получим,

$$F_2 = M_{\text{з}} \cdot \frac{1}{r_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{р}}\, tg\, \alpha_{\text{р}}}{f_{\text{р}} + tg\, \alpha_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}}\, tg\, \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + tg\, \alpha_{\text{ц}}}\,, \qquad (7)$$

$$F_1 = M_{\text{з}} \cdot \frac{1}{r_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{р}}\, tg\, \alpha_{\text{р}}}{f_{\text{р}} + tg\, \alpha_{\text{р}}}\,. \qquad (8)$$

Следует отметить, что гайка, подпирающая цангу, существенно усиливает фиксирующие свойства конуса цанги. В связи с этим углы скоса цанги в случае «с гайкой» делают большими, – 8,3° (конус 7:24) и более; в отличии от «без гайки» (конус Морзе), – порядка 1,5° (конус 1:20).

Механизм наклонной плоскости, рис. 3 – п. 4.

Отсутствие проскальзывания инструмента в цанге удобно рассматривать через баланс вращающего и препятствующего моментов. Либо с позиций подвижности в *механизме наклонная плоскость*, где лепестки цанги скользят (не скользят) по поверхности вала.

Данный подход уместен, так как для этого имеются следующие аргументы и исходные данные:

- механизм п. 4 в отдельности – несамотормозящийся. Однако он элемент составного самотормозящегося механизма;
- в отличии от *разъёмного соединения* рассмотрение здесь ведётся с позиций постоянной подвижности элементов, с чётко выраженной функцией – принудительное самоторможением, которое должно быть аналитически рассчитано и возможно варьироваться от ситуации;
- механизм п. 4 – имеется входное движение под углом к нормали к поверхности (сложение нормали и приводного усилия), наличие подвижности (при смене инструмента) либо отсутствие передачи движения (при работе).

С позиций силового баланса фиксация вала инструмента осуществляется посредством вхождения в область равновесия за счёт увеличения сил нормального взаимодействия в контакте поверхностей *фреза-цанга*. При этом потенциальная сила трения больше движущих сил (реальной силы трения). Это достигается работой двух клиновых механизмов, рассмотренных выше.

Самоторможение для *механизм наклонная плоскость* в условиях «подпора» имеют отдельное исследование и здесь не рассматривается. Итоговая зависимость запаса по самоторможению в данном случае для инструмента (фрезы) имеет вид:

$$\varphi_{\text{в}}^{\text{вр}} = \frac{f_{\text{в}} F_2 \sin 90^\circ}{M_{\text{вал}}/r_{\text{в}}} = \frac{f_{\text{в}}\, F_2\, r_{\text{в}}}{M_{\text{вал}}}, \qquad (9)$$

где с учётом формулы (1) получим

$$\varphi_{\text{в}}^{\text{вр}} = f_{\text{в}}\, \frac{M_{\text{з}}}{M_{\text{вал}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{р}}\, t\text{g}\, \alpha_{\text{р}}}{f_{\text{р}} + t\text{g}\, \alpha_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}}\, t\text{g}\, \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + t\text{g}\, \alpha_{\text{ц}}}. \qquad (10)$$

Следует отметить, что в выражении (9) сила F_2 создана на этапе затягивания гайки цангового соединения.

Обсуждение

Данный простейший механизм, – *механизм наклонная плоскость* – выступает непосредственным контактным исполнителем фиксации

инструмента. Можно отметить, что из всех радиусов здесь имеет место наименьший радиус действия силы, – $r_{\text{в}}$. Соответственно силовой фактор, для обеспечения передачи момента, возрастает.

Для случая передачи цанговым механизмом осевого усилия, – отсутствие смещения (удержание) вала в осевом направлении – формула (9) трансформируется к виду

$$\varphi_{\text{в}}^{\text{ос}} = \frac{f_{\text{в}} F_2}{F_{\text{ос}}} = f_{\text{в}} \cdot \frac{M_{\text{з}}}{F_{\text{ос}}\, r_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{р}}\, tg\, \alpha_{\text{р}}}{f_{\text{р}} + tg\, \alpha_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}}\, tg\, \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + tg\, \alpha_{\text{ц}}}, \qquad (11)$$

где $F_{\text{ос}}$ – сила осевого воздействия.

Следует отметить, что в выражении (9) сила F_2 создана на этапе затяжки цангового соединения. Для 2-ого *простейшего механизма* (см. выше), – скоса цанги – это запертая сила, которую он удерживает.

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{M_{\text{з}}}{M_{\text{вал}}} \frac{r_{\text{в}}}{r_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{р}}\, tg\, \alpha_{\text{р}}}{f_{\text{р}} + tg\, \alpha_{\text{р}}} \cdot \frac{1 - f_{\text{ц}}\, tg\, \alpha_{\text{ц}}}{f_{\text{ц}} + tg\, \alpha_{\text{ц}}} \cdot f_{\text{в}}\,. \qquad (12)$$

Заключение

Таким образом, используя метод разложения на *простейшие* рассмотрена механика процесса и получены аналитические зависимости (9), (11) по определению величина момента затяжки гайки цангового механизма для обеспечения фиксации инструмента при передаче вращения и осевого удержания с требуемым запасом по фиксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ozoegwu, C.: Automated Upgraded Generalized Full-Discretization Method: Application to the Stability Study of a Thin-Walled Milling Process / C. Ozoegwu, P. Eberhard // Mechanical Science, Springer, 2021, p. 83-104, ISBN 978-981-15-5711-8

[2] Обработка металлов резанием: справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; под общ. ред. А .А. Панова. - М.: Машиностроение, 2004. -784 с.

[3] Кувшинский, В. В. Фрезерование. М., Машгиз, 1958.

[4] Панюхин, В. В. Исследование самоторможения механизмов и разработка методов проектирования высокоэффективных зубчатых

зацеплений с тормозящими профилями : дисс. соиск. учен. степ. канд. техн. наук : спец.: 05.02.02 - Машиноведение и детали машин : 05.02.18 - Теория механизмов и машин / В. В. Панюхин; Владимирский государственный университет (ВлГУ) – Владимир, 1999, 375 с.
[5] Турпаев, А. И. Самотормозящиеся механизмы. М.: «Машиностроение», 1976, 208 с.
[6] Вейц, В. Л. Динамика машинных агрегатов, Машиностроение, Ленинград, 1969 г., 367 стр.;
[7] Вейц, В. Л. Динамика приводов с замкнутыми кинематическими цепями / В. Л. Вейц, И. А. Гидаспов, Г. В. Царев // Мордовский государственный университет, 1991 г., 179 стр.;
[8] Вейц, В. Л. Динамика управляемого электромеханического привода с асинхронным двигателем, Киев, 88 г., 272 с.
[9] Вейц, В. Л., Расчет тормозных режимов в приводах с самотормозящейся передачей. Бюллетень Ленинградского политехнического университета, №6, 1958 г.
[10] Левитский, Н. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука. 1979, 576 с.
[11] Колчин, Н. И. Механика машин: В 2 т., изд. 3-е перераб. Л.:Машиностроение, 1971, т.2.–456 с.
[12] Пат. ФРГ № 1040864, МКИ F 06 H. Zahnradgetriebe / A. Roano (Швейцария). - № 15 777; заявлено 1.03.56; опубл. 9.10.58; НКИ 47 H 06 – 2 с..
[13] Детали машин / О. А. Ряховский, А. В. Клыпин – М. : Дрофа, 2002, 282 с. – ISBN 5-7107-5232-0.
[14] Мюнстер, Н. С. Определение коэффициента полезного действия зубчатых передач // Труды Ташкентского политехнического ин-та. - 1968. - Вып. 30. - с. 82-104.
[15] Гуковский, М. А. Механика Леонардо да Винчи / М.,Л.: Изд-во АН СССР, 1947, 816 с.
[16] Amontons, G. De la resistance cause dans les machines //Mem. L'Acad. Roy., 1699.-pp. 206-222
[17] Coulomb, C. A. Theorie des machines simples //Mem. Math, et Phys. L'Acad. Sci., 1785, vol. 10, pp. 161-331
[18] Андриенко, П. А. Использование элементов теории графов для структурного анализа механизмов / П. А. Андриенко, А. Н. Евграфов, Д. П. Козликин и др. / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 43-58.
[19] Побжелко, В. И. Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов / П. А. Андриенко, А, Н. Евграфов, Д. П. Козликин и др. / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 91-100.

[20] Суханов, А. А. Клиновая модель трения скольжения / Современное машиностроение: наука и образование 2023: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023, с. 134-146.
[21] Суханов, А. А. Влияние протектора на трение скольжения / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, с. 164-176.
[22] Starikov, A. N. Improving the energy efficiency of construction equipment through the development of design methods for self-braking mechanisms / Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of MPCPE 2024, Selected Papers // Springer – Switzerland, p 339-349
[23] Стариков, А. Н. Механика протектора шин / Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно-практической конференции. // Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. - №7. – с. 109 - DOI: 10.26160/2658-6185-2024-7.
[24] Васильев, А, А. Влияние конструктивного исполнения вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на технологические параметры токарной обработки крупногабаритных валов / Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 331-340.
[25] Гасюк, Д. П. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях / Д. П. Гасюк, В. А. Косова // Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 341-354.
[26] Арслан, Х. Методика оптимизации зажимных устройств на основе материалов с памятью формы / Х. Арслан, М. Т. Коротких // Современное машиностроение: наука и образование 2022: под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. - СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022, с. 385-396.
[27] Sukhanov, A. Sliding of the Car on Inclined Plane / Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, p. 48-58, ISBN 978-3-031-48850-4, doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1
[28] Стариков, А. Н. Механизмы, основанные на взаимодействия тел по плоскости // Теория механизмов и машин, СПбПУ Петра Великого, 2019. Т. 1. № 1. С. 27-39.

A.N. Starikov

SELF-BRAKING OF THE COLLET MECHANISM

Abstract

The work is devoted to determining the conditions for fixing metal-cutting tools. The analysis is conducted from the standpoint of the theory of self-inhibition of mechanisms. The sequential arrangement of a composite mechanism based on the simplest mechanisms, an inclined plane and a wedge mechanism is considered. Analytical dependences have been obtained to determine the tightening torque of the collet nut for fixing the tool with the required margin for self-braking in both rotation and axial displacement.

Key words: self-braking, inclined plane mechanism, wedge pair.

REFERENCES

[1] Ozoegwu, C. Automated Upgraded Generalized Full-Discretization Method: Application to the Stability Study of a Thin-Walled Milling Process / C. Ozoegwu, P. Eberhard // Mechanical Science, Springer, 2021, pp. 83-104, ISBN 978-981-15-5711-8

[2] Metal cutting: a technologist's handbook / A. A. Panov, V. V. Anikin, N. G. Boym et al.; under the general editorship of A. A. Panov. - M.: Mashinostroenie, 2004. -784 p.

[3] Kuvshinsky, V. V. Milling. Moscow, Mashgiz, 1958.

[4] Panyukhin, V. V. Investigation of self-braking mechanisms and development of design methods for highly efficient gear gears with braking profiles: diss. Thank you. learned. step. Candidate of Technical Sciences: spec.: 02/05/02 - Machine science and machine parts: 02/05/18 - Theory of mechanisms and machines / V. V. Panyukhin ; Vladimir State University (VlSU) – Vladimir, 1999, 375 p.

[5] Turpaev, A. I. Self-braking mechanisms. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 208 p.

[6] Weitz, V. L. Dynamics of machine units, Mechanical Engineering, Leningrad, 1969, 367 p.;

[7] Weitz, V. L. Dynamics of drives with closed kinematic circuits / V. L. Weitz, I. A. Gidaspov, G. V. Tsarev // Mordovian State University, 1991, 179 p.;

[8] Weitz, V. L. Dynamics of a controlled electro-mechanical drive with an asynchronous motor, Kiev, 88, 272 p.

[9] Weitz, V. L. Calculation of braking modes in self-braking gear drives. Bulletin of the Leningrad Polytechnic University, No. 6, 1958

[10] Levitsky, N. I. Theory of mechanisms and machines. Moscow: Nauka. 1979, 576 p.
[11] Kolchin, N. I. Mechanics of machines: In 2 volumes, ed. 3rd edition. L.: Mashinostroenie, 1971, vol. 2.-456 p.
[12] German Patent No. 1040864, MCI F 06 H. Zahnradgetriebe / A. Roano (Switzerland). - No. 15 777; announced 1.03.56; published 9.10.58; NKI 47 H 06 – 2 p.
[13] Machine parts / O. A. Ryakhovsky, A. V. Klypin – M.: Bustard, 2002, 282 p. – ISBN 5-7107-5232-0.
[14] Munster, N. S. Determination of the efficiency of gears // Proceedings of the Tashkent Polytechnic Institute. - 1968. - Issue 30. - pp. 82-104.
[15] Gukovsky, M. A. The mechanics of Leonardo da Vinci / M., L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1947, 816 p.
[16] Amontons, G. De la resistance cause dans les machines //Mem. L'Acad. Roy., 1699.-pp. 206-222
[17] Coulomb, C. A. Theorie des machines simples //Mem. Math, et Phys. L'Acad. Sci., 1785, vol. 10, pp. 161-331
[18] Andrienko, P. A. The use of graph theory elements for structural analysis of mechanisms / P. A. Andrienko, A. N. Evgrafov, D. P. Kozlikin et al. / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 43-58.
[19] Pobzhelko, V. I. Universal algorithm for the synthesis of structural schemes of complex single- and multi-movable lever mechanisms / P. A. Andrienko, A. N. Evgrafov, D. P. Kozlikin et al. / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 91-100.
[20] Sukhanov, A. A. Wedge model of sliding friction / Modern mechanical engineering: science and education 2023: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2023, pp. 134-146.
[21] Sukhanov, A. A. The effect of a tread on sliding friction / Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2024, pp. 164-176.
[22] Starikov, A. N. Improving the energy efficiency of construction equipment through the development of design methods for self-braking mechanisms / Lecture Notes in Civil Engineering, Proceedings of MPCPE 2024, Selected Papers // Springer – Switzerland, p 339-349
[23] Starikov, A. N. Mechanics of tire tread / A. N. Starikov // Mechanics and mechanical engineering. Science and Practice: Proceedings of the international scientific and practical conference. - Saint Petersburg: SIC MS, 2024. - No. 7. – p. 109 - DOI: 10.26160/2658-6185-2024-7.

[24] Vasiliev, A. A. The influence of the structural design of the GSO liner with an incomplete girth angle on the technological parameters of turning large-sized shafts / Modern mechanical engineering: science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 331-340.
[25] Gasyuk, D. P. The problem of choosing the optimal variant of the technological process of manufacturing machine-building products in modern conditions / D. P. Gasyuk, V. A. Kosova // Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 341-354.
[26] Arslan, H. Methodology for optimizing clamping devices based on shape memory materials / H. Arslan, M. T. Korotkov / Modern mechanical engineering: Science and education 2022: edited by A. N. Evgrafov, A. A. Popovich. St. Petersburg: POLYTECH PRESS, 2022, pp. 385-396.
[27] Sukhanov, A. A. Sliding of the Car on an Inclined Plane / Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, pp. 48-58, ISBN 978-3-031-48850-4, doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1
[28] Starikov, A. N. Mechanisms based on the interaction of bodies along the plane // Theory of Mechanisms and Machines, Peter the Great St. Petersburg State Pedagogical University, 2019. Vol. 1. No. 1. pp. 27-39.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 519.633
doi:10.18720/SPBPU/2/id-114

А.А. Суханов

МЕТОД ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ РАЗНОСТЕЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ СТАЛИ



Александр Алексеевич Суханов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7801, E-mail: Alexeevich2012@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены численные методы моделирования процессов науглероживания (цементации) стальных деталей машин и механизмов. Подобная цементация осуществляется посредством термообработки изделия в специальной печи, содержащей углеродосодержащий газ при температуре 900°- 1100° С. В результате чего углерод из атмосферы печи проникает в поверхностный слой металла, повышая его твердость и прочность. Моделирование процессов науглероживания необходимо для прогнозирования глубины проникновения углерода в изделие, являющейся основным параметром газовой цементации. Для проведения численного моделирования нестационарного процесса науглероживания предлагается оригинальный метод интерполяционных разностей, учитывающий возможную зависимость коэффициента диффузии углерода от химического состава стали и имеющий высокие точность и скорость вычислений.

Ключевые слова: сталь, науглероживание, диффузия углерода, теплопроводность, численные методы

Введение

Газовая цементация или науглероживание сталей представляет собой метод химико-термической обработки, широко используемый в современном машиностроении [1-4]. При такой обработке изделия из низкоуглеродистых сталей (шестерни, валы, болты и т.д.) подвергаются длительному нагреву при достаточно высоких температурах в печи с

богатым углеродом газом, таким как метан или монооксид углерода, который при разложении выделяет атомарный углерод, диффундирующий в решетку стали. Обогащенный углеродом поверхностный слой, именуемый чехлом, при последующей закалке превращается в мартенсит с высокой твердостью. Такая обработка изделий значительно повышает их износостойкость и усталостную прочность.

Промышленная газовая цементация является длительным (десятки часов) и весьма дорогостоящим процессом [3-4]. Поэтому очень важно уметь прогнозировать степень проникновения углерода в металл как во времени, так и по сечениям. Трудность непосредственного измерения концентрации углерода в толще металла обуславливает актуальность применения численных методов моделирования процессов науглероживания, заключающихся в решении соответствующего уравнения диффузии [5-7], представляющего собой дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа, вытекающее из второго закона Фика [8]

$$\frac{\partial C(\mathbf{r},t)}{\partial t} = \nabla\left[D\nabla C(\mathbf{r},t)\right], \qquad (1)$$

где C - концентрация углерода, измеряемая обычно в массовых процентах и зависящая от координат радиус-вектора точки изделия $\mathbf{r}$, c и времени t, c, D - скалярный коэффициент диффузии, зависящий в общем случае от температуры и химического наполнения стали углеродом и легирующими элементами, $м^2/c$, ∇ - векторный дифференциальный оператор набла, принимающий, к примеру, в трехмерном евклидовом пространстве вид

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}.$$

Граничными условиями уравнения (1) являются общие условия третьего рода, задающие закон массообмена между поверхностью тела и окружающей средой в виде связи искомой функции с её нормальной производной на границе (задача Робена [6])

$$\frac{\partial C}{\partial n}\Big|_S = \frac{\beta}{D}\left(C_p - C_s\right), \qquad (2)$$

где β - скорость науглероживания, $м/c$, C_s - текущая концентрация углерода на поверхности металла в данной точке, мас.%, C_p - углеродный потенциал, мас.%, характеризующий термодинамическое равновесие с газовой атмосферой и определяющий максимальную концентрацию углерода, способного внедриться в металл при бесконечном времени науглероживания, n - внешняя нормаль к поверхности изделия S.

В декартовой системе координат уравнение (1) при $D = D(C)$ и при $D = Const$ запишется соответственно в следующих видах

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

В цилиндрической системе координат, если концентрация зависит только от радиуса r и координаты вдоль оси z (для симметричного цилиндра), уравнение (1) при $D = D(C)$ и при $D = Const$ запишется в видах

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

В сферической системе координат для изоморфного шара уравнение (1) при $D = D(C)$ и при $D = Const$ запишется в видах

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 D\frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{2}{r}\frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right). \quad (5)$$

Граничные условия во всех координатных системах имеют один и тот же вид (2).

Отметим, что при нагреве металлических деталей машин и механизмов (как в естественных условиях эксплуатации, так и при термообработке) возникают не менее важные задачи теплопроводности: задачи определения распределения температуры в металле в зависимости от времени, имеющие такие же уравнения и граничные условия (1)-(5), что и в задачах диффузии. В этом случае вместо концентрации углерода C надо подставить температуру, вместо коэффициента диффузии D – коэффициент температуропроводности a, вместо отношения β / D в граничном условии (2) – относительный коэффициент теплообмена H:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad H = \frac{\alpha}{\lambda},$$

где λ - коэффициент теплопроводности, ρ - плотность материала, c - удельная теплоемкость, α - коэффициент теплообмена. А под C_p и C_s в (2) следует понимать температуру окружающей среды и температуру на поверхности тела.

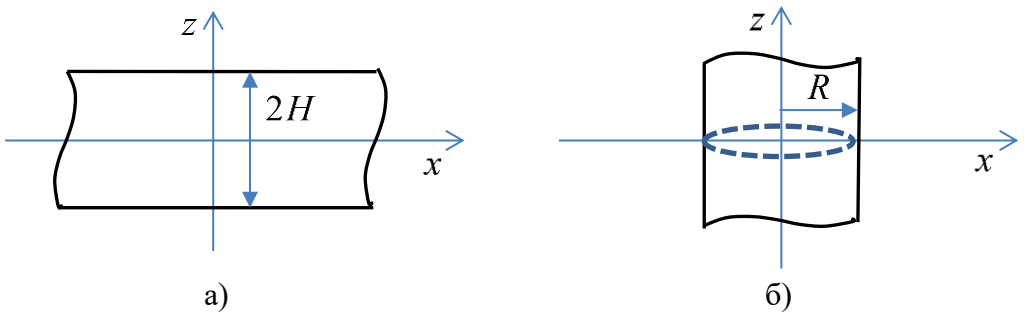
Таким образом, все методы исследования нестационарных процессов диффузии и полученные в данной работе результаты применимы и к соответствующим задачам теплообмена [9]. Соответственно, список литературы содержит источники по теории и методам решения как задач диффузии, так и теплопроводности.

Метод интерполяционных разностей для решения уравнений диффузии и теплопроводности

Аналитическое решение уравнения диффузии (1) с граничными условиями (2) возможно только при постоянных коэффициентах диффузии и скорости науглероживания. И исключительно для простейших правильных тел, имеющих формы пластины, цилиндра и шара. Для решения реальных задач диффузии со сложной конфигурацией науглероживаемого тела применяются численные методы, наиболее популярным из которых является неявный метод конечных разностей (МКР) [10-11]. Выбор в пользу неявной схемы обусловлен ее устойчивостью при больших шагах интегрирования [12], что являлось актуально в конце прошлого века, когда быстродействие вычислительных машин было невысоким и время счета представляло собой один из основных критериев выбора метода. В настоящее время в условиях значительного повышения быстродействия компьютеров и распараллеливания вычислительных процессов на многопроцессорных системах актуальность проблемы сместилась в сторону надежности получаемых результатов. В этой связи явные методы становятся предпочтительнее в силу их большей точности при малом шаге интегрирования. К тому же в неявных схемах требуется дополнительно решать большую систему линейных уравнений (обычно методом прогонки для увеличения скорости вычислений [13-14], вносящим дополнительные погрешности решения).

Существующие явные схемы МКР для решения уравнений в частных производных с граничными условиями третьего рода недостаточно эффективны из-за известных проблем согласования решения на границе и внутри тела [15-17]. Поэтому в настоящей работе предлагается оригинальный эффективный явный метод решения уравнений (1)-(2), основанный на МКР внутри тела и интерполяции решения на его границе. Отсюда и название: метод интерполяционных разностей (МИР).

Суть метода изложим на примере одномерной задачи с постоянными коэффициентом диффузии D и скоростью науглероживания β для неограниченной пластины толщиной $2H$ (рис. 1, а).



а) б)

Рис. 1. Бесконечные тела
а) неограниченная пластина, б) неограниченный цилиндр

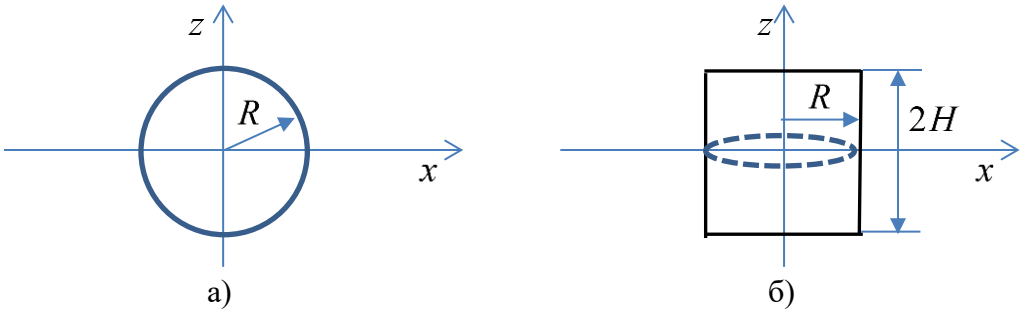


Рис. 2. Конечные тела
а) шар, б) ограниченный цилиндр

Уравнение диффузии (3) для такой пластины примет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \qquad (6)$$

Для численного решения (6), используя симметрию, разобьем интервал $[0, H]$ на n частей с шагом h точками $z_i = ih,\ i = 0,...,n$ (рис. 3).

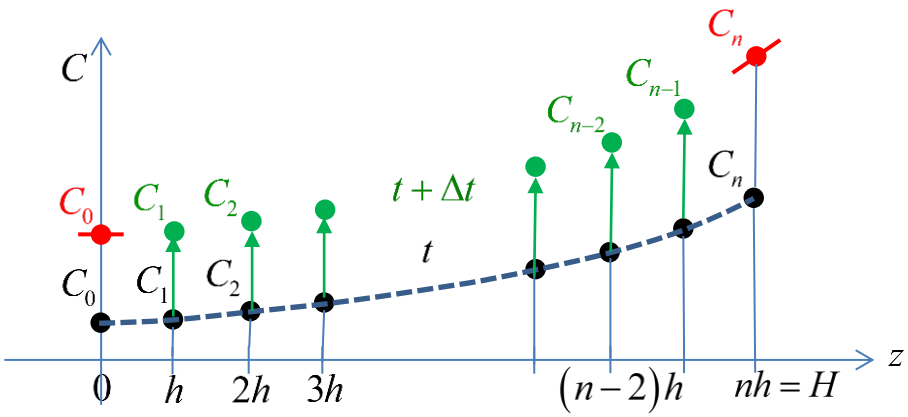


Рис. 3. Дискретизация уравнения диффузии

Пунктирной линией на рис. 3 изображен профиль распределения углерода $C(z)$ в некоторый момент времени t. Жирные черные точки соответствуют значениям концентрации углерода $C_i = C(ih)$ в этот момент времени.

Алгоритм МИР реализуется в три этапа.

Первый этап. В соответствии с МКР найдем приближенные значения вторых производных от C по координате z в (6) во внутренних узлах $ih, i = 1,...,n-1$ через трехточечные конечные разности второго порядка

$$C_i'' = \frac{C_{i-1} - 2C_i + C_{i+1}}{h^2},\quad i = 1,...,n-1. \qquad (7)$$

Второй этап. Далее решаем систему дифференциальных уравнений (6) в пределах одного шага по времени Δt для внутренних точек интервала $[0, H]$, используя явный метод Эйлера первого порядка [12, 18]

$$C_i(t+\Delta t) = C_i(t) + DC_i''(t)\,\Delta t, \quad i = 1,\ldots,n-1. \tag{8}$$

На рис. 3 соответствующие точки и значения обозначены зеленым цветом. Разумеется, вместо метода Эйлера можно использовать более точные методы интегрирования (см., например, [18, 19]). Однако, при численном решении дифференциальных уравнений в частных производных основная погрешность определяется разностными соотношениями относительно невысоко порядка (7) (подробнее об этом ниже) и поэтому при интегрировании нет смысла использовать более точные и сложные методы. Именно так поступают практически все авторы численных методов решения задач диффузии и теплопроводности [17, 20]. Более того, в явных схемах для обеспечения устойчивости метода шаг интегрирования Δt должен быть достаточно малым (см. ниже). Это гарантирует в свою очередь высокую точность вычислений, что подтверждается рассмотренными примерами конкретных расчетов.

Третий этап. Теперь осталось найти граничные значения концентраций углерода в точках $z = 0$ и $z = H$ в момент времени $t + \Delta t$. На этом сходство с МКР заканчивается. Дело в том, что большинство авторов [6, 7, 17] для универсальности определения граничных концентраций вынуждены смещать численную сетку на полшага и вводить внешние узлы, выступающие за рамки интервала $[0, H]$. Мы пойдем другим путем, не требующим подобных действий. Будем подбирать граничные значения концентраций $C_0(t+\Delta t)$ и $C_n(t+\Delta t)$ таким образом, чтобы параболические интерполяции по трем крайним узлам имели бы на границах заданные производные в соответствии с граничными условиями (2), которые в нашем случае принимают вид

$$\frac{\partial C}{\partial z}(0) = C_0' = 0, \qquad \frac{\partial C}{\partial z}(H) = C_n' = \frac{\beta}{D}\left(C_p - C_n\right). \tag{9}$$

Здесь на оси симметрии $z = 0$ производная равна нулю вследствие естественного условия плавности кривой $C(z)$. На рис. 3 значения этих производных условно изображены в виде красных черточек с соответствующими углами наклона. Приравнивая далее производные интерполяционных функций в граничных точках значениям (9), получаем линейные уравнения, из которых находим искомые концентрации в момент времени $t + \Delta t$

$$C_0 = \frac{4C_1 - C_2}{3}, \quad C_n = \frac{4C_{n-1} - C_{n-2} + \alpha C_p}{3 + \alpha}, \quad \alpha = 2\frac{\beta h}{D}, \tag{10}$$

где безразмерный параметр α в наших задачах (см. ниже) принимает значение

$$\alpha = 2\frac{\beta h}{D} = 2\frac{2.5 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-5}}{1.25 \cdot 10^{-11}} = 0.4.$$

На рис. 3 найденные граничные значения концентраций при $t + \Delta t$ обозначены красным цветом и красными точками.

Далее процесс повторяется до достижения заданного времени науглероживания. Для старта алгоритма необходимы начальные концентрации углерода при $t = 0$, которые известны и определяются марочным составом рассматриваемой стали.

Замечание 1. Интерполяцию кривой науглероживания вблизи границ можно проводить и по четырем, и по большему числу приграничных узлов. При этом точность расчетов немного повысится. Так, например, при четырехточечной интерполяции формулы для граничных концентраций примут вид

$$C_0 = \frac{18C_1 - 9C_2 + 2C_3}{11}, \quad C_n = \frac{18C_{n-1} - 9C_{n-2} + 2C_{n-3} + \alpha C_p}{11 + \alpha}, \quad \alpha = 6\frac{\beta h}{D}. \tag{11}$$

Точность такой интерполяционной схемы в наших задачах повысилась на 10-15 %. Сколько-нибудь заметного увеличения времени счета при этом не наблюдается, поскольку количество граничных узлов много меньше их общего числа. Поэтому, скорее всего, имеет смысл использовать более точную интерполяцию (11). Однако дальнейшее увеличение точности разностной интерполяции как во внутренних, так в граничных точках, не имеет особого смысла, т.к. симметричные (наиболее эффективные) интерполяции производных в приграничных точках ($z = h,\ z = H - h$) возможны только при трехточечной схеме интерполяции.

При использовании цилиндрической или сферической систем координат для расчета науглероживания образцов соответствующих форм необходимо иметь первые производные от концентрации углерода по координате вдоль радиуса (см. (4) и (5)). Они рассчитываются также по трехточечным конечным разностям и также только для внутренних узлов по формуле

$$C_i' = \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h}, \quad i = 1, \ldots, n-1. \tag{12}$$

Остановимся теперь подробнее на коэффициенте диффузии углерода (КДУ) D. При $D = Const$ и $\beta = Const$ уравнение диффузии (1) и граничные условия (2) являются линейными и могут быть решены аналитически для

тел простых форм, изображенных на рис. 1-2. Однако даже для таких тел при переменном КДУ $D(C)$ задача становится нелинейной и может быть решена только численно. В этом случае при раскрытии правой части уравнения (1) появятся производные от D по координатам (см. (3)-(5)). Они вычисляются аналогично производным от концентрации (12):

$$D_i' = \frac{D_{i+1} - D_{i-1}}{2h}, \quad i = 1,...,n-1. \tag{13}$$

Дополнительно в этом случае придется решать трансцендентные уравнения (10) или (11) для определения граничных значений концентрации углерода, т.к. параметр α в правой части уравнений зависит через коэффициент диффузии от концентрации C_n, что стоит в левой части уравнений. Для решения этих уравнений хорошо зарекомендовал себя метод простой итерации [14]. При трехточечной интерполяции он выглядит следующим образом

$$C_n^{k+1} = \frac{4C_{n-1} - C_{n-2} + \alpha^k C_p}{3 + \alpha^k}, \quad \alpha^k = 2\frac{\beta h}{D^k}, \quad D^k = D\left(C_n^k\right), \; C^0 = C_p. \tag{14}$$

Итерационный процесс (14) быстро сходится. За каждый шаг точность увеличивается примерно на один знак. При заданной отсечке относительной погрешности 10^{-15} (что немногим больше машинного эпсилона $2.22 \cdot 10^{-16}$) абсолютная сходимость достигалась примерно за 15 шагов. При этом заметного увеличения времени счета не наблюдалось вследствие, как уже отмечалось, малого количества граничных узлов по сравнению с их общим числом.

Замечание 2. В большинстве задач теплопроводности аналог КДУ коэффициент температуропроводности обычно слабо зависит от температуры. Это позволяет существенно упростить вычисления, используя метод замороженных коэффициентов [21], при котором на каждом временном слое данный коэффициент считается постоянным (замороженным). На следующем шаге по времени он обновляется в соответствии с новыми значениями основных переменных (обычно берется какое-либо среднее). При этом вычисления производных (13) и решение более сложных уравнений (14) не требуются.

В рассматриваемых задачах диффузии КДУ в заданном диапазоне концентраций углерода изменяется весьма существенно и также зависит от наличия легирующих элементов. На рис. 4 приведены такие зависимости для различных марок сталей [22]. Во всех случаях КДУ изменяется от минимального до максимального значения более чем в два раза, что исключает применение метода замороженных коэффициентов для наших задач диффузии, что было подтверждено при сравнительном анализе этих двух подходов. При этом предлагаемый алгоритм МИР успешно справился

с подобными переменными коэффициентами диффузии и двухступенчатым режимом науглероживания при изменении скорости науглероживания.

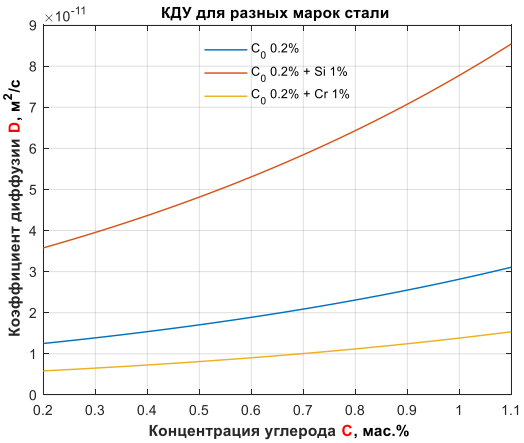


Рис. 4. КДУ в зависимости от концентрации углерода и марки стали

Мы подробно разобрали одномерную задачу диффузии. При моделировании процесса науглероживания объемных изделий необходимо решать многомерные задачи. При этом все соотношения алгоритма МИР сохраняют свою силу с той лишь разницей, что добавятся производные от концентрации и КДУ по другим координатам.

Замечание 3. При численном решении многомерных задач диффузии возникает известная проблема определения концентраций в угловых узлах сетки [20]. Эти концентрации могут в общем случае быть различными при их нахождении согласно формулам, ориентированным на разные оси. Другими словами, полученные градиенты концентраций в угловых точках могут отличаться от направления выбранной нормали, что противоречит физике. И приходится идти на те или иные компромиссы. Например, брать среднее между двумя градиентами, рассчитанными по ортогональным осям. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма МИР является инвариантность угловых концентраций по отношению к расчетным осям. Эта неочевидная опция алгоритма была замечена численно (совпадение всех 16-ти знаков мантиссы), а потом доказана аналитически, что свидетельствует о естественном сочетании алгоритма с физической природой процессов диффузии. Ограниченные объемы статьи не позволяют привести эти доказательства для всех возможных сочетаний граничных условий на внешней поверхности изделия и на оси симметрии.

Отметим еще одно важное и полезное свойство алгоритма МИР. При использовании цилиндрической или сферической систем координат приходится разбираться с неопределенностью типа $0/0$ при делении производной от концентрации на радиус в точке $r=0$ (см. (4) и (5)). И далеко не все методы с этим успешно справляются. Например, берутся достаточно малые отступления от оси [20]. Все это приводит к увеличению погрешности численного решения. Разработанный алгоритм свободен от

необходимости деления на ноль, т.к. все основные расчеты производятся для внутренних узлов дискретной модели. А при определении концентраций в граничных узлах подобных особенностей нет.

Критерий устойчивости метода интерполяционных разностей

Устойчивость дискретной системы (6)-(8) определяется величиной ведущего коэффициента перед C_i в правой части (8), который должен быть положительным и меньше единицы [18]

$$1-2\frac{D}{h^2}\Delta t>0 \quad или \quad \gamma=2\frac{D}{h^2}\Delta t<1. \tag{15}$$

Точно такой же критерий отмечается и в [6]. Проверим работу критерия (15) на примерах наших модельных задач (см. ниже) с параметрами

$$\beta=2.5\cdot10^{-7}\,м/с,\quad D=1.25\cdot10^{-11}\,м^2/с,\quad h=10^{-5}\,м,\quad \Delta t=1c. \tag{16}$$

Имеем в этом случае четырехкратный запас по устойчивости:

$$\gamma=2\frac{D}{h^2}\Delta t=2\frac{1.25\cdot10^{-11}}{10^{-10}}1=\frac{1}{4}<1,$$

необходимо при возможном изменении КДУ в реальных задачах.

Для более точной верификации критерия (15) проведем численные расчеты вблизи границы устойчивости, изменяя только шаг интегрирования Δt от $3.9\,c\,(\gamma=0.975)$ до $4.1\,c\,(\gamma=1.025)$. В первом случае алгоритм сходился, во втором - расходился, что подтверждает справедливость критерия (15).

Аналитические решения модельных задач

Основным критерием работоспособности и точности численных методов является сравнение получаемых результатов с аналитическими решениями. Для всех наших модельных задач при $D,\beta=Const$ таковые имеются [23]. Ниже представлены аналитические решения соответствующих задач теплопроводности, адаптированных под задачи диффузии и оптимизированных для уменьшения времени счета.

Бесконечная пластина толщиной $2H$ (рис. 1, а).

$$C(z,t)=C_p-(C_p-C_0)\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos\left(\mu_n\frac{z}{H}\right)\exp\left(-\mu_n^2F_o\right). \tag{17}$$

Здесь C_0 - начальная концентрация углерода в пластине при $t=0$, μ_n - корни характеристического уравнения

$$ctg\,\mu_n = \frac{\mu_n}{Bi},$$

где Bi - коэффициент (критерий) Био [23], равный для выбранной пластины

$$Bi = \frac{\beta}{D} H = \frac{2.5 \cdot 10^{-7}}{1.25 \cdot 10^{-11}} 5 \cdot 10^{-3} = 100,$$

F_o - число Фурье [23], играющее роль безразмерного времени и принимающее при 48-ми часовой экспозиции значение

$$F_o = \frac{D}{H^2} t = \frac{1.25 \cdot 10^{-11}}{5^2 10^{-6}} 48 \cdot 3600 = 0.0864.$$

Коэффициенты A_n находятся по формуле

$$A_n = 2 \frac{Bi}{\mu_n} \frac{\sin \mu_n}{Bi + \sin^2 \mu_n}.$$

Теоретическая оценка и численные расчеты показали, что в сумме (17) для абсолютной сходимости ряда вполне достаточно взять 20 членов. При этом для большей точности суммирование следует начинать с меньших слагаемых, т.е. с конца.

Бесконечный цилиндр радиусом R (рис. 1, б).

$$C(r,t) = C_p - (C_p - C_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 F_o\right). \qquad (18)$$

Здесь обобщенной координатой является текущий радиус r. J_0 - функция Бесселя первого рода нулевого порядка, μ_n - корни характеристического уравнения

$$\frac{\mu_n}{Bi} = \frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)},$$

где J_1 - функция Бесселя первого рода первого порядка. Критерий Bi тот же. Коэффициенты A_n находятся по формуле

$$A_n = \frac{2Bi}{J_0(\mu_n)\left(\mu_n^2 + Bi\right)}.$$

И здесь для абсолютной сходимости достаточно взять 20 членов ряда (18).

Шар радиусом R (рис. 2, а).

$$C(r,t) = C_p - (C_p - C_0)\sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{\mu_n \frac{r}{R}} \exp\left(-\mu_n^2 F_o\right), \qquad (19)$$

где μ_n - корни характеристического уравнения

$$tg\,\mu_n = -\frac{\mu_n}{Bi - 1}.$$

Коэффициенты A_n находятся по формуле

$$A_n = -\frac{Bi \cos\mu_n}{Bi - 1 + \cos^2\mu_n}.$$

И здесь для абсолютной сходимости достаточно взять 20 членов ряда (19).

Формула (19) в отличие от (17) и (18) содержит особенность вида 0/0 при $r = 0$. Однако она легко раскрывается, превращаясь в единицу.

Конечный цилиндр радиусом R и высотой (длиной) $2H$ (рис. 2, б).

В [23] доказывается очень полезная и неочевидная теорема о представлении решения для конечного цилиндра в виде своеобразной суперпозиции решений для бесконечных пластины и цилиндра, если уравнение диффузии/теплопередачи и граничные условия линейны, что имеет место при $D, \beta = Const$. Тогда относительная концентрация углерода в любой точке конечного цилиндра в любое время равна произведению относительных концентраций в бесконечных пластине и цилиндре, пересечением которых образован цилиндр конечных размеров:

$$\frac{C_p - C(r,z,t)}{C_p - C_0} = \frac{C_p - C(z,t)}{C_p - C_0} \cdot \frac{C_p - C(r,t)}{C_p - C_0}, \qquad (20)$$

где $C(z,t)$ и $C(r,t)$ - концентрации углерода с той же точке бесконечных пластины и цилиндра, что и в конечном цилиндре. При этом начальные и граничные условия для бесконечных пластины и цилиндра остаются такими же, как и для ограниченного цилиндра.

Справедливость теоремы (20) была успешно проверена двумя способами. Сравнением численного решения двумерной задачи для конечного цилиндра с аналитическим и с численными решениями двух одномерных задач с последующей их суперпозицией. Совпадения решений при параметрах (16) для цилиндра 10 х 10 мм составили 6-8 знаков.

Численные решения модельных задач диффузии и их верификация

Прежде чем решать задачи диффузии с переменным КДУ $D(C)$ (рис. 4), необходимо провести верификацию численного алгоритма и

соответствующего программного обеспечения сравнением численных и аналитических решений модельных задач при $D, \beta = Const$. Ниже приведены такие сравнения для четырех модельных задач (рис. 1-2) с одинаковой характерной длиной 10 мм, одинаковыми физическими свойствами и одинаковыми параметрами численного моделирования (16). Алгоритм МИР запрограммирован в пакете Matlab [24], удобном для вывода графической информации. Однако он основан на построчной интерпретации команд в отличие от компиляторов с языков программирования высокого уровня, которые переводят в машинный код и оптимизируют целые программные блоки. Поэтому указанное время счета следует делить на 10-20, чтобы получить оценку соответствующего времени работы алгоритма, написанного на языках C++, Паскаль и им подобным. Расчеты выполнялись на компьютере с частотой процессора 3.3 ГГц.

Для сокращения времени счета во всех задачах использовалось свойство симметрии, уменьшающее размерность сетки. После решения результаты отзеркаливались относительно осей симметрии.

Погрешности численных вычислений определялись по формуле

$$\Delta C(\mathbf{r},t) = C(\mathbf{r},t) - C_a(\mathbf{r},t),$$

где $C(\mathbf{r},t)$ - численное значение концентрации углерода в точке $\mathbf{r}$ в момент времени t, $C_a(\mathbf{r},t)$ - соответствующее аналитическое решение. Эти абсолютные погрешности на фоне примерно единичных концентраций близки к относительным. Максимальные их значения имеют порядок 10^{-6} и заметно уменьшаются с увеличением времени науглероживания и вблизи границ тела, что представляет наибольший интерес.

На всех рисунках вначале изображены наглядные цветные картинки распределения концентрации углерода в соответствующих сечениях с нанесением белых линий одного уровня концентрации от 0.4 до 0.9 мас.% в конце времени экспозиции 48 час. Далее для первых трех тел идут графики зависимости концентрации от координаты в моменты времени 12, 24, 36, 48 час и рядом погрешности в тех же точках по координатам и временам. Для конечного цилиндра приведены графики концентрации в различных сечениях от среднего до торцевого через 1 мм и рядом погрешности в тех же координатных точках в конечный момент времени 48 час.

Для всех задач указывается время счета. При этом на формирование и вывод графической информации уходило дополнительно 1.5 с.

На рис. 5-6 представлены результаты расчета для бесконечной пластины толщиной 10 мм. Время счета составило 0.5 с.

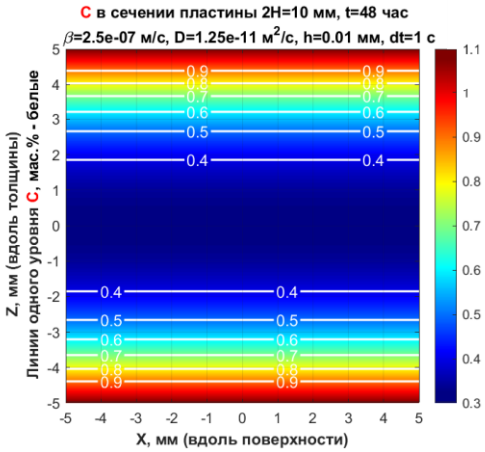


Рис. 5. Концентрации углерода в сечении бесконечной пластины

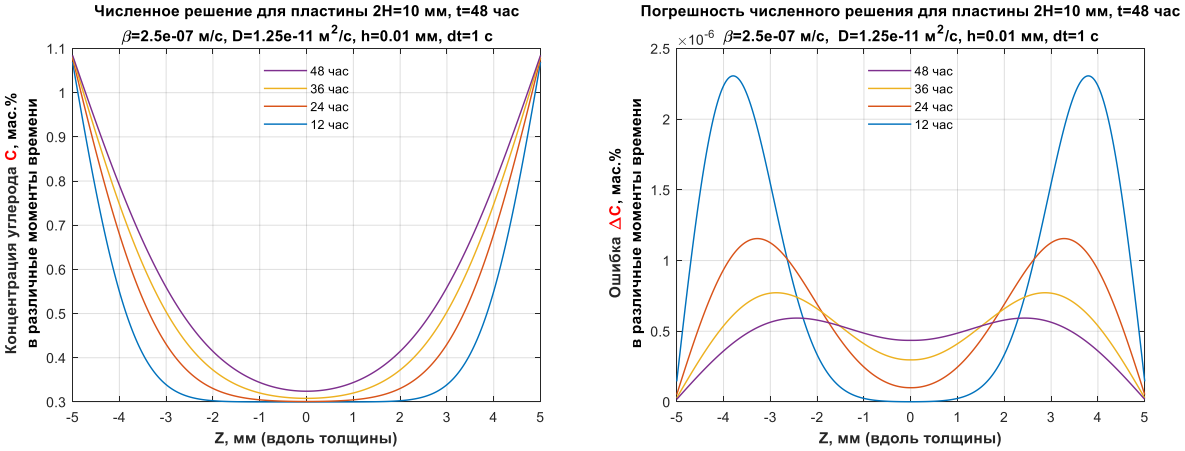


Рис. 6. Численное решение и его погрешность в различные моменты времени

На рис. 7-8 представлены результаты расчета для бесконечного цилиндра диаметром 10 мм. Время счета составило 0.7 с.

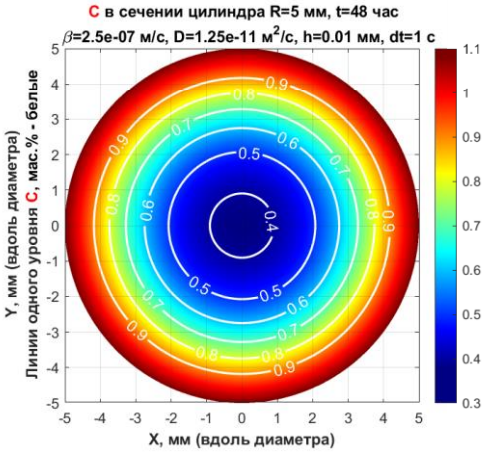


Рис. 7. Концентрация углерода в сечении бесконечного цилиндра

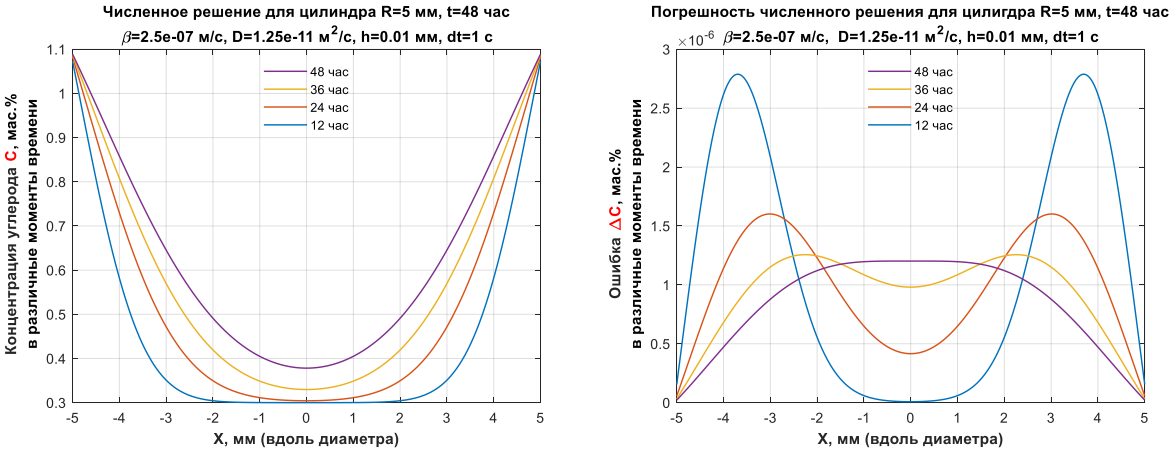


Рис. 8. Численное решение и его погрешность в различные моменты времени

На рис. 9-10 представлены результаты расчета для шара диаметром 10 мм. Время счета составило 0.7 с.

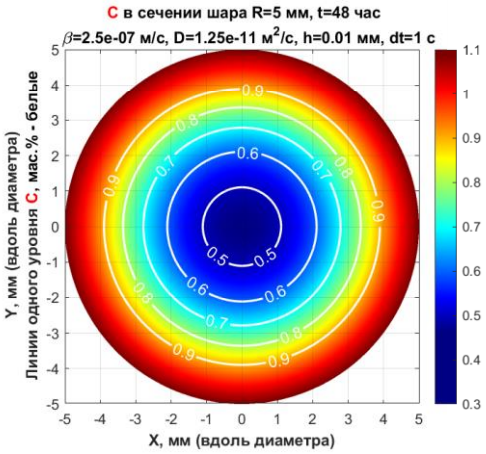


Рис. 9. Концентрация углерода в сечении шара

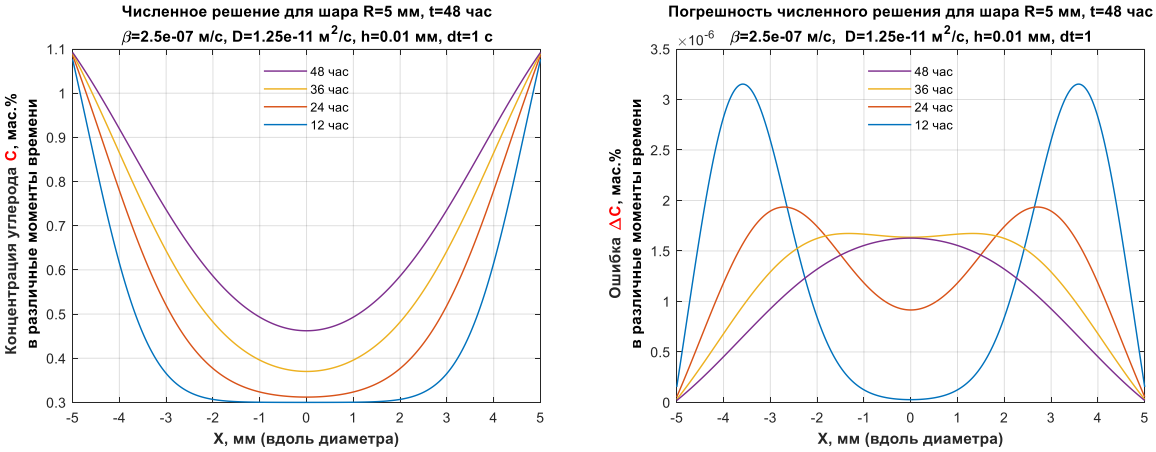


Рис. 10. Численное решение и его погрешность в различные моменты времени

На рис. 11-12 представлены результаты расчета для конечного цилиндра диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Время счета составило 560 с. Отметим, что время решения данной двумерной задачи с той же точностью через суперпозицию двух первых одномерных составило всего 2 с. Для

сравнения время счета такой же задачи на Паскале по классической неявной схеме МКР заняло 94 мин! При этом точность была 3-4 знака.

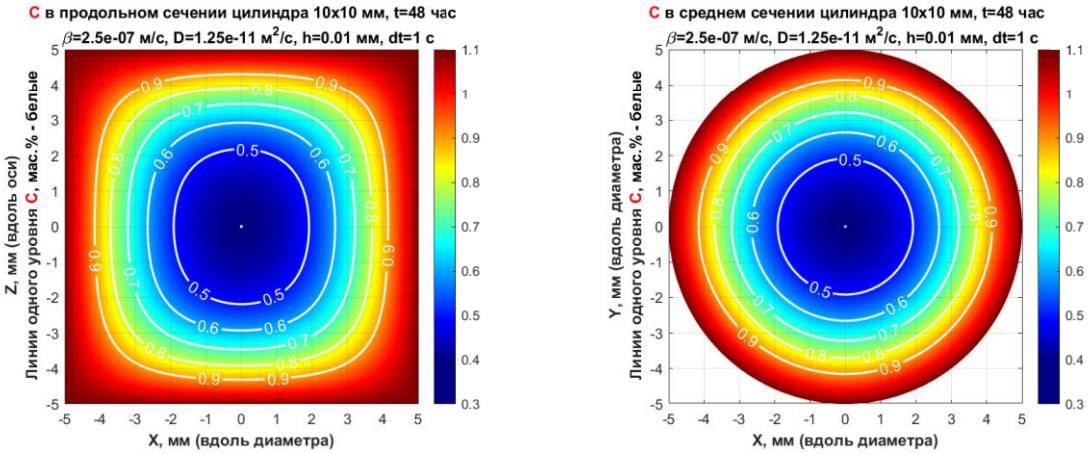


Рис. 11. Концентрации углерода в продольном и среднем сечениях цилиндра

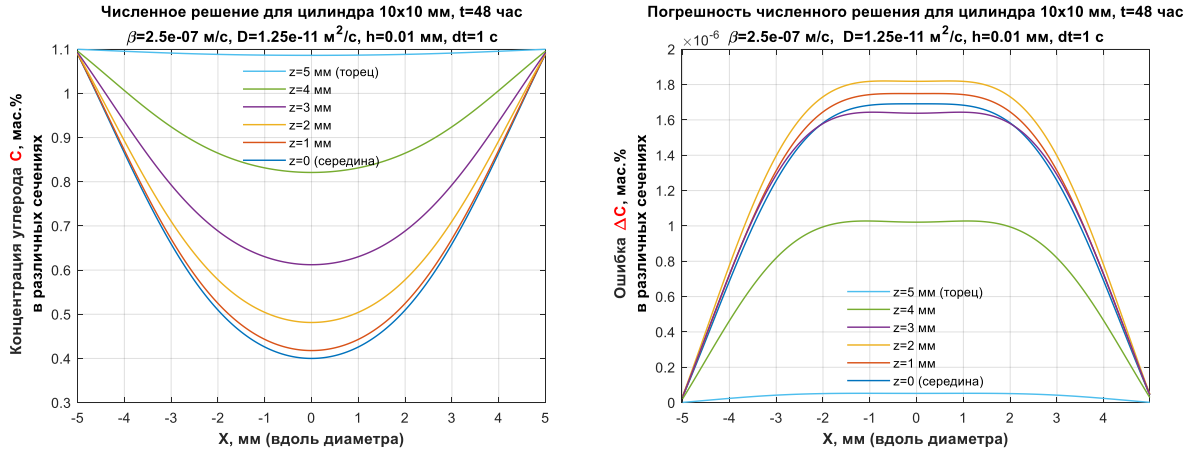


Рис. 12. Численное решение и его погрешность в различных сечениях цилиндра

Заключение

1. Разработанный метод интерполяционных разностей (МИР) для численного решения задач диффузии и теплопроводности зарекомендовал себя как надежный, быстродействующий и точный метод решения актуальных технических задач диффузии и теплопроводности в технологии машиностроения.

2. Хорошие совпадения численных расчетов с результатами натурных экспериментов, проведенных с конкретными образцами из сталей разного химического состава, показали работоспособность и эффективность алгоритма МИР и при переменных КДУ и скорости науглероживания.

3. Распределение концентрации углерода в сечении бесконечного цилиндра мало отличается от аналогичной концентрации в среднем сечении конечного цилиндра, если длина его больше диаметра. При этом концентрации вблизи торцов цилиндра близки к концентрациям вблизи поверхности бесконечной пластины с таким же характерным размером. Эти

обстоятельства позволяют с приемлемой точностью оценить диффузионные и температурные поля в объектах со сложной геометрией формы, опираясь на решение рассмотренных модельных задач, в том числе с переменными параметрами.

4. Полученные результаты позволяют обоснованно рекомендовать рассматриваемый алгоритм решения диффузионных задач при разработке компьютерных моделей прогнозирования и контроля формирования профилей распределения углерода в реальных условиях промышленной газовой цементации.

5. Автор выражает глубокую благодарность коллегам Васильеву А.А. и Талалову В.А. за полезные консультации и плодотворное обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Корецкий Я. Цементация стали. - Л.: Судпром, 1962. - 231 с.
[2] Цымбал В. П., Сеченов П. А., Рыбенко И. А. Новые металлургические технологии. - М.: Юрайт, 2025. - 261 с.
[3] Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Беликов С.В., Корниенко О.Ю. и др. Цементация, нитроцементация и азотирование стальных изделий: учеб. пособие. - Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2021. - 102 с.
[4] ASM Handbook, Volume 4D. Heat Treating of Irons and Steels, ASM International, 2014. - 943 p.
[5] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 488 с.
[6] Бекман И. Н. Математика диффузии: учеб. пособие. - М.: ОнтоПринт, 2016. - 400 с.
[7] CRANK J. The mathematics of diffusion. - Oxford: Clarendon press, 1975. - 414 p.
[8] Fick A., Ueber Diffusion, Pogg. Ann. Phys. Chem, 1855. - p. 59-86.
[9] Ткаченко Л.А., Репина А.В. Теория теплообмена. Учеб. пособие. - Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. - 151 с.
[10] Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. - Минск: Наука и техника, 1976. - 144 с.
[11] Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1989. - 616 с.
[12] Михлин С.Г., Смолицкий Х.Л. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. - М.: Наука, 1965. - 384 с.
[13] Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т.1. - М.: Наука, 1962. - 464 с.
[14] Бахвалов Н.С. Численные методы. - М.: Наука, 1973. - 632 с.

[15] Крукиер Л.А. Неявные разностные схемы и итерационный метод их решения для одного класса систем квазилинейных уравнений //Изв. вузов. Математика, 1979, № 7. - с. 41-52.
[16] Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Яненко Н. Н. Неявная разностная схема для численного решения пространственных уравнений газовой динамики //Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1980, Т.20, № 6. - с. 1465-1482.
[17] Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. - Томск: STT, 2016. - 92 с.
[18] Холл Дж, Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. - М.: Мир, 1979. - 312 с.
[19] Суханов А.А. Новые схемы интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта пятого порядка //Первая Международная научно-практическая конференция «Дифференциальные уравнения и их применения». - СПб, 1996. - с. 198-199.
[20] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 124 с.
[21] Князев А.В., Метод замороженных коэффициентов //Дифференц. уравнения, 1979, Т.15, № 3, с. 551-552.
[22] Васильев А.А., Голиков П.А. Модели для расчета коэффициента диффузии углерода в сталях и примеры их практического использования. - СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. - 186 с.
[23] Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
[24] Дьяконов В.П. Matlab. Полный самоучитель. - М.: ДМК Пресс, 2023. - 769 с.

A.A.Sukhanov

INTERPOLATION DIFFERENCE METHOD OF NUMERICAL MODELING OF STEEL CARBURIZING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers numerical methods of modeling the processes of carburizing of steel parts of machines and mechanisms. Such carburizing is carried out by means of heat treatment of the product in a special furnace containing carbon-containing gas at a temperature of 900°- 1100° C. As a result, carbon from the furnace atmosphere penetrates into the surface layer of the metal, increasing its hardness and strength. Modeling of carburizing processes is necessary to predict the depth of carbon penetration into the product, which is the main parameter of gas carburizing. For numerical modeling of non-stationary

carburizing process we propose an original method of interpolation differences, which takes into account the possible dependence of the carbon diffusion coefficient on the chemical composition of steel and has high accuracy and speed of calculations.

Key words: steel, carburizing, carbon diffusion, thermal conductivity, numerical methods.

REFERENCES

[1] Koretsky J. Cementation of steel. - Leningrad: Sudprom, 1962. - 231 p.
[2] Tsymbal V. P., Sechenov P. A., Rybenko I. A. New Metallurgical Technologies. - Moscow: Yurait, 2025. - 261 p.
[3] Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Belikov S.V., Kornienko O.Yu. et al. Cementation, nitrocementation and nitriding of steel products: textbook. - Ekaterinburg: Izd-vo of Ural University, 2021. – 102 p.
[4] ASM Handbook, Volume 4D. Heat Treating of Irons and Steels, ASM International, 2014. - 943 p.
[5] Karslow G., Yeager D. Thermal conductivity of solids. - Moscow: Nauka, 1964. – 488 p.
[6] Beckman I. N. Mathematics of diffusion: textbook. - Moscow: OntoPrint, 2016. – 400 p.
[7] CRANK J. The mathematics of diffusion. - Oxford: Clarendon press, 1975. - 414 p.
[8] Fick A., Ueber Diffusion, Pogg. Ann. Phys. Chem, 1855. - p. 59-86.
[9] Tkachenko L.A., Repina A.V. Theory of heat exchange. Textbook. -Kazan: Izd-vo of Kazan University, 2017. – 151p.
[10] Berkovskiy B.M., Nogotov E.F. Differential methods of investigation of heat transfer problems. - Minsk: Nauka i tekhnika, 1976. – 144 p.
[11] Samarskii A. A. Theory of difference schemes. - Moscow: Nauka, 1989. – 616 p.
[12] Mikhlin S.G., Smolitsky H.L. Approximate methods for solving differential and integral equations. - Moscow: Nauka, 1965. - 384 p.
[13] Berezin I.S., Zhidkov N.P. Methods of calculations. T.1. - Moscow: Nauka, 1962. - 464 p.
[14] Bakhvalov N.S. Numerical methods. - Moscow: Nauka, 1973. – 632 p.
[15] Krukier L.A. Implicit difference schemes and iterative method of their solution for one class of systems of quasilinear equations //Izvestia Vuzov. Mathematics, 1979, No. 7. - p. 41-52.
[16] Kovenya V.M., Tarnavskiy G.A., Yanenko N.N. Implicit difference scheme for numerical solution of spatial equations of gas dynamics //Zh. Comput. matem. and matem. phys., 1980, Vol. 20, No. 6. - p. 1465-1482.
[17] Krainov A.Yu., Minkov L.L. Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer: textbook. - Tomsk: STT, 2016. – 92 p.

[18] Hall G, Watt J.M. Modern numerical methods for ordinary differential equations. - Moscow: Mir, 1979. – 312 p.
[19] Sukhanov A.A. New schemes of integration of systems of ordinary differential equations by the Runge-Kutta method of the fifth order //First International Scientific and Practical Conference “Differential Equations and Their Applications”. – Saint-Petersburg, 1996. - p. 198-199.
[20] Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. - Moscow: Energoatomizdat, 1984. - 124 p.
[21] Knyazev A.V. The method of frozen coefficients //Differential Equations, 1979, Vol. 15, No. 3, p. 551-552.
[22] Vasiliev A.A., Golikov P.A. Models for calculation of carbon diffusion coefficient in steels and examples of their practical use. – Saint-Petersburg: POLYTEKH-PRESS, 2019. – 186 p.
[23] Lykov A.V. Theory of Heat Conduction. – M.: Vysshaya shkola, 1967. - 600 p.
[24] Dyakonov V.P. Matlab. Full self-tutorial. – M.: DMK Press, 2023. – 769 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ_ПРЕСС, 2025.

УДК 539.3:534.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id-115

Г.В. Филиппенко

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ УПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ С НЕОДНОРОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ. УЧЕТ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЧАСТОТ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МОД



Георгий Викторович Филиппенко, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Институт проблем машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)321-4763,
E-mail: g.filippenko@gmail.com, fgv@ipme.ru

Аннотация

Актуальными для современной экономики остаются проблемы при проектировании и эксплуатации различных трубопроводов, которые моделируются неоднородными цилиндрическими оболочками. Неоднородность упругих свойств может быть заложена как при проектировании, так возникнуть и в результате эксплуатации. В статье неоднородная оболочка моделируется тонкой упругой оболочкой, неоднородные свойства которой зависят только от радиальной переменной. Рассматриваются свободные гармонические колебания такой оболочки. На основе точного аналитического решения, исследуется влияние неоднородности на собственные частоты осесимметричных мод на примере двуслойной оболочки с неоднородностью плотности материала. Проанализировано разнонаправленное изменение частоты с ростом приведенной плотности внутреннего слоя для случая мод с номерами меньше двух и для мод с номерами больше единицы. Анализируются механизмы такого поведения частоты и применимость различных моделей усреднения параметров неоднородной оболочки для каждого из этих случаев.

Ключевые слова: водородное охрупчивание, неоднородные оболочки, многослойные оболочки, колебания оболочек,.

Введение

Цилиндрические оболочки — часто используемый элемент конструкций в технике и строительстве, моделирующий различные трубопроводы, опоры и пр. Упругие свойства таких оболочек можно варьировать, например, за счет придания им дополнительных ребер жесткости, гофрированной формы или меняя упругие свойства материала оболочки [1 – 5].

Неоднородность упругих свойств подобных оболочек вдоль радиальной координаты может быть заложена как изначально (например, многослойные оболочки), так и возникнуть в результате эксплуатации [6 – 15] (износ, коррозия, водородное охрупчивание и др.). Неправильный учет неоднородности при проектировании и эксплуатации может привести к преждевременному износу трубопроводов и авариям, например вследствие выхода на опасные режимы колебаний [16]. Далее, в статье, неоднородность предполагается кусочно-непрерывной функцией общего вида, что позволяет описывать оболочки, как с однородными, так и с неоднородными слоями.

Особый интерес представляют осесимметричные моды колебаний, на которые относительно слабо влияет окружающая среда. Изложенные в литературе асимптотические подходы для учета изменения механических свойств оболочки по её толщине [17, 18] достаточно сложны для получения простых оценочных формул. Поэтому в данной работе усредненные параметры классической оболочки с неоднородностью материала рассчитываются по формулам, приведенным в [19 – 20], но с введением поправок.

1. Модели усреднения неоднородной оболочки

Рассмотрим трубу как тонкую упругую круговую цилиндрическую оболочку. Введем цилиндрическую систему координат (r,φ,z), где ось z совпадает с осью цилиндра, и локальную систему координат $(\mathbf{t},\mathbf{k},\mathbf{n})$, где вектора $\mathbf{t},\mathbf{n}$ – касательный и нормальный единичные вектора к оболочке, а вектор $\mathbf{k}$ – единичный вектор вдоль оси z. Длина цилиндрической оболочки l, толщина h. Оболочка занимает область $R-h/2\le r\le R+h/2$, $0\le\varphi<2\pi$, $-l/2\le z\le l/2$. Зависимость всех процессов от времени предполагаем гармонической с частотой ω, а временной фактор $\mathrm{e}^{-i\omega t}$ условимся всюду опускать. В качестве переменных, описывающих осесимметричное вибрационное поле, выберем вектор смещений оболочки

$\mathbf{u}=\mathbf{u}(z)=(u_t,u_z,u_n)^T$. Введем срединную поверхность $r=R$ оболочки и будем отсчитывать от нее по наружной нормали переменную y.

Материал цилиндрической оболочки предполагаем неоднородным в направлении ее нормали, т.е. будут переменными величинами коэффициент Пуассона $\nu=\nu(y)$, объемная плотность $\rho=\rho(y)$ и модуль Юнга $E=E(y)$. При этом считаем, что параметры оболочки таковы, что если рассмотреть эту оболочку, как однородную с параметрами E, ν, ρ равными их среднеинтегральным значениям, то оболочка описывалась бы уравнением Кирхгофа-Лява [21]. Это уравнение можно записать, используя матричный дифференциальный оператор $\mathbf{L}$ размерности 3×3, выделив его зависимость от параметров оболочки, в виде

$$\mathbf{L}\left(C_{1,2},D_{1,2},R\right)\mathbf{u}+h\rho\omega^2\mathbf{u}=\mathbf{0},\qquad \begin{pmatrix}C_1\\C_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\nu\\1-\nu\end{pmatrix}\frac{Eh}{1-\nu^2},\quad \begin{pmatrix}D_1\\D_2\end{pmatrix}=\frac{h^2}{12}\begin{pmatrix}C_1\\C_2\end{pmatrix}. \tag{1}$$

При этом возможные граничные условия для однородной оболочки на её торце $z=z_0$ описываются уравнениями

$$\left(\mathbf{G}_n\left(C_{1,2},D_{1,2},R\right)\mathbf{u}\right)\Big|_{z=z_0}=\mathbf{0}. \tag{2}$$

Здесь каждому из четырех возможных типов граничных условий (жестким, свободным, шарнирно – опертым и скользящим) отвечает один из матричных дифференциальных операторов $\mathbf{G}_n$ (размерностью 4×3), где $n=1,2,3,4$, соответственно [21].

Для неоднородной оболочки введем величины:

$$\sigma(y)=\frac{E(y)}{1-\nu^2(y)},\qquad \begin{pmatrix}c_1(y)\\c_2(y)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\nu(y)\\1-\nu(y)\end{pmatrix}\sigma(y), \tag{3}$$

имеющие размерность напряжения. Разделим оболочку на n цилиндрических слоев толщиной $\Delta_j y$, $j=1,...,n$. И проведем процедуру усреднения по слоям, аналогично тому, как это было описано в [20]. При этом будет удобно перейти к новой переменной $\xi=y/h$ и к новым переменным $z=z/r_0$, $\mathbf{u}=\mathbf{u}/r_0$, сохраняя за последними прежние обозначения (здесь r_0 — эффективный радиус оболочки). В результате получим уравнение баланса сил и моментов неоднородной оболочки, где все переменные, операторы дифференцирования и параметры — безразмерны

$$\mathbf{L}\left(C^*_{1,2},\beta^2 D^*_{1,2}\left(\xi_0\right),r^*_{1,2}\right)\mathbf{u}+w^2\mathbf{u}=\mathbf{0}\,;\quad w^2=\frac{\omega^2 r_0^2\rho_*}{\sigma_*^2},\quad \rho_*=\int_{-1/2}^{1/2}\rho(\xi)d\xi\,;\quad \beta=\frac{h}{r_0}. \qquad (4)$$

Здесь

$$r^*_{1,2}=\frac{r_{1,2}}{r_0};\quad r_{0,1,2}\equiv R+y_{0,1,2}\,;\quad y_0=h\xi_0=\frac{\int_{-h/2}^{h/2}\sigma(y)\,y\,dy}{\int_{-h/2}^{h/2}\sigma(y)\,dy},\quad y_{1,2}=h\xi_{1,2}=\frac{\int_{-h/2}^{h/2}c_{1,2}(y)\,y\,dy}{\int_{-h/2}^{h/2}c_{1,2}(y)\,dy},$$

$$\begin{pmatrix}C^*_1\\C^*_2\end{pmatrix}=\frac{1}{C^\#_1+C^\#_2}\begin{pmatrix}C^\#_1\\C^\#_2\end{pmatrix};\qquad \begin{pmatrix}C^\#_1\\C^\#_2\end{pmatrix}=\int_{-1/2}^{1/2}\begin{pmatrix}c_1(\xi)\\c_2(\xi)\end{pmatrix}d\xi=\int_{-1/2}^{1/2}\begin{pmatrix}\nu(\xi)\\1-\nu(\xi)\end{pmatrix}\sigma(\xi)d\xi,$$

$$\begin{pmatrix}D^*_1(\xi_0)\\D^*_2(\xi_0)\end{pmatrix}=\frac{1}{C^\#_1+C^\#_2}\begin{pmatrix}D^\#_1(\xi_0)\\D^\#_2(\xi_0)\end{pmatrix};\qquad \begin{pmatrix}D^\#_1(\xi_0)\\D^\#_2(\xi_0)\end{pmatrix}=\int_{-1/2}^{1/2}\begin{pmatrix}c_1(\xi)\\c_2(\xi)\end{pmatrix}\left(\xi-\xi_0\right)^2 d\xi\,. \qquad (5)$$

При этом возможные граничные условия для неоднородной оболочки на её торце $z=z_0$ описываются уравнениями

$$\left(\mathbf{G}_n\left(C^*_{1,2},\beta^2 D^*_{1,2}\left(\xi_0\right),r^*_{1,2}\right)\mathbf{u}\right)\Big|_{z=z_0}=\mathbf{0}\,. \qquad (6)$$

Отметим, что параметр ξ_0 в (4), (5) — это координата усредненного центра упругих сил в слое.

Тем самым исходная краевая задача для неоднородной оболочки, заменена краевой задачей для оболочки Кирхгофа-Лява с усредненными параметрами. В дальнейшем будем называть это первым методом.

Недостатком рассмотренного метода является то, что зависимость плотности ρ от координаты ξ входит в уравнение (4) только как среднеинтегральная ρ_* и не учитывает вклада составляющей плотности $\rho(\xi)-\rho_*$. В [5] был рассмотрен метод, позволяющий учесть эту составляющую. Ниже будет рассмотрен метод усреднения учитывающий её по-другому. При нём среднеинтегральная плотность, как и прежде, участвует в балансе упругих и инерционных сил в слое $[-h/2,\,h/2]$ оболочки за счет слагаемого (инерционной силы) $w^2\mathbf{u}=\frac{\omega^2 r_0^2\rho_*}{\sigma_*^2}\mathbf{u}$ в уравнении (4). Но теперь вводится добавочное слагаемое, содержащее $\rho(\xi)$, которое рассмотрим далее.

Проведем два сечения слоя ($y\in[-h/2,\,h/2]$) оболочки плоскостями $z=const$ и $\varphi=const$. Найдем координату $\xi=\xi_\rho$ центра масс этих сечений

$$\xi_\rho = \frac{y_\rho}{h} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \rho(y)\, y\, dy}{\int_{-h/2}^{h/2} \rho(y)\, dy} = \frac{\int_{-1/2}^{1/2} \rho(\xi)\xi\, d\xi}{\int_{-1/2}^{1/2} \rho(\xi)\, d\xi} = \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\rho(\xi)}{\rho_*}\xi\, d\xi\,. \qquad (7)$$

Добавочное слагаемое сконструируем пропорциональным: присоединенной инерции сечения (образованной присоединенной плотностью $w^2\rho(\xi)$), плечу центра упругих сил ξ_0 относительно центра инерции сечения ξ_ρ, а также безразмерным параметрам Φ_t, Φ_z, Φ_n вид которых конкретизируем позже. В результате уравнение (4) приобретает вид

$$\mathbf{L}\left(C_{1,2}^*, \beta^2 D_{1,2}^*\left(\xi_0\right), r_{1,2}^*\right)\mathbf{u} + w^2\left[1 + \left(\xi_0 - \xi_\rho\right)\int_{-1/2}^{1/2} \frac{\rho(\xi)}{\rho_*}\left(\xi - \xi_\rho\right)^2 d\xi\right]\mathrm{diag}\{\Phi_t, \Phi_z, \Phi_n\}\mathbf{u} = \mathbf{0}\,. \quad (8)$$

В дальнейшем будем называть этот метод — “вторым методом”.

2. Модальный анализ

Рассмотрим свободные гармонические колебания описанной выше неоднородной оболочки с жёстко зажатыми торцами. Решение задачи ищется в виде:

$$\begin{pmatrix} u_t \\ u_z \\ u_n \end{pmatrix} = Ae^{i\lambda z}\begin{pmatrix} \zeta\sin(m\varphi) \\ \psi\cos(m\varphi) \\ \gamma\cos(m\varphi) \end{pmatrix};\quad 0 \le \varphi < 2\pi,\quad -l/2 < z < l/2,\quad m = 1, 2, \ldots. \qquad (9)$$

Здесь: A, ζ, ψ, γ — произвольные константы; λ — искомое волновое число, обезразмеренное на r_0. Метод решения аналогичен примененному в [20]. В результате, для каждого m находится набор безразмерных собственных частот (веток) w_j, $j = 1, 2, \ldots$ Размерные частоты f в Гц восстанавливаются по формуле

$$f_j = \omega_j / 2\pi = \frac{1}{2\pi}\frac{w_j}{r_0}\sqrt{\frac{\sigma_*}{\rho_*}}\,. \qquad (10)$$

Соответствующие формы колебаний (моды) будем обозначать парой чисел $\{m, j\}$.

3. Вычисления

Вычисления проведем для осесимметричных колебаний. В этом случае $\partial_\varphi \equiv 0$ и система уравнений (8) и граничных условий (6) редуцируются к системам 2×2 и 3×2 соответственно [16], а само решение ищется в виде

$$\begin{pmatrix} u_z \\ u_n \end{pmatrix} = Ae^{i\lambda z}\begin{pmatrix} \zeta \\ \gamma \end{pmatrix}; \quad 0 \le \varphi < 2\pi, \quad -l/2 < z < l/2 . \tag{11}$$

Будем считать константами коэффициент Пуассона ν и модуль Юнга E. Плотность ρ возьмем кусочно-постоянной (случай двуслойной оболочки)

$$\rho(\xi) = \begin{cases} \rho_1, & -1/2 \le \xi < 0 \\ \rho_2, & 0 \le \xi \le 1/2 \end{cases}; \qquad \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \rho_0 = const . \tag{12}$$

В этом случае уравнение (8) приобретает вид

$$\mathbf{L}\left(C_{1,2}, \left(\frac{h}{R}\right)^2 D_{1,2}, 1 \right)\mathbf{u} + w^2\left[1 - \xi_\rho \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\rho(\xi)}{\rho_*}\left(\xi - \xi_\rho\right)^2 d\xi \right] \mathrm{diag}\{\Phi_z, \Phi_n\}\mathbf{u} = \mathbf{0} . \tag{13}$$

Заметим, что параметры Φ_z, Φ_n, Φ_t, в (8) и (13) выступают в роли поправочных коэффициентов, которые позволяют уменьшить отклонения собственных частот: модели двуслойной оболочки, как трехмерного объекта от модели оболочки Кирхгофа-Лява с усредненными параметрами. Эти параметры могут быть уточнены путем сравнения с результатами счета на КЭ пакетах или натурными экспериментами подобно тому, как это было сделано в [5]. Однако, далее, зададим простейший вариант выбора этих параметров: $\Phi_z = 1$, $\Phi_n = 0$, что дает в случае осесимметричных мод качественное совпадение и удовлетворительное количественное совпадение с результатами расчетов на КЭ пакете ANSYS.

Для расчета представленных графических зависимостей в Фортране [22] взяты следующие безразмерные параметры оболочки: $\nu = 0.3$, $h/R = 0.05$, $l_0/R = 20$. Используются также размерные параметры оболочки: $R = 0.5$ м, $E = 2.1\cdot 10^{11}$ Н/м^2, $\rho_0 = 7850$ кг/м^3, $l_0 = 10$ м. Такие параметры оболочки близки к параметрам стальных труб магистральных газопроводов с диаметром 720 – 1420 мм.

На рисунках 1а, б изображены зависимости собственных частот f оболочки как функций относительной плотности внутреннего слоя $s = \rho_1/\rho_0$, вычисленные разными методами. При этом значению $s = 0$ отвечает предельный случай, когда вся масса сосредоточена во внешнем слое, а значению $s = 2$ отвечает предельный случай, когда вся масса

сосредоточена во внутреннем слое. Случай $s=1$ отвечает равномерному распределению массы. Для вычислений подбирались значения плотности слоев ρ_1 и ρ_2 так, чтобы средне-интегральное значение плотности $\rho_* = (\rho_1 + \rho_2)/2$ оставалось неизменным и равным ρ_0. Поэтому расчет частот по первому методу не выявляет такой “асимметрии” плотности слоев и дает горизонтальную линию *1*.

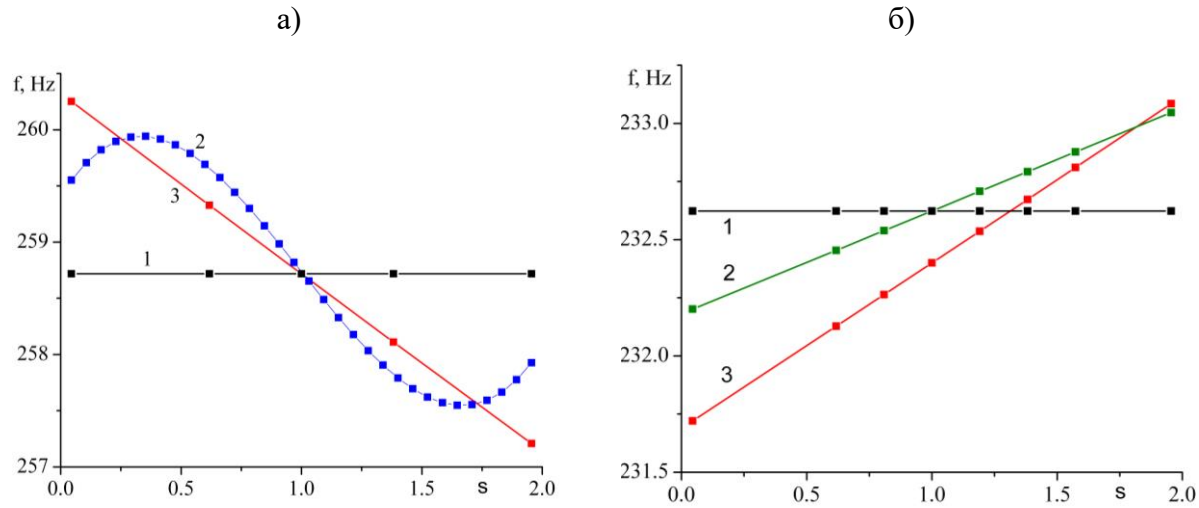


Рис. 1. Зависимость собственной частоты оболочки f от относительной плотности $s=\rho_1/\rho_0$: а) мода $\{0, 1\}$, б) мода $\{3, 5\}$.

В работе [20] было отмечено разнонаправленное изменение частоты для случая мод $m\le 1$ и для мод $m>1$, полученное с использованием КЭ пакета ANSYS (принятое в качестве эталона). Для первых отмечается уменьшение частоты с ростом приведенной плотности внутреннего слоя (кривая *2* на рис. 7б в [20]), а для вторых — увеличение частоты (кривая *1* на рис. 7б в [20]). Ниже, эти же кривые (теперь это кривые *3* на рис. 1а, б) наложены на кривые *2*, полученные с использованием различных методов усреднения.

Указанную разнонаправленность изменения частоты можно объяснить различными механизмами взаимодействия неоднородности присоединенной плотности с упругими силами в оболочке. Моды с номерами $m\le 1$ характеризуются сохранением формы поперечного сечения цилиндрической оболочки (кругового кольца). Для них основной механизм при увеличении приведенной плотности внутреннего слоя — это смещение центра инерции сечения слоя от $y=0$ к $y=-h/2$ (т.е. внутрь оболочки). Это ведет к вытеснению колебательного процесса к внешности оболочки, что эквивалентно увеличению эффективного радиуса и, соответственно, уменьшению собственных частот. Эту тенденцию показывают и вычисления по второму методу (кривая *2* на рис.1а). Отметим почти линейное поведение кривой *2* при относительно небольших значениях s,

когда момент инерции сечения мало отличается от момента инерции сечения относительно срединной поверхности оболочки. При приближении s к предельным значениям нелинейность, порожденная нелинейностью момента инерции сечения от параметра ξ_ρ в (13), нарастает.

В случае мод $m>1$, которые сопровождаются изменением формы поперечного сечения оболочки, преобладает другой механизм. Происходит относительное усреднение свойств этого сечения (кольца) за счет окружных полуволн. Поэтому возрастает роль того обстоятельства, что момент инерции кольца в целом уменьшается при смещении центра инерции сечения в сторону оси цилиндрической оболочки, что ведет к увеличению собственных частот. Это показывают и вычисления с использованием альтернативного метода усреднения в [5] (кривая *2* на рис. 1б), дающего уменьшение эффективного радиуса оболочки в этом случае.

Полученные обоими методами результаты (кривые *2* на рис. 1а, б) коррелируют с результатами счета на КЭ пакете ANSYS (кривые *3* на рис. 1а, б) (принятыми в качестве эталона).

Выводы

На примере двуслойной оболочки проведены расчеты частот свободных колебаний трубы с неоднородностью плотности материала по радиальной переменной. Проведенные сравнения моделей усреднения оболочки показали ограниченность применения первого метода, который учитывает только усредненное значение плотности оболочки. Показано, что второй метод, учитывающий изменение инерции слоя оболочки, позволяет учесть добавку к среднеинтегральной плотности оболочки. Для рассмотренных в статье осесимметричных мод этот метод показал уменьшение частоты с ростом приведенной плотности внутренней части оболочки.

Проанализировано разнонаправленное изменение частоты с ростом приведенной плотности внутреннего слоя для случая мод $m\le 1$ и для мод $m>1$. Модели усреднения, предложенные для каждого из этих случаев, качественно и количественно коррелируют с результатами, полученными КЭ пакетом ANSYS, принятыми в качестве эталона.

В совокупности с ранее полученными результатами [5, 16, 20], рассмотренные методы предоставляют новые возможности для исследования эффектов, вызванных неоднородностью оболочек. Например, возможность оценивать изменение частот оболочки, вследствие ее водородного охрупчивания. С другой стороны эти методы расширяют класс точно решаемых гранично – контактных задач с однородными цилиндрическими оболочками типа Кирхгофа-Лява на класс неоднородных оболочек, описанный в статье. А также они могут быть

полезны для КЭ пакетов, в качестве начального приближения для улучшения сходимости численных алгоритмов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Регистрационный номер госбюджетного задания: 124040800009-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Zinovieva, T.V. Calculation of equivalent stiffness of corrugated thin-walled tube. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019. pp. 211-220. Doi: 10.1007/978-3-030-11981-2

[2] Zinovieva, T.V., Smirnov, K.K., Belyaev, A.K. Stability of Corrugated Expansion Bellows: Shell and Rod Models. 2019. Acta Mechanica. 230. pp. 4125–4135. Doi: 10.1007/s00707-019-02497-6

[3] Zinovieva, T.V. Calculation of shells of revolution with arbitrary meridian oscillations. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. pp. 165–176. Doi: 10.1007/978-3-319-53363-6_17

[4] Eliseev, V.V., Zinovieva, T.V. Lagrangian mechanics of classical shells: theory and calculation of shells of revolution. 2018. Shell Structures: Theory and Applications. 4. pp. 73–76

[5] Филиппенко Г.В. Гармонические колебания цилиндрической упругой оболочки с неоднородной плотностью. Оболочечные моды. Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. С. 203 – 215. eLIBRARY ID: 54034032. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-96.

[6] Cheng, Y.F. (Ed.) Stress Corrosion Cracking of Pipelines. 2013. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, TX, Canada. p. 275.

[7] Titov, A.I., Lun-Fu, A.V., Gayvaronskiy, A.V., Bubenchikov, M.A., Bubenchikov, A.M., Lider, A.M., Syrtanov, M.S., Kudiiarov, V.N. Hydrogen Accumulation and Distribution in Pipeline Steel in Intensified Corrosion Conditions. 2019. Materials. 12(9): 1409. Doi:10.3390/ma12091409.

[8] Mytsyk, B.G., Ivanytskyi, Ya.L., Balitskii, A.I., Kost', Ya.P., Sakharuk, O.M. Study of hydrogen influence on 1020 steel by low deformation method. 2016. Materials Letters. 184. pp. 328–331. Doi: 10.1016/j.matlet.2016.08.065.

[9] Zhukov, V.A. Stress corrosion cracking and electrochemical potential of titanium alloys. 2015. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 137–141. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-29579-4_17

[10] Polyanskiy, V.A., Belyaev, A.K. (eds). Advances in Hydrogen Embrittlement Study. 2021. Advanced Structured Materials. Springer. Cham. XII. p. 213. Doi: 10.1007/978-3-030-66948-5.

[11] Yagodzinskyy, Y., Saukkonen ,T., Andronova, E., Rissanen, L., Hanninen, H. Hydrogen-Induced Cracking of Metastable Austenitic Stainless and High-Strength Carbon Steels. 2009. Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference, Edited by Brian Somerday, Petros Sofronis, Russell H. Jones. ASM International, Materials Park. pp. 123–130.
[12] Lawrence, S. K., Somerday, B. P., Ingraham, M. D., Bahr, D. F. Probing the Effect of Hydrogen on Elastic Properties and Plastic Deformation in Nickel Using Nanoindentation and Ultrasonic Methods. 2018. JOM. 70(7). pp. 1068–1073. Doi:10.1007/s11837-018-2850-z.
[13] Müller, C., Zamanzade, M., Motz, C. The Impact of Hydrogen on Mechanical Properties; A New In Situ Nanoindentation Testing Method. 2019. Micromachines. 10(2). p. 114. https://doi.org/10.3390/mi10020114.
[14] Чулкин С.Г., Зиновьева Т.В. Расчет влияния водорода на прочность морского трубопровода. 2019. Морские интеллектуальные технологии. 2 (44) Т.1. С. 31–35. Doi: 10.13140/RG.2.2.22027.34088.
[15] Зиновьева Т.В. Влияние концентрации водорода на растрескивание трубы. 2020. Современное машиностроение: Наука и образование. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С. 196–206. Doi: 10.1872/MMF-2020-15.
[16] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Axisymmetric Vibrations of the Cylindrical Shell Loaded with Pointed Masses. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 80–91. Doi: 10.1007/978-3-030-62062-2_9.
[17] Вильде М.В., Коссович Л.Ю., Шевцова Ю.В. Асимптотическое интегрирование динамических уравнений теории упругости для случая многослойной тонкой оболочки. 2012. Известия Саратовского Университета (N. S.). Серия Мат. Мех. Инф. 12(2). С. 56–64. Doi: 10.18500/1816-9791-2012-12-2-56-64.
[18] Kaplunov, J.D., Kossovich, I.Yu, Nolde, E.V. Dynamics of thin walled elastic bodies. 1988. San Diego. Academic Press. 226 p.
[19] Кармишин А.В., Лясковец В.А., Мяченков В.И., Фролов А.Н. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. 1975. М.: Машиностроение. 376 с.
[20] Филиппенко Г.В., Зиновьева Т.В. Модальный анализ трубы, поврежденной водородом, как неоднородной по толщине оболочки. 2022. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 3. С. 170–182. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.17
[21] Елисеев В.В. Механика упругих тел. 2003. СПб. Изд-во СПбГПУ. 336 с.
[22] Chapra, S.C., Canale, R.P. Numerical Methods for Engineers. 2015. 970 p.

G. V. Filippenko

HARMONIC VIBRATIONS OF A CYLINDRICAL ELASTIC SHELL WITH INHOMOGENEOUS DENSITY. INERTIA OF THE SHELL CROSS-SECTION IS TAKEN INTO ACCOUNT WHEN CALCULATING THE FREQUENCIES OF AXISYMMETRIC MODES

Institute for Problems in Mechanical Engineering (IPME RAS)
of the Russian Academy of Science, St.-Petersburg, Russia

Abstract

Problems in the design and operation of various pipelines modelled by inhomogeneous cylindrical shells remain relevant for modern economics. Inhomogeneity of elastic properties can be incorporated both in the design and arise as a result of operation. In this paper, the inhomogeneous shell is modelled by a thin elastic shell whose inhomogeneous properties depend only on the radial variable. Free harmonic vibrations of the shell are considered. On the basis of an exact analytical solution, the influence of inhomogeneity on the natural frequencies of axisymmetric modes is investigated on the example of a bilayer shell with inhomogeneous material density. The multidirectional change of frequency with the growth of the reduced density of the inner layer is analysed for the case of modes with numbers less than two and for modes with numbers greater than one. The mechanisms of such frequency behaviour and the applicability of different models of averaging of inhomogeneous shell parameters for each of these cases are analysed.

Key words: hydrogen corrosion, non-homogeneous shells, multilayer shell, shell vibrations.

REFERENCES

[1] Zinovieva, T.V. Calculation of equivalent stiffness of corrugated thin-walled tube. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019. pp. 211-220. Doi: 10.1007/978-3-030-11981-2

[2] Zinovieva, T.V., Smirnov, K.K., Belyaev, A.K. Stability of Corrugated Expansion Bellows: Shell and Rod Models. 2019. Acta Mechanica. 230. pp. 4125–4135. Doi: 10.1007/s00707-019-02497-6

[3] Zinovieva, T.V. Calculation of shells of revolution with arbitrary meridian oscillations. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. pp. 165–176. Doi: 10.1007/978-3-319-53363-6_17

[4] Eliseev, V.V., Zinovieva, T.V. Lagrangian mechanics of classical shells: theory and calculation of shells of revolution. 2018. Shell Structures: Theory and Applications. 4. pp. 73–76

[5] Filippenko, G.V. Harmonic vibrations of a cylindrical elastic shell with inhomogeneous density. Shell modes. Modern mechanical engineering. Science and education. 2024. pp. 203 – 215. eLIBRARY ID: 54034032. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-96.
[6] Cheng, Y.F. (Ed.) Stress Corrosion Cracking of Pipelines. 2013. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, TX, Canada. p. 275
[7] Titov, A.I., Lun-Fu, A.V., Gayvaronskiy, A.V., Bubenchikov, M.A., Bubenchikov, A.M., Lider, A.M., Syrtanov, M.S., Kudiiarov, V.N. Hydrogen Accumulation and Distribution in Pipeline Steel in Intensified Corrosion Conditions. 2019. Materials, 12(9): 1409. Doi:10.3390/ma12091409.
[8] Mytsyk, B.G., Ivanytskyi, Ya.L., Balitskii,A.I., Kost', Ya.P., Sakharuk, O.M. Study of hydrogen influence on 1020 steel by low deformation method. 2016. Materials Letters, Volume 184. pp. 328-331. Doi: 10.1016/j.matlet.2016.08.065.
[9] Zhukov, V.A. Stress corrosion cracking and electrochemical potential of titanium alloys. 2015. Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 137-141.
[10] Polyanskiy, V.A., Belyaev, A.K. (eds). Advances in Hydrogen Embrittlement Study. Advanced Structured Materials. 2021. Springer, Cham. XII, p. 213. Doi: 10.1007/978-3-030-66948-5.
[11] Yagodzinskyy, Y., Saukkonen, T., Andronova, E., Rissanen, L., Hanninen, H. Hydrogen-Induced Cracking of Metastable Austenitic Stainless and High-Strength Carbon Steels. Effects of Hydrogen on Materials: Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference, Edited by Brian Somerday, Petros Sofronis, Russell H. Jones. 2009. ASM International, Materials Park, pp. 123-130.
[12] Lawrence, S. K., Somerday, B. P., Ingraham, M. D., Bahr, D. F. Probing the Effect of Hydrogen on Elastic Properties and Plastic Deformation in Nickel Using Nanoindentation and Ultrasonic Methods. 2018. JOM, 70(7). pp. 1068-1073. Doi:10.1007/s11837-018-2850-z.
[13] Müller, C., Zamanzade, M., Motz, C. The Impact of Hydrogen on Mechanical Properties; A New In Situ Nanoindentation Testing Method. 2019. Micromachines, 10(2). p. 114. https://doi.org/10.3390/mi10020114.
[14] Chulkin, S.G., Zinovieva, T.V. Calculation of hydrogen influence on strength of marine pipeline. 2019. Marine Intellectual technologies. 2(44), V.1. pp. 31-35. (rus.)
[15] Zinovieva, T.V. Influence of hydrogen concentration on pipe cracking. 2020. Modern mechanical engineering: Science and education. p. 196-206. Doi: 10.1872/MMF-2020-15. (rus.)
[16] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Axisymmetric Vibrations of the Cylindrical Shell Loaded with Pointed Masses. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 80–91. Doi: 10.1007/978-3-030-62062-2_9.

[17] Wilde, M.V., Kossovich, L.Y., Shevzova, Y.V. Asymptotic integration of dynamic elasticity theory equations in the case of multilayered thin shell. 2012. Izv. Saratov Univ. (N. S.). Ser. Math. Mech. Inform. 12(2). pp. 56–64. Doi: https://doi.org/10.18500/1816-9791-2012-12-2-56-64. (rus.)
[18] Kaplunov, J.D., Kossovich, I.Yu, Nolde, E.V. Dynamics of thin walled elastic bodies. 1988. San Diego: Academic Press. 226 p.
[19] Karmishin, A.V., Lyaskovec, V.A., Myachenkov, V.I., Frolov, A.N. Statics and dynamics of thin-walled shell structures. 1975. M.: Mashinostroenie. 376 c. (rus.)
[20] Filippenko, G.V., Zinovieva, T.V. Modal analysis of a hydrogen-damaged pipe as shell inhomogeneous on thickness. 2022. PNRPU Mechanics Bulletin. 3. pp. 170-182. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.17.
[21] Eliseev, V.V. Mechanics of Deformable Solids. 2003. St. Petersburg, Polytechnic University Press. 336 p. (rus.)
[22] Chapra, S.C., Canale, R.P. Numerical Methods for Engineers. 2015. 970 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 531.8, 621.01,
doi:10.18720/SPBPU/2/id-116

А.А. Хрестина[1], Е.М. Исполов[2], П.А. Ларюшкин[3]

ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ О ПОЛОЖЕНИЯХ ПАРАЛЛЛЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ *n*-PRR



[1]Арина Артуровна Хрестина,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
Россия, Москва
Тел.: +7 (495) 628-8730, E-mail: gaynetdinova.arina@gmail.com .



[2]Егор Михайлович Исполов,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
Россия, Москва
Тел.: +7 (495) 628-8730, E-mail: ispolov1989@mail.ru.



[3]Павел Андреевич Ларюшкин,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: +7 (499) 263-6337, E-mail: pav.and.lar@bmstu.ru .

Аннотация

В работе рассматривается обобщенная модель решения обратной задачи о положениях механизмов параллельной структуры, имеющих в составе кинематическую цепь, состоящую из каретки (ползуна) и двух вращательных шарниров с параллельными осями. В качестве результатов представлены общие алгоритмы и формулы, служащие для определения перемещения каретки при произвольном расположении направляющих цепи.

Ключевые слова: кинематическая цепь, плоский механизм, пространственный механизм, механизм параллельной структуры, обратная задача о положениях

Введение

Современный мир невозможно представить без роботизированных механизмов, реализующих сложные траектории движения рабочего органа. От роботов, предназначенных для микрохирургических операций до манипуляционных механизмов автоматической сортировки мусора [6] – все эти устройства упрощают жизнь современного человека [12]. С точки зрения кинематики, механизмы манипуляторов можно разделить на два класса – последовательные и параллельные. Каждый из классов имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Так, последовательные механизмы лучше подходят для задач, требующих гибкости при планировании и реализации траектории сложного движения выходного звена [6], тогда как параллельные механизмы обеспечивают высокую точность и устойчивость при работе с большими нагрузками [8-9]. При этом параллельные механизмы, обладающие более сложной кинематической структурой, все чаще находят применения в машиностроении, медицине [3], робототехнике и других областях [4], в которых к манипуляторам предъявляются высокие требования к скорости, точности и грузоподъёмности.

По типу движений выходного звена параллельные механизмы можно разделить плоские и пространственные. Плоские параллельные механизмы работают в двухмерном пространстве [1], а именно обеспечивают движение рабочего органа в заданной плоскости с тремя степенями свободы: двумя поступательными и одной вращательной. Пространственные параллельные механизмы работают в трёхмерном пространстве и могут реализовывать более сложные движения выходного звена [13-14]. При этом, однако, возможно также использовать плоские кинематические цепи и даже полноценные механизмы для реализации движения рабочего органа в пространстве. Так, например, в механизме MedRUE (Рис. 1), предназначенном для проведения автоматизированных ультразвуковых исследований пациентов, два плоских пятизвенных механизма установлены на общей линейной направляющей и соединены между собой телескопическим звеном посредством шарниров Гука [15]. При этом ось направляющей перпендикулярна плоскостям плоских механизмов. Каждый пятизвенный механизм имеет по два собственных независимых вращательных привода, установленных в крайних шарнирах кинематического контура механизма. Кроме того, перемещение по линейной направляющей каждого механизма осуществляется независимо. За счет возможности изменения расстояния между плоскостями пятизвенных механизмов, а также благодаря конструкции телескопического звена, также имеющего отдельный привод для вращения вокруг

собственной оси, рабочий орган робота MedRUE обладает шестью степенями свободы.



Рис. 1. Робот для медицинских исследований MedRUE

В подобных «составных» механизмах выходное звено перемещается в пространстве, однако всегда можно выделить условное (промежуточное) выходное звено плоского механизма либо отдельной плоской кинематической цепи.

В данной статье мы предложим и рассмотрим подход к решению обратной задачи о положениях для плоских кинематических цепей со структурой PRR, где P обозначает призматическую кинематическую пару, R – вращательную кинематическую пару, а подчеркивание указывает на то, что пара является активной (приводной). Подобная цепь может являться как частью пространственного механизма параллельной структуры, так и плоского [10]. В частности, для сферического механизма, представленного в работе [5], может быть проведена замена плоской диады RPR на диаду PRR, что при внесении определенных конструктивных изменений может изменить конфигурацию особых положений механизма. Также цепь PRR является частью кинематически избыточного четырехподвижного плоского механизма с интегрированным схватом [11].

Основным достоинством предлагаемой математической модели обобщенного плоского механизма параллельной структуры с кинематическими цепями PRR является возможность выбора системы координат любым удобным образом. Кроме того, получаемые уравнения связи в виде квадрантных уравнений относительно приводной координаты цепи более удобны при дальнейшем исследовании скоростей и ускорений механизма, нежели альтернативный вариант, использующий функцию арккосинуса.

Алгоритм решения обратной задачи о положениях

Для решения обратной задачи о положениях рассмотрим некоторый обобщенный плоский механизм *n*-PRR в общем виде, который состоит из *n* кинематических цепей одинаковой структуры (Рис. 2) [7].

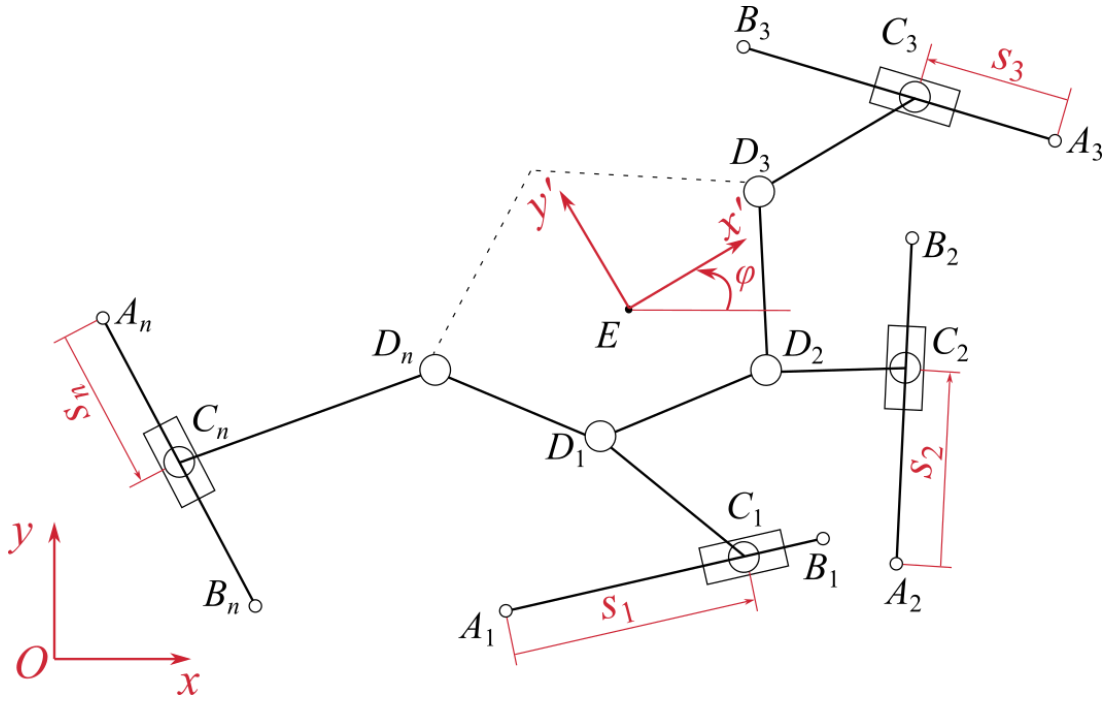


Рис. 2. Обобщенный плоский механизм *n*-PRR

В каждой цепи имеется направляющая *AB*, по которой движется каретка, на которой расположен вращательный шарнир *C*. Данный шарнир посредством штанги *CD* соединен с аналогичным вращательным шарниром *D*, расположенном на выходном звене. Положение выходного звена (точка *E*) в неподвижной плоской системе координат *Oxy* определяется координатами x_E, y_E и углом поворота φ [2]. Положение каретки на направляющей *AB* задается ее перемещением *s*, представляющим собой расстояние от точки *A* до точки *C*.

Для каждой кинематической цепи геометрическими параметрами, которые считаются заданными и не изменяют своих значений в процессе работы механизма, являются:

– координаты точек *A* и *B* направляющей в системе *Oxy*: x_A, y_A, x_B, y_B;

– координаты точки *D* в системе *Ex'y'*: x'_D, y'_D;

– длина звена *CD*: l_{CD}.

При решении обратной задачи о положениях необходимо для заданных значений x_E, y_E и φ для каждой кинематической цепи вычислить значение перемещения *s*. Легко видеть, что в общем случае количество решений обратной задачи о положениях для одной цепи равно двум.

Для дальнейших вычислений будем рассматривать одну кинематическую цепь.

Сначала определим координаты точки D в системе Oxy, учитывая положение точки E и поворот выходного звена на угол φ:

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} + \mathbf{R}_\varphi \begin{bmatrix} x'_D \\ y'_D \end{bmatrix}.$$

Матрица поворота R_φ для правой системы координат имеет следующий вид:

$$\mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}.$$

Тогда координаты точки D можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_D &= x_E + x'_D \cos\varphi - y'_D \sin\varphi, \\ y_D &= y_E + x'_D \sin\varphi + y'_D \cos\varphi. \end{aligned} \qquad (1)$$

Следующим шагом рассмотрим геометрию цепи в предположении, что решение обратной задачи о положениях в действительных числах существует (Рис.3).

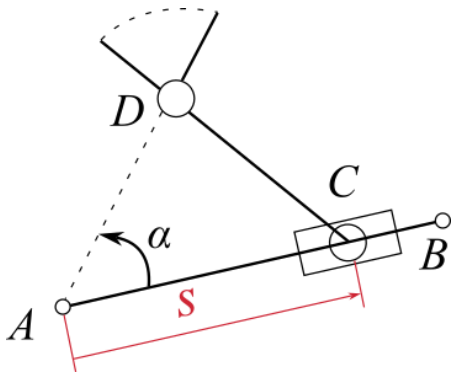


Рис. 3. Одна кинематическая цепь PRR

Для треугольника ACD справедлива теорема косинусов, которая с учетом того, что длина стороны AC равна s, может быть записана следующим образом:

$$l_{CD}^2 = s^2 + l_{AD}^2 - 2sl_{AD}\cos\alpha, \qquad (2)$$

где l_{AD} – расстояние между точками A и D, α – угол между отрезком AD и направляющей AB.

Поскольку координаты точек A, B и D известны, угол α может быть легко вычислен, а значит в уравнении (2) неизвестным является только

значение s. При этом использование функции арккосинуса для расчета α нежелательно, поскольку производная данной функции не определена при значениях аргумента, равных ±1, что может привести к проблемам при вычислении матрицы Якоби механизма в процессе анализа скоростей и ускорений.

Рассмотрим скалярное произведение

$$\left\langle \overline{AB}, \overline{AD} \right\rangle = \left\| \overline{AB} \right\| \cdot \left\| \overline{AD} \right\| \cdot \cos\alpha.$$

Из данного выражения следует, что

$$l_{AD} \cos\alpha = \left\| \overline{AD} \right\| \cdot \cos\alpha = \frac{\left\langle \overline{AB}, \overline{AD} \right\rangle}{\left\| \overline{AB} \right\|}. \qquad (3)$$

При этом стоит отметить, что знаменатель дроби в выражении (3) никогда не может быть равен нулю. Далее, подставляя (3) в (2), и перенося все слагаемые в одну часть уравнения, получим

$$s^2 - 2s \frac{\left\langle \overline{AB}, \overline{AD} \right\rangle}{\left\| \overline{AB} \right\|} + l_{AD}^2 - l_{CD}^2 = 0.$$

С использованием известных координат точек A, B и D данное выражение может быть переписано следующим образом:

$$s^2 - 2s \frac{(x_B - x_A)(x_D - x_A) + (y_B - y_A)(y_D - y_A)}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} + (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 - l_{CD}^2 = 0. \qquad (4)$$

Таким образом, уравнение (4) будет являться уравнением связи кинематической цепи PRR. Также легко видеть, что данное уравнение является квадратным уравнением вида

$$as^2 + bs + c = 0,$$

где

$$a = 1,$$

$$b = -2 \frac{(x_B - x_A)(x_D - x_A) + (y_B - y_A)(y_D - y_A)}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}},$$

$$c = (x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2 - l_{CD}^2.$$

Общий вид решения данного уравнения и, соответственно, обратной задачи о положениях плоской кинематической цепи PRR хорошо известен:

$$s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

При этом если $s < 0$ или $s > l_{AB}$, то каретка должна находиться за пределами направляющей AB, что физически невозможно.

Таким образом, обратная задача о положениях имеет решение, если уравнение (4) имеет хотя бы один действительный корень, удовлетворяющий указанным ограничениям.

Результаты и обсуждение

В представленной работе в общем виде решена обратная задача о положениях параллельных механизмов типа n-PRR.

Рассмотренный алгоритм позволяет определять перемещение приводной каретки при произвольном расположении направляющих цепи. Проведенный анализ показал, что использование квадратных уравнений для описания кинематических связей значительно упрощает дальнейшие исследования скоростей и ускорений механизмов, избегая проблем, связанных с функцией арккосинуса.

Заключение

При дальнейших исследованиях можно рассмотреть возможность интеграции полученных результатов в сложные механизмы, а также их применение в реальных задачах.

Таким образом, результаты данной работы могут стать основой для разработки конструкций последовательных и параллельных механизмов, в состав которых входят кинематические цепи PRR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Dasgupta B., Mruthyunjaya T.S. Force redundancy in parallel manipulators: theoretical and practical issues // Mechanism and Machine Theory. 1998. Pp. 727–742.

[2] Glazunov V. A., Orlov A. V., Skvortsov P. A. Rational Design of a Micro-positioner with Elastic Hinges. Proceedings of IFToMM Asian Mechanism and Machine Science. 2022. Pp. 22–30.

[3] Haouas W., Dahmouche R., Le Fort-Piat N., Laurent G. J. 4-DoF spherical parallel wrist with embedded grasping capability for minimally invasive surgery. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. Pp. 2363-2368.
[4] Krut, S., Nabat, V., Company, O., Pierrot, F. A high-speed parallel robot for SCARA motions. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. Pp. 4109–4115.
[5] Laryushkin P. A., Khrestina A. A., Sinitsyna Yu. V., Semenov A. V.. The Issue of Type Synthesis of Kinematic Chains of Spherical Parallel Mechanisms with Linear Drives. ISSN 1052-6188, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2025, Vol. 54, No. 2, pp. 125–132.
[6] Leveziel M., Laurent G. J., Haouas W., Gauthier M., Dahmouche R. A 4-DoF Parallel Robot With a Built-in Gripper for Waste Sorting. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022. Pp. 9834-9841
[7] Luces, M., Mills, J. K., Benhabib, B. A review of redundant parallel kinematic mechanisms. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Pp. 175–198
[8] Majou, F., Wenger, P., Chablat, D. The design of parallel kinematic machine tools using kinetostatic performance criteria. 2007.
[9] Merlet J.-P. Parallel robots. Springer, 2006. 402 p.
[10] Murray, A., Hanchak, M. Kinematic synthesis of planar platforms with RPR, PRR, and RRR chains. In Lenarčič, J., Stanišić, M. M. (Eds.), Advances in Robot Kinematics. Dordrecht: Springer, 2000.
[11] Ларюшкин П. А., Глазунов В. А., Хейло С. В. Решение задачи о положениях параллельного манипулятора с тремя степенями свободы. Справочник. Инженерный журнал. 2012. № 2. С. 16–20.
[12] Ларюшкин П. А., Исполов Е. М., Долгих А. И. Решение задачи о положениях и исследование рабочей зоны плоского кинематически избыточного механизма параллельной структуры // Известия вузов. Машиностроение. 2023. №11 (764). С. 20–28.
[13] Ларюшкин П. А., Эрастова К. Г., Филиппов Г. С., Хейло С. В. К расчету механизмов типа Delta с линейными приводами и различным числом степеней свободы. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 19–26.
[14] Тимофеев, Г. А.Теория механизмов и машин: учебник и практикум для вузов // Г. А. Тимофеев. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Издательство Юрайт, 2025. С. 432.
[15] Филлипов Г. С., Шалюхин К. А., Рашоян Г. В., Глазунов В. А., Скворцов С. А., Алешин А. К. Механизм манипулятора с параллельной структурой для использования в роботизированном хирургическом комплексе. Технологии и качество. 2021. № 1 (51). С. 46–51.

A.A. Khrestina[2], E.M. Ispolov[2], P.A. Laryushkin

GENERAL SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM OF POSITION OF PARALLEL MECHANISMS *n*-PRR

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;
[2] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia.

Abstract

The article considers the solution of the inverse problem of the positions of planar and spatial mechanisms of a parallel structure, consisting of a kinematic chain consisting of a carriage (slider) and two rotary hinges with parallel axes. The results are general algorithms and formulas used to determine the carriage movement with an arbitrary arrangement of chain guides.

Key words: kinematic chain, planar mechanism, spatial mechanism, parallel structure mechanism, inverse position problem

REFERENCES

[1] Dasgupta B., Mruthyunjaya T.S. Force redundancy in parallel manipulators: theoretical and practical issues // Mechanism and Machine Theory. 1998. Pp. 727–742.
[2] Glazunov V. A., Orlov A. V., Skvortsov P. A. Rational Design of a Micro-positioner with Elastic Hinges. Proceedings of IFToMM Asian Mechanism and Machine Science. 2022. Pp. 22–30.
[3] Haouas W., Dahmouche R., Le Fort-Piat N., Laurent G. J. 4-DoF spherical parallel wrist with embedded grasping capability for minimally invasive surgery. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. Pp. 2363-2368.
[4] Krut, S., Nabat, V., Company, O., Pierrot, F. A high-speed parallel robot for SCARA motions. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. Pp. 4109–4115.
[5] Laryushkin P. A., Khrestina A. A., Sinitsyna Yu. V., Semenov A. V.. The Issue of Type Synthesis of Kinematic Chains of Spherical Parallel Mechanisms with Linear Drives. ISSN 1052-6188, Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2025, Vol. 54, No. 2, pp. 125–132.
[6] Leveziel M., Laurent G. J., Haouas W., Gauthier M., Dahmouche R. A 4-DoF Parallel Robot With a Built-in Gripper for Waste Sorting. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022. Pp. 9834-9841

[7] Luces, M., Mills, J. K., Benhabib, B. A review of redundant parallel kinematic mechanisms. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Pp. 175–198
[8] Majou, F., Wenger, P., Chablat, D. The design of parallel kinematic machine tools using kinetostatic performance criteria. 2007.
[9] Merlet J.-P. Parallel robots. Springer, 2006. 402 p.
[10] Murray, A., Hanchak, M. Kinematic synthesis of planar platforms with RPR, PRR, and RRR chains. In Lenarčič, J., Stanišić, M. M. (Eds.), Advances in Robot Kinematics. Dordrecht: Springer, 2000.
[11] Laryushkin P. A., Glazunov V. A., Kheylo S. V. Solution of the problem on positions of a parallel manipulator with three degrees of freedom. Handbook. Engineering journal. 2012. No. 2. P. 16–20.
[12] Laryushkin P. A., Ispolov E. M., Dolgikh A. I. "Solving the problem on positions and studying the working area of a flat kinematically redundant mechanism of parallel structure // News of universities. Mechanical engineering. 2023. No. 11 (764). P. 20–28.
[13] Laryushkin P. A., Erastova K. G., Filippov G. S., Heilo S. V. On the calculation of Delta-type mechanisms with linear drives and a different number of degrees of freedom. Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2019. No. 3. pp. 19-26.
[14] Timofeev, G. A. Theory of principles and machines: textbook and practices for universities // G. A. Timofeev. - 4th ed., revised. and additional. - Moscow: Publishing house Yurait, 2025. P. 432.
[15] Fillipov G. S., Shalyukhin K. A., Rashoyan G. V., Glazunov V. A., Skvortsov S. A., Alyoshin A. K. A manipulator mechanism with a parallel structure for use in a robotic surgical complex. Technology and quality. 2021. № 1 (51). С. 46–51.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-117

В.А. Терешин[1], А.Н. Евграфов[2], В.И. Каразин[3], И.О. Хлебосолов[4]

ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ МОДЕЛЬ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ УДАРНОГО СПЕКТРА



[1]Валерий Алексеевич Терешин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-48-45, E-mail: terva@mail.ru



[2]Александр Николаевич Евграфов, заведующий кафедрой,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия.
Тел.: (812)297-4845, E-mail: alexevgrafov@mail.ru



[3]Владимир Игоревич Каразин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru



[4]Игорь Олегович Хлебосолов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru

Аннотация

В работе исследуется возможность простого аналитического описания ударных спектров, воспроизводимых на стендах, допускающих максимальные импульсы ускорений до 2000 g в частотном диапазоне от 10^2 до 10^4 Гц. Для выполнения динамических расчетов ударных стендов используются вычислительные программы, предназначенные для решения задач механики деформируемого твердого тела. В данной работе сделана

попытка учесть процессы, наиболее существенно влияющие на характеристики ударного спектра. Важным, но не учтенным здесь является воздействие отраженных волн от боковых граней. Работа посвящена отысканию простого алгоритма, позволяющего с не слишком большими ошибками быстро подбирать параметры стенда. В основу исследования положено моделирование приборного стола и станины как ступенчатого стержня.

Ключевые слова: испытательный стенд, ударный спектр, двухступенчатый стержень, ударное ускорение, продольные колебания.

Введение

Анализ интенсивных ударных спектров показал, что при моделировании динамики стендов можно не учитывать медленные процессы, обусловленные работой амортизаторов и деформированием формирователей ударных импульсов. Ограничимся рассмотрением стендов со схемами, в которых стол с испытуемым изделием ударяет по станине через жесткую прокладку [5, 6, 8]. Амплитуды ускорений при ударе приборного стола о станину превосходят амплитуды при ударе бойка по столу [12], поэтому в качестве начального условия для расчетов можно принять движение стола как твердого тела с уже приобретенной скоростью вне зависимости от способа разгона. Из вышесказанного следует, что для описания интересующих нас динамических процессов с достаточной точностью можно рассмотреть продольные волны, возникающие в системе «приборный стол – станина».

Математическая модель динамических процессов

Рассмотрим схему ударного стенда, показанную на рис. 1, в момент,

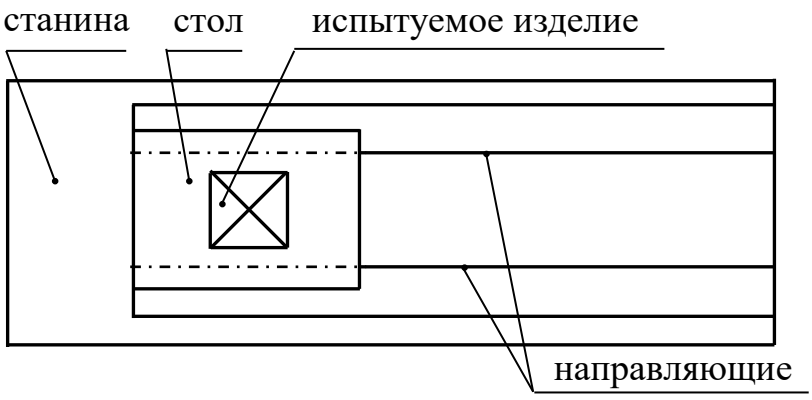


Рис. 1. Схема ударного стенда

когда стол касается станины. При этом динамическая модель стенда может быть представима в виде единого твердого тела, состоящего из двух

однородных участков, характеризуемых основными параметрами приборного стола и станины. Продольную координату при этом удобно выбрать разрывной, состоящей из двух участков с противоположными направлениями отсчета. Соединение стола со станиной будем полагать абсолютно жестким и невесомым. Предполагается отсутствие отскока стола от станины во время записи ударного спектра. На рис. 2 изображена соответствующая расчетная схема, на которой введены следующие обозначения: x – кусочно-линейная координата поперечных сечений

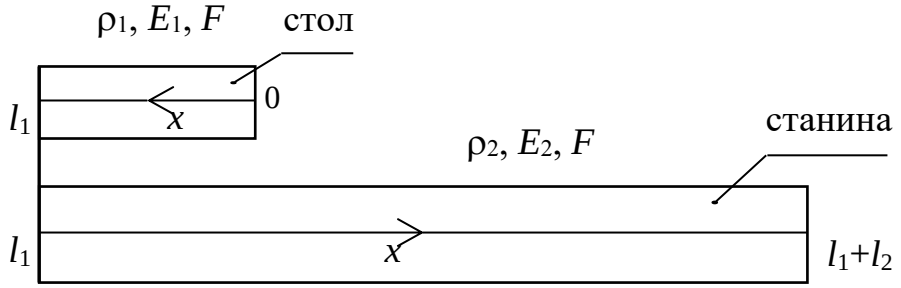


Рис. 2. Расчетная схема ударного стенда

составного стержня, определенная на интервале [0; l_1+l_2]; l_1 и l_2 – длины приборного стола и станины; E и ρ – модуль нормальной упругости и плотность материала; F – площадь поперечного сечения стержня; нижние индексы 1 и 2 относятся к столу и станине, соответственно. Для описания продольных колебаний этой системы воспользуемся волновым уравнением

$$\ddot{u}(x,t) = a^2 u''(x,t) \tag{1}$$

[4] с граничными и начальными условиями

$$u'(0,t)=0;\ u'(l_1+l_2,t)=0;\ u(l_1-0)=-u(l_1+0);\ E_1F_1u'(l_1-0)=-E_2F_2u'(l_1+0) \tag{2}$$

$$u(x,0)=0;\quad \dot{u}(x,0)=v\left[\Phi(x)-\Phi(x-l_1)\right] \tag{3}$$

В уравнении (1) и равенствах (2), (3) буквой Ф обозначена функция Хевисайда; v – начальная скорость стола; t – время; u – продольные перемещения поперечных сечений; $a=\sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения волны; точкой и штрихом обозначены производные по времени t и координате x. Для решения волнового уравнения (1) применим метод Фурье, то есть представим его в виде суммы произведений гармонических функций с частотами свободных колебаний системы на соответствующие им формы

$$u(x,t)=\mathrm{X}(x)\,\mathrm{T}(t) \tag{4}$$

Подстановка частного решения (4) в уравнение (1) после разделения переменных дает следующие два равенства:

$$\frac{\ddot{\mathrm{T}}}{\mathrm{T}} = -k^2, \quad a^2 \frac{\mathrm{X}''}{\mathrm{X}} = -k^2. \tag{5}$$

Постоянная величина k имеет физический смысл частоты свободных колебаний системы. Запишем решения дифференциальных уравнений (5).

$$\begin{cases} \mathrm{X}(x) = A\cos\left(\frac{k}{a}x\right) + B\sin\left(\frac{k}{a}x\right). \\ \mathrm{T}(t) = C\cos(kt) + D\sin(kt) \end{cases} \tag{6}$$

Собственные частоты k определятся из первого уравнения системы (6) после подстановки его в граничные условия (2). В каждый момент времени оба конца двухступенчатого стержня свободны от внешних сил, а в месте соединения происходит смена знака продольного перемещения сечения и растягивающего усилия. Таким образом, граничные условия (2) принимают следующий вид:

$$\mathrm{X}_1'(0) = 0; \quad \mathrm{X}_2'(l_1 + l_2) = 0; \quad \mathrm{X}_1(l_1) = -\mathrm{X}_2(l_1); \quad E_1F_1\mathrm{X}_1'(l_1) = -E_2F_2\mathrm{X}_2'(l_1) \tag{7}$$

Здесь приняты различные обозначения форм колебаний на двух участках X_1 и X_2 с соответствующими множителями A_1, B_1 и A_2, B_2, так как в силу разрывности решения аналитические выражения получаются разными. Подставим первое уравнение системы (6) в (7).

$$\begin{cases} -A_1(k/a_1)\sin((k/a_1)\cdot 0) + B_1(k/a_1)\cos((k/a_1)\cdot 0) = 0 \\ -A_2(k/a_2)\sin[(k/a_2)(l_1 + l_2)] + B_2(k/a_2)\cos[(k/a_2)(l_1 + l_2)] = 0 \\ A_1\cos((k/a_1)l_1) + B_1\sin((k/a_1)l_1) = -A_2\cos((k/a_2)l_1) - B_2\sin((k/a_2)l_1) \\ E_1F_1[-A_1(k/a_1)\sin((k/a_1)l_1) + B_1(k/a_1)\cos((k/a_1)l_1)] = \\ = -E_2F_2[-A_2(k/a_2)\sin((k/a_2)l_1) + B_2(k/a_2)\cos((k/a_2)l_1)] \end{cases} \tag{8}$$

Из первого уравнения (8) следует, что B_1=0. Оставшиеся три уравнения перепишем в матричной форме.

$$\begin{bmatrix} 0 & -\sin\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right] & \cos\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right] \\ \cos\left((k/a_1)l_1\right) & \cos\left((k/a_2)l_1\right) & \sin\left((k/a_2)l_1\right) \\ -\dfrac{E_1F_1}{a_1}\sin\left((k/a_2)l_1\right) & -\dfrac{E_2F_2}{a_2}\sin\left((k/a_2)l_1\right) & \dfrac{E_2F_2}{a_2}\cos\left((k/a_2)l_1\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Система однородных уравнений (9) позволяет найти коэффициенты форм свободных колебаний $ha = A_2/A_1$ и $hb = B_2/A_1$ после приравнивания нулю определителя матрицы и решения полученного частотного уравнения:

$$\begin{aligned} &(E_1F_1/a_1)\sin\left((k/a_1)l_1\right)\sin\left((k/a_2)l_1\right)\sin\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right]- \\ &-(E_2F_2/a_2)\sin\left((k/a_2)l_1\right)\cos\left((k/a_1)l_1\right)\cos\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right]+ \\ &+(E_1F_1/a_1)\sin\left((k/a_1)l_1\right)\cos\left((k/a_2)l_1\right)\cos\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right]+ \\ &+(E_2F_2/a_2)\cos\left((k/a_2)l_1\right)\cos\left((k/a_1)l_1\right)\sin\left[(k/a_2)(l_1+l_2)\right]=0 \end{aligned} \quad (10)$$

Частотное уравнение (10) приводится к следующему виду

$$\mu = -\mathrm{tg}(kT_2)/\mathrm{tg}(kT_1), \quad (11)$$

где $\mu = (E_1F_1/a_1)/(E_2F_2/a_2), T_1 = l_1/a_1, T_2 = l_2/a_1$. Найдем коэффициенты форм из второго и третьего уравнений системы (8).

$$\begin{aligned} ha &= -\cos(kT_1)\cos\left[k(T_2+T_3)\right]/\cos(kT_2), \\ hb &= -\cos(kT_1)\sin\left[k(T_2+T_3)\right]/\cos(kT_2), \end{aligned} \quad (12)$$

где $T_3 = l_1/a_2$. Следовательно,

$$\mathrm{X}(x) = \begin{cases} \cos(kx/a_1), & x \in [0; l_1] \\ ha\cos(kx/a_2) + hb\sin(kx/a_2), & x \in [l_1; l_1+l_2] \end{cases} \quad (13)$$

Постоянные интегрирования C и D во втором уравнении (6) определим из начальных условий (3).

$$\begin{cases} u(x,0) = \sum\limits_{n=0}^{\infty} \mathrm{X}_n(x)C_n \\ \dot{u}(x,0) = \sum\limits_{n=0}^{\infty} \mathrm{X}_n(x)k_nD_n \end{cases} \quad (14)$$

Умножим уравнения (14) на форму колебаний, соответствующую произвольной собственной частоте k_s и проинтегрируем по всей длине двухступенчатого стержня с учетом (3).

$$\begin{cases} 0 = \sum\limits_{n=0}^{\infty} C_n \int\limits_0^{l_1+l_2} \mathrm{X}_n(x)\mathrm{X}_s(x)dx \\ \int\limits_0^{l_1} v\mathrm{X}_s(x)\,dx = \sum\limits_{n=0}^{\infty} D_n k_n \int\limits_0^{l_1+l_2} \mathrm{X}_n(x)\mathrm{X}_s(x)dx \end{cases} \tag{15}$$

В силу ортогональности собственных форм

$$\begin{cases} 0 = C_s \int\limits_0^{l_1+l_2} \mathrm{X}_s^2(x)\,dx \\ v\int\limits_0^{l_1} \mathrm{X}_s(x)\,dx = D_s k_s \int\limits_0^{l_1+l_2} \mathrm{X}_s^2(x)\,dx \end{cases} \tag{16}$$

Таким образом, все множители $C_s = 0$. Для отыскания множителей D_s надо взять интегралы в (16) от функций (13). Из всего вышесказанного следует, что решение уравнения (1) представимо суммой слагаемых вида

$$u_n(x,t) = D_n \mathrm{X}_n(x)\sin(k_n t). \tag{17}$$

Ударный спектр

Ударным спектром называется максимальное по модулю ускорение одностепенного условного осциллятора без учета демпфирования за все время прохождения падающих и отраженных ударных волн [15]. Ударный спектр является функцией от частоты осциллятора и изображается в логарифмическом масштабе в единицах «g». Запишем уравнение движения одностепенного осциллятора с собственной частотой ω и абсолютной координатой y, установленного в середине приборного стола

$$\ddot{y} + \omega^2 y = \omega^2 \sum_{n=0}^{\infty} D_n X_n(l_1/2)\sin(k_n t). \tag{18}$$

Решим его с помощью интеграла Дюамеля при нулевых начальных условиях

$$y(t) = \omega \sum_{n=0}^{\infty} D_n X_n(l_1/2)\int_0^t \sin(\omega\tau)\sin\left[k_n(t-\tau)\right]d\tau. \tag{19}$$

После взятия интеграла получим выражение для абсолютного ускорения осциллятора

$$\ddot{y}(t)=\omega^2\sum_{n=0}^{\infty}D_nX_n\left(l_1/2\right)\frac{k_n}{\omega^2-k_n^2}\left[\omega\sin(\omega t)-k_n\sin\left(k_nt\right)\right]. \qquad (20)$$

Для определения ударного спектра

$$S(\omega)=\lg\left(\max_t|\ddot{y}(t)|/g\right) \qquad (21)$$

предположим, что длительность колебательного процесса больше максимального периода всех частот в функции (20). Тогда синусы можно приравнять единицам и записать оценку спектра сверху

$$S(\omega)=\lg\left(\frac{\omega^2}{g}\sum_{n=0}^{\infty}D_nX_n\left(l_1/2\right)\frac{k_n}{\left|\omega-k_n\right|}\right) \qquad (22)$$

Частотное уравнение (11) в диапазоне параметров исследуемых конструкций ударных стендов имеет решения, отличающиеся от случая однородного стержня постоянного сечения,

$$k_n=\pi an/\left(l_1+l_2\right) \qquad (23)$$

не более чем на 10%. При этом коэффициенты форм (12) примут следующий вид:

$$\begin{aligned}ha&=-\cos\left(\pi l_1n/\left(l_1+l_2\right)\right)\cos(\pi n)/\cos\left[\pi n\left(1-l_1/\left(l_1+l_2\right)\right)\right]=-1,\\ hb&=-\cos\left(\pi l_1n/\left(l_1+l_2\right)\right)\sin(\pi n)/\cos\left[\pi n\left(1-l_1/\left(l_1+l_2\right)\right)\right]=0.\end{aligned} \qquad (24)$$

После их определения можно получить выражения для постоянных D_n, взяв интегралы (15), и записать в окончательном виде ударный спектр

$$S(\omega)=\lg\left(\frac{2va\omega^2}{g\left(l_1+l_2\right)}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\sin\left(k_nl_1/a\right)\cos\left(k_nl_1/2a\right)}{k_n\left|\omega-k_n\right|}\right). \qquad (25)$$

На рис. 3 сплошной линией изображена зависимость (25) при учтенных первых семи слагаемых, при следующих параметрах стенда: a = 6400 м/с, v = 0,5 м/с, l_1 = 0,36 м, l_2 = 1,14 м. Частота осциллятора ω (Гц) показана в логарифмическом масштабе [7]. Заметим, что учет одного первого слагаемого в выражении (25), причем только при ω ‹‹ k_1 ≈ 2000 Гц дает удо-

$$S_1(\omega)=\lg\left(\frac{2va\omega^2\sin\left(k_1l_1/a\right)\cos\left(k_1l_1/2a\right)}{g\left(l_1+l_2\right)k_1^2}\right), \qquad (26)$$

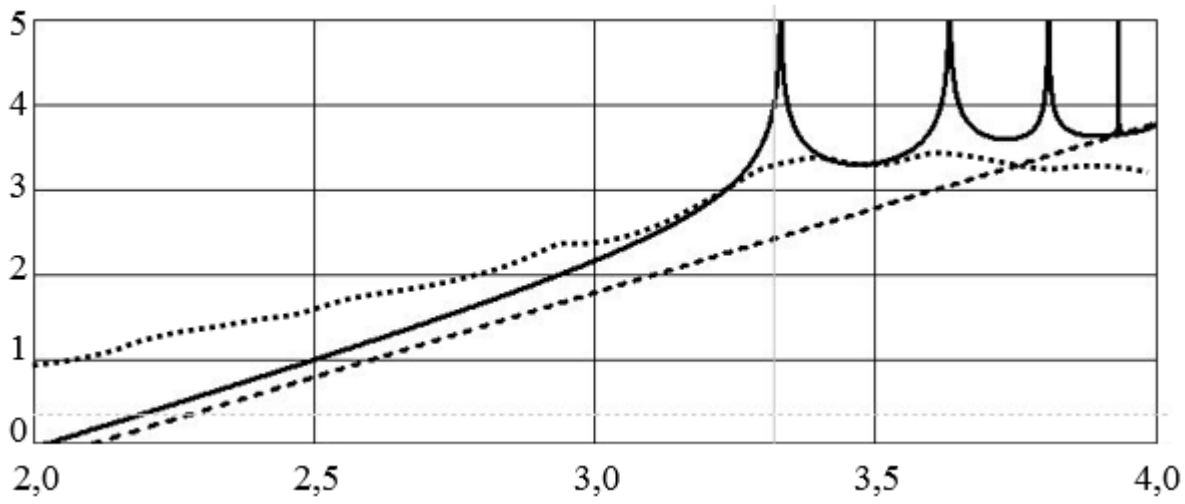


Рис. 3. Ударный спектр

влетворительную аппроксимацию ударного спектра в требуемом диапазоне частот от 10^2 до 10^4 Гц [4, 14]. На рис. 3 штриховой линией показан график $S_1(\omega)$, а пунктирной – экспериментально полученный ударный спектр после стандартной математической обработки [1, 15].

Заключение

В работе получено приближенное математическое выражение ударного спектра, формируемого на испытательных стендах в частотном диапазоне от 10^2 до 10^4 Гц. В основу исследования положена аналогия между динамическими процессами в ударных стендах и продольными колебаниями прямых ступенчатых стержней. Исследования, не вошедшие в работу, показали близость собственных частот рассматриваемых стендов частотам однородных стержней. На основе этого утверждения получены простые формулы для расчета перемещения точки крепления оборудования на приборном столе во время удара. Расчеты, показали возможность приближенного определения параметров испытательного оборудования для формирования требуемого ударного спектра на основе простой аналитической зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Андриенко П.А. и др. Методы и средства лабораторного воспроизведения ускорения. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 168с

[2] Андриенко П.А., Каразин В.И., Хлебосолов И.О. Об испытаниях на комбинированные воздействия. Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 142-149.

[3] Беляев А. К. и др. Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Т. 3(61). 2016. Вып. 1. – С. 77 – 94.
[4] Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
[5] 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. 2013. Т. 11. № 22. С. 55-64
[6] 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. 2013. С. 752
[7] Комаров И.С. Наземная экспериментальная отработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств разделения. Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИ маш). Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 71, 22 с. www.mai.ru/science/trudy/
[8] Манжосов В. К. Модели продольного удара. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 160 с.
[9] Смирнов А. С. Продольные колебания стержней: Учеб. пособие. СПб.: Политех-Пресс, 2023. – 370 с.
[10] Терешин В.А. Ударные спектры при линейном взаимодействии // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А.Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 202-213.
[11] Терешин В.А., Шемякина Т.А. Интегрирование нелинейных автономных дифференциальных уравнений // Материалы XX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24 – 31 мая 2019 г., Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2019. – 816 с.: ил. ISBN 978-5-4316-0589-5 с 118 - 120.
[12] Яровицын В.С., Литвинов С.Д., Каразин В.И., Суханов А.А., Хлебосолов И.О Устройство для испытания изделий на виброударные нагрузки. Патент на изобретение RUS 2348021 14.05.2007
[13] Chang K. Y., Pyrotechnic Devices, Shock Levels And Their Applications. // 9th International Congress on Sound and Vibration Orlando, USA, July 2002,19 p

[14] Tereshin V.A., Shock response spectra as a result of linear interactions // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Part F5, с. 151-161, DOI: 10.1007/978-3-319-72929-9_16.
[15] ГОСТ Р 51371-99. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов. – М.,2000, 24 с.
[16] Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В. Моделирование удара на универсальном вертикальном стенде типа СМУ500. // Современное машиностроение: Наука и образование 2024: материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года. / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. С. 422-433. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-112

V.A. Tereshin, A.N. Evgrafov, V.I. Karazin, I.O. Khlebosolov

TWO-STAGE TEST BENCH MODEL FOR SHOCK SPECTRUM SHAPING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper investigates the possibility of a simple analytical description of impact spectra reproduced on stands allowing maximum acceleration pulses up to 2000 g in the frequency range from 102 to 104 Hz. To perform dynamic calculations of shock stands, computational programs designed for solving problems of deformable solid mechanics are used. In this paper, an attempt is made to take into account the processes that most significantly affect the characteristics of the shock spectrum. An important, but not taken into account here, is the impact of reflected waves from side edges. The work is devoted to finding a simple algorithm that allows fast selection of stand parameters with not too large errors. The study is based on modeling of the instrument table and bed as a stepped rod.

Keywords: test bench, impact spectrum, two-stage rod, impact acceleration, longitudinal vibrations.

REFERENCES

[1] Andrienko P.A. et al. Methods and means of laboratory reproduction of acceleration. - SPb.: POLITEKH-PRESS, 2023. – 168 p.

[2] Andrienko P.A., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. About tests on combined influences. Modern Engineering. Science and education. 2012. № 2. Pp. 142-149.
[3] Belyaev A. K. et al. Parametric resonances in the problem of a longitudinal impact on a thin rod // Bulletin of SPbSU. Ser. 1. T. 3(61). 2016. Iss. 1. - Pp. 77 - 94.
[4] Biderman V.L. Theory of mechanical vibrations. - Moscow: Vysshaya shkola, 1980. - 408 p.
[5] Karazin V.I., Kolesnikov S.V., Litvinov S.D., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Features of modeling and reproduction of vibration impact. Theory of mechanisms and machines. 2013. T. 11. № 22. Pp. 55-64.
[6] Karazin V.I., Kolesnikov S.V., Litvinov S.D., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Optimization of parameters of the broadband vibroimpact mechanical stand. Modern Engineering. Science and education. 2013. Pp. 752
[7] Komarov I.S. Ground experimental testing of rocket and space technology products for shock impact from pyrotechnic means of separation. Central Research Institute of Mechanical Engineering (TsNII Mash). Electronic journal “Proceedings of MAI”. Issue No. 71, 22 pp. www.mai.ru/science/trudy/
[8] Manzhosov V. K. Models of longitudinal impact. - Ulyanovsk: UlGTU, 2006. - 160 p.
[9] Smirnov A. S. Longitudinal vibrations of rods: Textbook. SPb.: Politech-Press, 2023. - 370 p.
[10] Tereshin V.A. Shock spectra at linear interaction // Modern Engineering: Science and Education: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference. / Edited by A.N.Evgrafov and A.A.Popovich. - SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2017. Pp. 202-213.
[11] Tereshin V.A., Shemyakina T.A. Integration of nonlinear autonomous differential equations // Proceedings of the XX International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS'2019), May 24 - 31, 2019, Alushta. - Moscow: Izd-vo MAI, 2019. - 816 p.: ill. ISBN 978-5-4316-0589-5 Pp. 118 - 120.
[12] Yarovitsyn V.S., Litvinov S.D., Karazin V.I., Sukhanov A.A., Khlebosolov I.O. Device for testing products for vibration shock loads. Patent for invention RUS 2348021 14.05.2007.
[13] Chang K. Y., Pyrotechnic Devices, Shock Levels And Their Applications. // 9th International Congress on Sound and Vibration Orlando, USA, July 2002,19 p
[14] Tereshin V.A., Shock response spectra as a result of linear interactions // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Part F5, Pp. 151-161, DOI: 10.1007/978-3-319-72929-9_16.

[15] GOST P 51371-99. Test methods for resistance to mechanical external influencing factors of machines, devices and other technical products. Impact tests. - Moscow, 2000, 24 p.
[16] Popov A.N., Polishchuk M.N., Reshetov D.V. Impact modeling on a universal vertical stand of SMU500 type. // Modern Engineering: Science and Education 2024: Proceedings of the 13th International Scientific Conference, June 20, 2024. / Edited by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. - SPb.: POLITEKH-PRESS, 2024. Pp. 422-433.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-118

А.В. Хисамов[1], И.О. Хлебосолов[2]

ОПРОС КАНАЛОВ ТОКОСЪЕМА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ПРОВЕРКИ СОСТОЯНИЯ СУХИХ КОНТАКТОВ



[1]Андрей Владимирович Хисамов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: andrey@d-science.kz



[2]Игорь Олегович Хлебосолов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: khlebosolov@mail.ru

Аннотация

Токосъемные устройства играют ключевую роль в передаче энергии и сигналов установок с подвижной рабочей поверхностью. Надежность этих каналов критически важна для обеспечения корректной работы как лабораторного, так и промышленного оборудования. В данной статье в качестве примера такого механизма будут выступать центрифуги.

Центробежные установки широко применяются в науке, промышленности и медицине. Условия эксплуатации в центрифуге — высокая частота вращения, значительные центробежные нагрузки, вибрации и, иногда, термическое воздействие — предъявляют повышенные требования к надежности токосъемных каналов. Их разрушение может привести к выходу оборудования из строя или ошибкам измерений и/или испытаний, особенно в прецизионных испытательных стендах.

Другой причиной, по которой может возникнуть необходимость опроса каналов токосъема – определение состояния подключенного устройства. Проверяемое изделие устанавливается в испытательную

центрифугу и подключается через токосъем к детектирующему устройству. В процессе проведения испытаний при достижении определенных ускорений, состояние контактов изделия меняется. Необходимо зафиксировать время наступления события и текущее значение воспроизводимого ускорения.

В статье рассматривается способ опроса контактов токосъема. Приведены примеры из практики применения контроля каналов в испытательных центрифугах.

Ключевые слова: центрифуга, токосъем, испытательное оборудование, система управления, сухие контакты.

Введение

Токосъемы — это ключевые элементы испытательного оборудования, обеспечивающие передачу электрического тока между подвижными и неподвижными частями системы. Они применяются в различных сферах, включая электроэнергетику, транспорт, промышленные установки, испытательные стенды и научные исследования. От их надежности и точности зависят качество измерений, безопасность и эффективность работы оборудования.

В некоторых испытательных системах (например, стендах для проверки роторов электродвигателей, центробежных стендах и др.) требуется передача тока на вращающиеся части. Токосъемы с щеточными или бесконтактными (индуктивными) технологиями позволяют проводить измерения без остановки оборудования.

Щеточные токосъемы - наиболее распространенный тип токосъемов, где ток передается, например, через графитовые щетки. Одним из ключевых недостатков подобных токосъемов является износ щеток после некоторого времени работы устройства. В связи с этим возникает задача периодической проверки каналов токосъема.

Для этого можно использовать как специальные устройства, рассчитанные именно на проверку данного токосъема, так и универсальную «прозвонку». В процессе проверки можно определить как наличие обрыва в цепи, так и несоответствие сопротивления в цепи паспортным значениям. Одни устройства позволяют определить целостность токосъема в остановленном состоянии, другие – в процессе эксплуатации испытательного оборудования. Особо ценные методы проверки каналов дают данные не только по потери связи в каком-то из каналов, но и текущие параметры работы установки. Это важно, поскольку обрыв связи может быть не постоянным, а появляться по достижении определенной интенсивности движения.

Иной задачей, стоящей перед разработчиками оборудования, может являться проверка состояния контактов испытуемого устройства. В данном случае, подразумевается не функциональная целостность цепи, а изменение состояния устройства в процессе работы, выраженное в замыкании или размыкании определенных контактов.

Например, необходимо провести испытания работоспособности изделия, которое при достижении определенного значения ускорения разомкнет один из внешних контактов, а при достижении другого значения ускорения – замкнет другой контакт. Для воспроизведения необходимых значений ускорения используется центробежный стенд.

Испытательная центрифуга — это специализированная установка, предназначенная для создания управляемых центробежных ускорений с целью испытания, калибровки или исследования поведения различных объектов, систем или материалов в условиях повышенных перегрузок.

Изделие устанавливается на ротор центрифуги и подключается к разъему токосъема, установленному на подвижной части. На неподвижной части необходимо подключить устройство, которое так или иначе будет проверять состояние подключенных выходных контактов изделия. В зависимости от типа изделия и блока опроса – возможны различные методы детектирования состояния контактов.

В рамках данной работы было спроектировано устройство, позволяющее совместить обе описанные задачи: проверка целостности каналов токосъема и опрос состояния испытуемого изделия.

Методы

Для решения задачи проверки целостности контактов токосъема и одновременно проверки состояния испытуемого изделия необходим метод, который потребует наличие активного измерителя только на неподвижной части центрифуги, поскольку на роторе может быть установлено готовое изделие, которое не подразумевает внесения изменений в свою конструкцию или схему подключения.

Для контроля состояния каналов широко применяются методы электрической диагностики, одним из наиболее надёжных и простых из которых является опрос сухих контактов. Этот метод позволяет оперативно фиксировать факт наличия или обрыва цепи, а также регистрировать мгновенные изменения состояния линии без подачи рабочего напряжения. Особенно эффективно применение сухих контактов в условиях, где требуется гальваническая развязка между цепями управления и цепями силового тока. Сухой контакт не имеет собственного напряжения, поэтому его проверка сводится к контролю состояния (замкнут/разомкнут) и измерению параметров, что позволяет использовать

метод как для проверки целостности токосъема, так и для опроса испытуемого устройства.

Метод опроса сухих контактов заключается в использовании пассивных контактных пар, замыкающих или размыкающих цепь токосъема в зависимости от его физического состояния (например, положения щетки, наличия давления, замыкания кольца и т.д.). Эти контакты не подают собственное напряжение — они лишь передают управляющий сигнал внешней диагностической системе, которая контролирует замкнутость или разомкнутость линии. Опрос сухих контактов осуществляется с помощью:

- цифровых входов контроллеров (ПЛК);
- специализированных диагностических модулей;
- регистраторов событий.

Метод опроса сухих контактов применяется для диагностики линий токосъема в системах, где требуется контроль состояния цепи без подачи напряжения. Этот подход основан на периодическом сканировании контактных групп. В зависимости от метода реализации и стоящих задач возможны два способа опроса:

- подачей дискретного сигнала и получении его на дискретном входе;
- анализе сопротивления цепи.

Второй способ опроса является наиболее полезным, поскольку:

- не требует подачи напряжения на тестируемую линию;
- обеспечивает гальваническую развязку между измерительной системой и цепью токосъема.

Также данный метод позволяет выявлять не только обрыв цепи, но и:

- короткое замыкание;
- в некоторых реализациях - промежуточные сопротивления (окисление, подгар контактов).

Типовые схемы подключения в простейшем случае изображена на рисунке 1:

а) *б)*

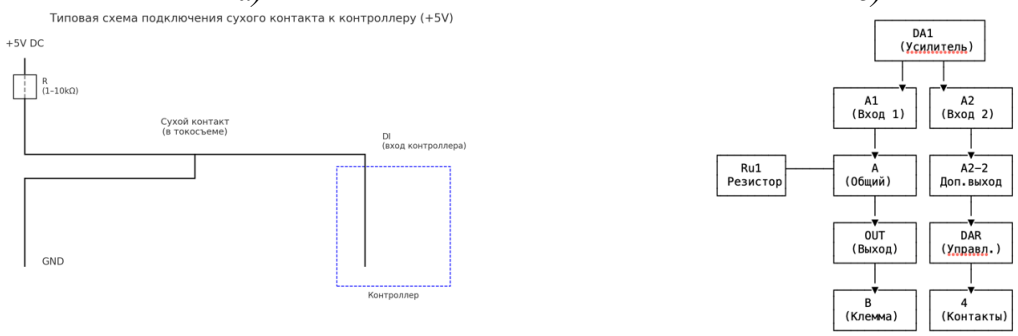


Рис. 1. Типовая схема подключения: а) при включении для опроса путем появления дискретного сигнала; б) при включении для опроса путем измерения сопротивления

На схемах обозначены:

- R — токоограничивающий резистор, предотвращающий ложные срабатывания при колебаниях напряжения и замыкании;
- Сухой контакт — механически или сенсорно замыкается при наличии исправного токосъема;
- DI (Digital Input) — дискретный вход контроллера, опрашивает логический уровень (0 или 1);
- GND — общий потенциал для питания и цифрового входа.

- DA1 - основной усилительный/управляющий модуль;
- A1, A2 - входные клеммы;
- A - общий провод/шина;
- A2-2 - дополнительный выходной канал;
- OUT - главный выходной сигнал;
- DAR - управляющий вход;
- B - вспомогательная клемма подключения;
- 4, 3 - нумерованные контакты (для перемычек);
- Ru1, Ru2 - резисторы (5Ω/1.1W).

Для проведения опроса в простейшем случае не требуется контроллер с повышенной производительностью. Для опроса достаточно короткой программы, наподобие следующей:

```
int main() {
    // Параметры системы
    const float threshold_low = 1.0f;      // Порог сопротивления в Омах - низкий
    const float threshold_high = 10.0f;    // Порог сопротивления в Омах - высокий
    const int polling_interval = 1;        // Интервал опроса в секундах

    while (true) {
        // 1. Измерение сопротивления
        float R = measure resistance();
        // 2. Проверка состояния
        if (R > threshold_high) {
            log_error("Контакт разомкнут");
        }
        else if (R < threshold_low) {
            log error("контакт замкнут");
        }
        else {
            log_error("слабый контакт");
        }
        // 3. Задержка перед следующим опросом
        sleep(polling interval);
    }
    return 0;
}
```

В практическом исполнении схема включения выглядит сложнее, содержит элементы обработки шумов и позволяет опрашивать 40 каналов токосъема одновременно. Разработанная плата блока опроса сухих контактов изображена на рисунке 2:

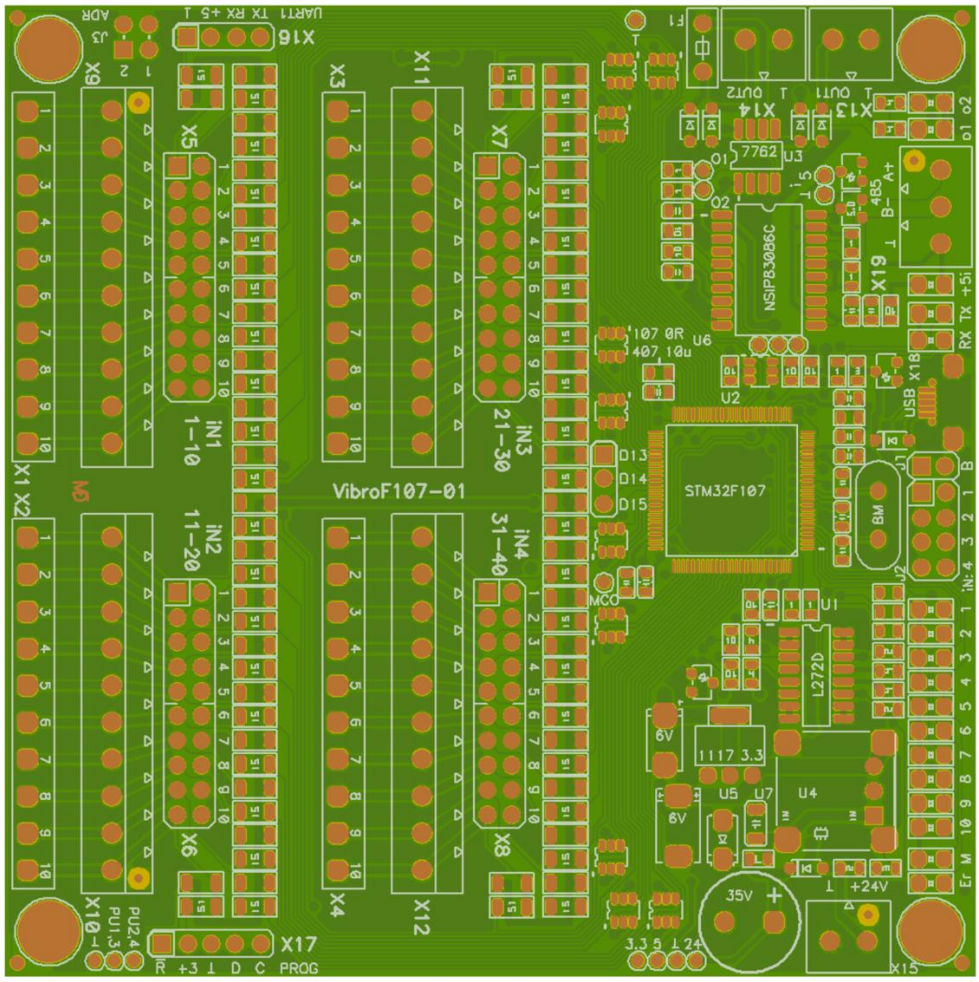


Рис. 2. Изображение печатной платы блока опроса сухих контактов

Результаты

В качестве опытного образца был изготовлен блок опроса сухих контактов. Данный блок работает в паре с цифровым блоком системы фазового управления. После запуска системы управления, между двумя блоками происходит синхронизация времени начала отсчета выполнения задания.

Программа испытаний задается на операторском компьютере в виде одного из графиков (Рис. 3):

- скорости вращения центрифуги;
- воспроизводимого ускорения;
- градиента изменения воспроизводимого ускорения.



Рис. 3. Программное обеспечение для управления центробежным стендом

В процессе управления на график задания накладывается график воспроизводимого значения ускорения. В момент наступления события блок опроса сухих контактов фиксирует время события и состояние опрошенных контактов. Опрос каждого канала происходит в условиях:

- не реже, чем раз в 10 мс;
- ток контролируемой цепи не более 10мА;
- максимальное напряжение, между контролируемыми точками - не более 10В.

По завершении испытаний данные из блока опроса передаются в блок системы управления, где они объединяются с общими данными процесса. События изменения контактов отмечаются на графике. Все данные по завершении испытания можно выгрузить в таблицу.

Таким образом, возможно определить при каком воспроизводимом ускорении произошло изменение состояния контактов испытуемого изделия или на какой скорости вращения произошла потеря сигнала в линии проверяемого токосъема.

Заключение

Разработанный блок может быть использован как средство проверки испытуемого изделия, так и как средство контроля работоспособности токосъема. При этом единый подход к проведению опроса позволяет использовать устройство как постоянно подключенное к токосъему, без необходимости смены оборудования между испытаниями изделия и проверками токосъема. В комплекте с цифровой фазной системой управления данный блок может быть хорошим решением при модернизации существующего испытательного оборудования,

позволяющим повысить точность проводимых испытаний и упрощающим управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Plohov, I.V., Savraev, I.E., Ilyin, A.V., et al. Comprehensive Diagnostics of the Technical Condition of a Turbine Generator Slip Ring Current Collector. Power Technol Eng, 55. 2022. pp. 749–757.

[2] J. Wang, Renying Liu, Ruofan Xiao, et al. Optimized Design of Slip Ring Assembly for Aerospace to Reduce Deep Dielectric Charging. IEEE Transactions on Nuclear Science, 4 (69). 2022. pp. 915-924.

[3] F. Avino, B. Gaffinet, D. Bommottet, A. Howling, I. Furno. Slip Ring Test Assembly With Increased Breakdown Voltage Limit for High-Voltage Bus Satellites. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 8 (35). 2020. pp. 32-36.

[4] Y. Yang et al. Research on Insulation Defect Detection Method for Conductive Slip Rings Based on MEMS Sensors. 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Harbin, China. 2024. pp. 2877-2882

[5] Emar W., Al-Omari Z., Rawashdeh T. Slip-Ring Induction Motor Torque and Current Ripple Minimization Using Bang-Bang Current Control. Evergreen, 2 (10). 2023. Pp. 962-975.

[6] W. Ren, Y. Chen, S. Cao, L. Cui and H. Liang. A New Automated Test Equipment for Measuring Electrical Contact Resistance of Real Size Rivets. 2013 IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013), Newport, RI, USA. 2013. pp. 1-7

[7] I. I. Obach, et al. Monitoring of Power Supply. 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia. 2019. pp. 1-6

[8] Dusan Medved, Lubomir Bena, Michal Kolcun, Marek Pavlik, Influence of Impurities in Electrical Contacts on Increasing the Efficiency of Energy Transmission. Energies, 7 (15). 2022. pp.2339.

[9] V. Maharshi, A. Agarwal and B. Mitra. Contact Study of MEMS High g Impact Sensor. 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE), New Delhi, India. 2020. pp. 1-4

[10] J. Shi, H. Gu, C. Shi and T. Ma. Research on AC Servo Control System of Medical Centrifuge Based on Fuzzy Adaptive Fractional PID. 2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), Chengdu, China. 2023. pp. 443-446.

[11] A. Winter, N. Mohajer, D. Nahavandi and M. Watson. Kinematic Control of a Human Centrifuge System for Simulation of Aircraft Manoeuvres.

2024 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC), Gold Coast, Australia. 2024. pp. 223-228.
[12] Evgrafov A.N., Tereshin V.A. influence of the control object mass on the stability region. Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. pp. 9-17.
[13] Andrienko, P.A., Evgrafov, A.N., Kozlikin, D.P., Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Graph-Based Structural Analysis of Kinetic Art Mechanisms on the Example of a Moving Horse Mechanism. Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science. 108. 2021. pp. 141-149.
[14] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Khisamov, A.V. Research of high-level control system for centrifuge engine. 2018. International Review of Mechanical Engineering. 12(5), pp. 400-404.
[15] C. Zhao, Z. Hua. Design of Motor Speed Control System Based on STM32 Microcontroller. 2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBE), Yunlin, Taiwan. 2022. pp. 274-276.
[16] Andrienko, P.A., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. About implementation harmonic impact of the resonance method. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 83-90.
[17] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Petrov, G.N. Analysis of the self-braking effect of linkage mechanisms. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119-127.

A.V.Khisamov, I.O.Khlebosolov

MONITORING OF CURRENT COLLECTOR CHANNELS DURING EQUIPMENT OPERATION VIA DRY CONTACT STATUS POLLING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Current collection devices play a key role in the transmission of power and signals in systems with moving working surfaces. The reliability of these channels is critically important for the proper functioning of both laboratory and industrial equipment. In this article, centrifuges are considered as a representative example of such mechanisms.

Centrifugal systems are widely used in science, industry, and medicine. The operating conditions within a centrifuge — high rotational speeds, significant centrifugal loads, vibrations, and occasionally thermal effects — impose increased demands on the reliability of current collection channels.

Failure of these components can lead to equipment malfunction or measurement and/or testing errors, particularly in precision test stands.

Another reason for polling current collection channels may be the need to determine the status of a connected device. The test object is mounted in a test centrifuge and connected via a slip ring to a monitoring system. During testing, as certain acceleration thresholds are reached, the status of the device's contacts may change. It is necessary to record the moment of this event along with the current value of the applied acceleration.

This article discusses a method for polling slip ring contacts. Practical examples of current channel monitoring in test centrifuge applications are provided.

Key words: centrifuge, current collection, slip ring system, test equipment, control system, dry contacts.

REFERENCES

[1] Plohov, I.V., Savraev, I.E., Ilyin, A.V., et al. Comprehensive Diagnostics of the Technical Condition of a Turbine Generator Slip Ring Current Collector. Power Technol Eng, 55. 2022. pp. 749–757.

[2] J. Wang, Renying Liu, Ruofan Xiao, et al. Optimized Design of Slip Ring Assembly for Aerospace to Reduce Deep Dielectric Charging. IEEE Transactions on Nuclear Science, 4 (69). 2022. pp. 915-924.

[3] F. Avino, B. Gaffinet, D. Bommottet, A. Howling, I. Furno. Slip Ring Test Assembly With Increased Breakdown Voltage Limit for High-Voltage Bus Satellites. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 8 (35). 2020. pp. 32-36.

[4] Y. Yang et al. Research on Insulation Defect Detection Method for Conductive Slip Rings Based on MEMS Sensors. 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Harbin, China. 2024. pp. 2877-2882

[5] Emar W., Al-Omari Z., Rawashdeh T. Slip-Ring Induction Motor Torque and Current Ripple Minimization Using Bang-Bang Current Control. Evergreen, 2 (10). 2023. Pp. 962-975.

[6] W. Ren, Y. Chen, S. Cao, L. Cui and H. Liang. A New Automated Test Equipment for Measuring Electrical Contact Resistance of Real Size Rivets. 2013 IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013), Newport, RI, USA. 2013. pp. 1-7

[7] I. I. Obach, et al. Monitoring of Power Supply. 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia. 2019. pp. 1-6

[8] Dusan Medved, Lubomir Bena, Michal Kolcun, Marek Pavlik, Influence of Impurities in Electrical Contacts on Increasing the Efficiency of Energy Transmission. Energies, 7 (15). 2022. pp.2339.
[9] V. Maharshi, A. Agarwal and B. Mitra. Contact Study of MEMS High g Impact Sensor. 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE), New Delhi, India. 2020. pp. 1-4
[10] J. Shi, H. Gu, C. Shi and T. Ma. Research on AC Servo Control System of Medical Centrifuge Based on Fuzzy Adaptive Fractional PID. 2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), Chengdu, China. 2023. pp. 443-446.
[11] A. Winter, N. Mohajer, D. Nahavandi and M. Watson. Kinematic Control of a Human Centrifuge System for Simulation of Aircraft Manoeuvres. 2024 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC), Gold Coast, Australia. 2024. pp. 223-228.
[12] Evgrafov A.N., Tereshin V.A. influence of the control object mass on the stability region. Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. pp. 9-17.
[13] Andrienko, P.A., Evgrafov, A.N., Kozlikin, D.P., Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Graph-Based Structural Analysis of Kinetic Art Mechanisms on the Example of a Moving Horse Mechanism. Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science. 108. 2021. pp. 141-149.
[14] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Khisamov, A.V. Research of high-level control system for centrifuge engine. 2018. International Review of Mechanical Engineering. 12(5), pp. 400-404.
[15] C. Zhao, Z. Hua. Design of Motor Speed Control System Based on STM32 Microcontroller. 2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBE), Yunlin, Taiwan. 2022. pp. 274-276.
[16] Andrienko, P.A., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. About implementation harmonic impact of the resonance method. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 83-90.
[17] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Petrov, G.N. Analysis of the self-braking effect of linkage mechanisms. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119-127.

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ И ТРАНСМИССИИ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-119

И.Е. Люминарский[1], В.В. Баласанян[2], С.Е. Люминарский[3]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СДВОЕННОЙ ВОЛНОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ



[1]Игорь Евгеньевич Люминарский,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (985)988-4292, E-mail: lumie@bmstu.ru.



[2]Вадим Владимирович Баласанян,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (499)951-8059, E-mail: balasanyanvv@student.bmstu.ru.



[3]Станислав Евгеньевич Люминарский,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (916)594-5435, E-mail: lum@bmstu.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы проектирования сдвоенной волновой зубчатой передачи (СВЗП), изготовленной с применением аддитивных технологий. Передаточное отношение СВЗП равно 30, разница чисел зубьев гибкого и жесткого колес в первой ступени – 4. Вторая ступень передачи является зубчатой муфтой. Зубчатые колеса изготовлены из пластика PLA+. Рассмотрены методика расчета упругого взаимодействия элементов передачи и определение основных параметров. Результаты теоретических исследований показали, что одним из основных критериев работоспособности рассматриваемой передачи является величина момента сопротивления на выходном валу, при котором наступает интерференция

зубьев. Приведены условия, которым должны удовлетворять основные параметры передачи.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, гибкое колесо, жесткое колесо, интерференция зубьев, аддитивные технологии.

Введение

На кафедре «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана была спроектирована и изготовлена сдвоенная волновая зубчатая передача, в которой большинство деталей выполнены из полимеров на 3D принтере. В составе передачи из покупных компонентов оставлены подшипники и крепежные детали.

На рис. 1, 2 представлены схема и фотография СВЗП. В первой ступени зубчатый венец гибкого колеса (ГК) зацепляется с неподвижным жестким колесом 5 ($ЖК_1$). Разница чисел зубьев жесткого и гибкого колес здесь равна 4. Во второй ступени передачи зубчатый венец зацепляется с жестким колесом 6 ($ЖК_2$), которое является выходным звеном. Вторая ступень представляет собой волновую зубчатую муфту, числа зубьев жесткого и гибкого колеса в которой равны.

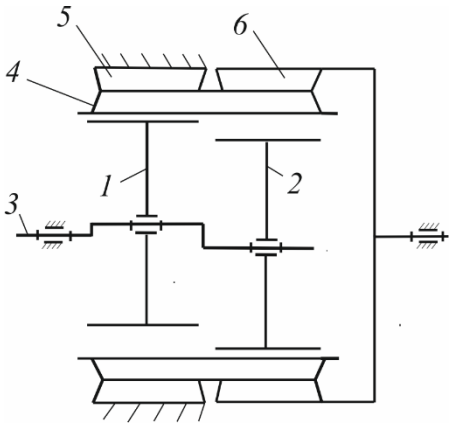


Рис.1. Схема СВЗП:
1, 2 – деформирующие диски; *3* – входной вал; *4* – гибкое колесо; *5, 6* – жесткие колеса



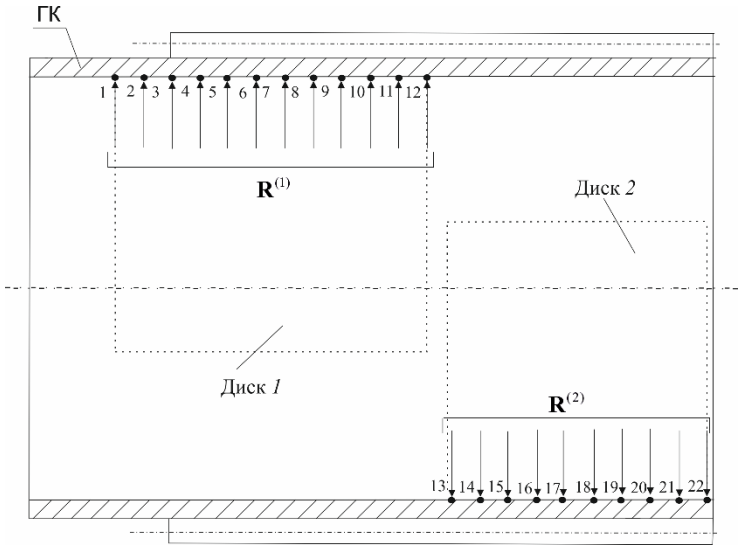
Рис.2. Сдвоенная волновая зубчатая передача (СВЗП)

Цель работы — разработка математической модели СВЗП, учитывающей пространственное упругое взаимодействие элементов передачи, и критериев определения основных параметров передачи. На основе предложенной математической модели проведение теоретических исследований влияния основных параметров на интерференцию зубьев в первой и второй ступенях передачи.

Методы

При расчете упругого взаимодействия элементов передачи поверхностный контакт звеньев заменяется контактами в узловых точках. Ободы жестких колес 5, 6 считаются абсолютно твердыми телами. Упругие деформации зубьев жестких колес определяются методом конечных элементов, деформация гибкого колеса (ГК) 4 – методом прогонки по линейной теории тонких оболочек. В математической модели учитываются также смещения звеньев как жестких тел: диски 1,2 могут поступательно смещаться в плоскости движения, ГК – поступательно смещаться и поворачиваться в указанной плоскости, жесткое колесо второй ступени – только поворачиваться вокруг оси вращения *z*. Поступательное смещение жесткого колеса не учитывается.

На рис. 3 представлена расчетная схема, в которой введены следующие обозначения: $\mathbf{R}^{(1)}$, $\mathbf{R}^{(2)}$ – векторы узловых сил взаимодействия ГК с дисками; $\mathbf{R}^{(3)}$,$\mathbf{R}^{(4)}$ – векторы узловых сил взаимодействия ГК с $ЖК_1$ по рабочим и нерабочим боковым поверхностям зубьев; $\mathbf{R}^{(5)}$, $\mathbf{R}^{(6)}$ – векторы узловых сил взаимодействия ГК с $ЖК_2$ по нерабочим и рабочим боковым поверхностям зубьев.



а

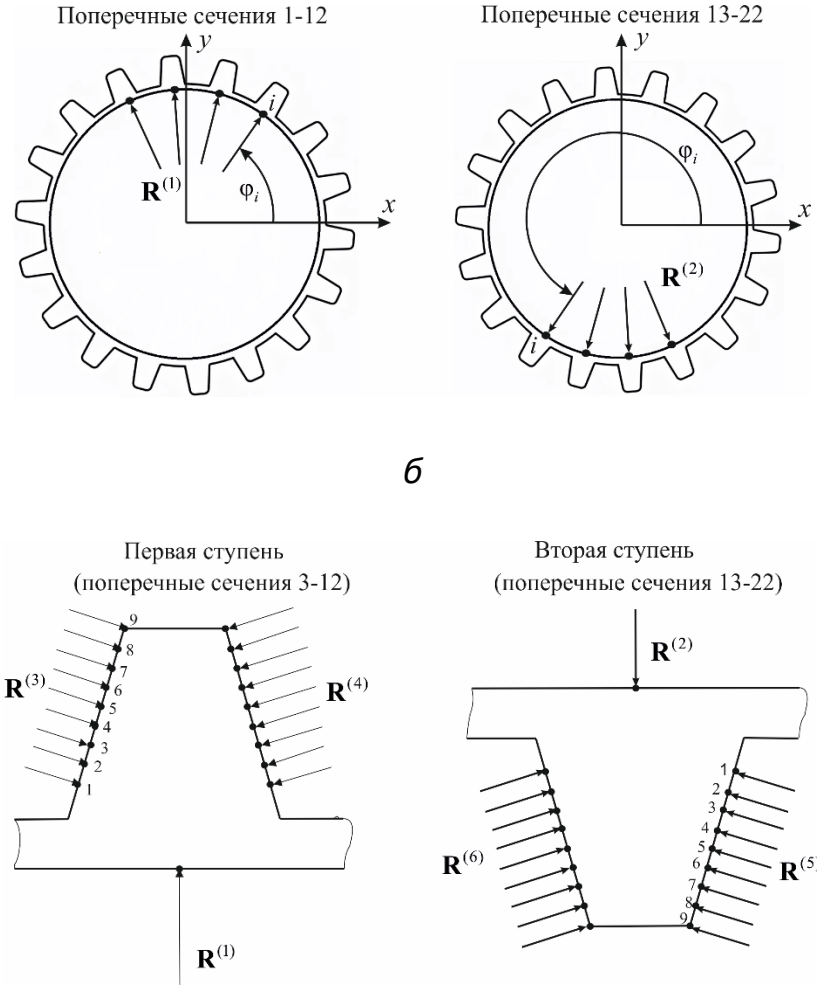


Рис. 3. Расчетная схема взаимодействия элементов СВЗП: *а* – осевое сечение ГК; *б* – поперечные сечения ГК; *в* – поперечные сечения зубьев ГК

Система разрешающих уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \mathbf{\Delta} = -\mathbf{W} + \mathbf{\Delta}_0 + (\mathbf{D} + \mathbf{\Lambda}) \cdot \mathbf{R} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{R} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{M} \\ \Delta_i \geq 0, \quad i = 1, L \\ R_i \geq 0, \quad i = 1, L \\ \Delta_i \cdot R_i = 0 \quad i = 1, L \end{cases}, \qquad (1)$$

где L – количество односторонних связей; $\mathbf{R} = \left(\mathbf{R}^{(1)T}, \mathbf{R}^{(2)T}, \mathbf{R}^{(3)T}, \mathbf{R}^{(4)T}, \mathbf{R}^{(5)T}, \mathbf{R}^{(6)T}\right)^T$ – вектор узловых сил;

$\boldsymbol{\Delta} = \left(\boldsymbol{\Delta}^{(1)T}, \boldsymbol{\Delta}^{(2)T}, \boldsymbol{\Delta}^{(3)T}, \boldsymbol{\Delta}^{(4)T}, \boldsymbol{\Delta}^{(5)T}, \boldsymbol{\Delta}^{(6)T} \right)^T$ – вектор зазоров в узловых точках; $\mathbf{U} = \left(\mathbf{U}^{(d_1)T}, \mathbf{U}^{(d_2)T}, \mathbf{U}^{(g)T}, \mathbf{U}^{(b_2)T} \right)^T$ – вектор смещений звеньев как жестких тел; $\mathbf{U}^{(d_1)}, \mathbf{U}^{(d_2)}$ – векторы смещений дисков *1* и *2*; $\mathbf{U}^{(g)}, \mathbf{U}^{(b_2)}$ – векторы смещений гибкого колеса и жесткого колеса второй ступени; $\boldsymbol{\Lambda} = \mathrm{diag}\left(\boldsymbol{\Lambda}^{(1)}, \boldsymbol{\Lambda}^{(2)}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{0} \right)$ – диагональная блочная матрица, элементами которой являются податливости пружин модели Винклера, учитывающей взаимодействие дисков с ГК; $\mathbf{D}$ – блочная матрица узловых податливостей; $\mathbf{G}$ – блочная матрица, учитывающая смещение упругих звеньев как жестких тел; $\mathbf{W}$ – смещения узловых точек деформирующих дисков; $\boldsymbol{\Delta}_0$ начальные зазоры в односторонних связях; $\mathbf{K} = \mathrm{diag}\left(k_{1F}, k_{1F}, k_{2F}, k_{2F}, 0, 0, 0, 0 \right)$ – вектор радиальных податливостей подшипников деформирующих дисков; $\mathbf{M}$ – вектор внешних нагрузок; M_B – момент сопротивления на выходном валу.

Система (1) решается следующим образом:

1) задаются первые приближения начальных зазоров $\boldsymbol{\Delta}_0$, смещения узловых точек $\mathbf{W}$ деформирующих дисков, радиальных податливостей подшипников податливостей подшипников деформирующих дисков k_{1F}, k_{2F} , момент сопротивления M_B;

2) методом введения восстанавливающих сил определяются реакции $\mathbf{R}$ и зазоры $\boldsymbol{\Delta}$ в односторонних связях, вектор смещения элементов передачи как жестких тел $\mathbf{U}$;

3) уточняются значения начальных зазоров $\boldsymbol{\Delta}_0$, смещений узловых точек дисков $\mathbf{W}$, радиальных податливостей подшипников k_{1F}, k_{1F}.

4) вычисления повторяются с первого пункта до достижения заданной точности расчета.

Работоспособность и эффективность предложенных расчетной схемы и метода расчета подтверждаются многолетним опытом расчета аналогичных задач.

Основные размеры передачи: числа зубьев жестких колес $z_{b1} = 124,\ z_{b2} = 120$; число зубьев ГК $z_g = 120$; модуль *m*=1,25 мм; толщина ГК под зубчатым венцом $h_1 = 1,2$ мм; длина ГК *L*=71 мм; ширина зубчатого венца ГК b_w=56 мм; внутренний диаметр ГК $D = 149,22$ мм; ширина первого диска (*1*) – 33 мм; ширина второго диска (*2*) – 27 мм; ширина жестких колес – 27 мм. Гибкое и жесткое колеса изготовлены из полимера PLA+, модуль упругости которого *E*=1973 Мпа.

Параметры исходного контура: $h_a^* = 1,\ \alpha = 20,\ c^* = 0.25$.

В результате расчетных исследований подбираются следующие параметры:

• x_g, x_{b1}, x_{b2} – коэффициенты смещения гибкого колеса *4* и жестких колес *5*, *6*;

• $h_d^* = h_d / m$ – коэффициент глубины захода зубьев в первой и второй ступенях передачи;

• w_0 – максимальная деформация гибкого колеса;

• R_d – радиус деформирующих дисков;

• e_{b1}, e_{b2}, e_g – коэффициенты ширины впадин жестких зубчатых колес первой и второй ступеней;

• e_g – коэффициент ширины впадины гибкого колеса.

При проведении расчетных исследований выбирались такие значения указанных параметров, при которых интерференция зубьев в первой или второй ступени наступает при наибольшем значении момента сопротивления, и выполняются следующие условия:

1) толщины зубьев по окружности вершин гибкого и жесткого колес больше $0,4m$, где m – модуль зацепления;

2) радиальные зазоры в зубчатых зацеплениях больше $0.2m$;

3) боковые зазоры в зубчатых зацеплениях при нулевой нагрузке равны нулю;

4) в зубчатых зацеплениях отсутствует интерференция первого рода, при которой взаимодействие зубьев происходит на переходной поверхности;

5) в зубчатых зацеплениях отсутствует интерференция второго рода, при которой на входе в зацепление зубья взаимодействуют поверхностями вершин;

6) угол обхвата дисками гибкого колеса $\gamma=60^\circ \ldots 80^\circ$.

Последнее условие используется для определения радиуса деформирующих дисков R_d. Угол обхвата γ определяется путем расчета упругого взаимодействия элементов ненагруженной передачи. Для рассматриваемой передачи получено значение $R_d = 69$ мм.

Результаты

На рис. 4 показано влияние коэффициента смещения ГК на значение момента сопротивления M_C^*, при котором наступает интерференция зубьев в первой (кривая *1*) и второй (кривая *2*) ступенях, и максимальная деформация $w_0 = 2,48$ мм. Коэффициенты смещения жестких колес определялись из условия равенства нулю боковых зазоров при нулевой нагрузке, коэффициент глубины захода зубьев h_d^* принимался максимально возможным. Расчетные исследования показали, что

максимальное значение коэффициента $h_d^* = 1,4$. Из полученных вариантов выбирались варианты с минимально возможными значениями коэффициентов ширины впадин. На графике видно, что для увеличения момента M_C^* необходимо увеличивать коэффициент смещения гибкого колеса.

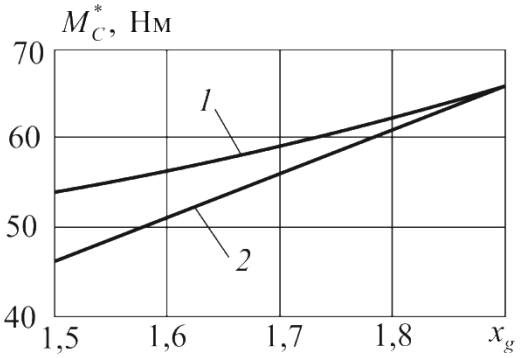


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления, при котором наступает интерференция зубьев, от коэффициента смещения ГК ($w_0 = 2,48$ мм): *1* – первая ступень; *2* – вторая ступень

Расчетные исследования показали, что максимальное значение коэффициента смещения ГК $x_g^{\max}$ уменьшается с ростом глубины захода зубьев (рис.5).

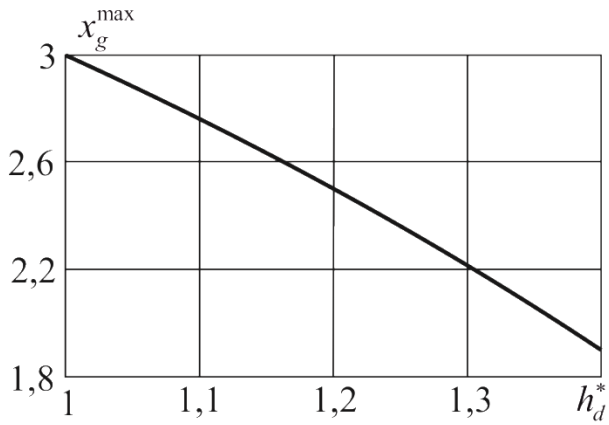


Рис. 5. Зависимость максимального значения коэффициента смещения ГК от коэффициента глубины захода зубьев

Увеличение глубины захода зубьев (рис. 6) приводит к увеличению значений моментов сопротивления, при которых наступает интерференция зубьев в первой и второй ступенях. При определении этой зависимости коэффициент смещения ГК принимался равным максимальному значению $x_g = x_g^{\max}$ по заранее полученному графику (см. рис.5).

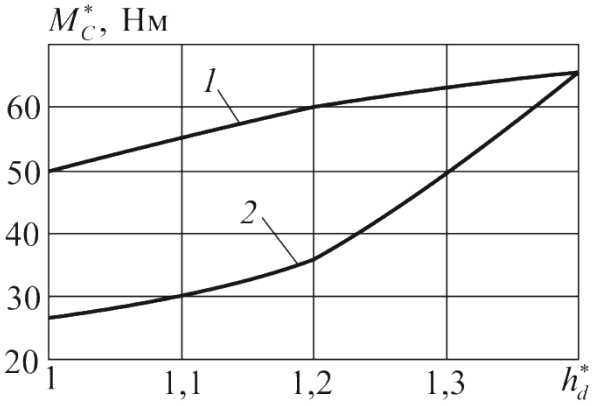


Рис. 6. Зависимость момента сопротивления, при котором наступает интерференция зубьев, от коэффициента глубины захода зубьев ($w_0 = 2,48$ мм): *1* – первая ступень; *2* – вторая ступень

Приведенные на рис. 4, 6 зависимости позволяют предложить последовательность определения значений основных параметров передачи, обеспечивающих максимальное значение момента сопротивления M_C^*, при котором наступает интерференция зубьев.

1. На первом этапе выбираются варианты параметров передачи, в которых коэффициент глубины захода зубьев h_d^* имеет максимальное значение.

2. На втором этапе из полученных вариантов выбирают параметры, в которых коэффициент смещения гибкого колеса x_g имеет максимальное значение.

По предложенной последовательности был определен момент сопротивления M_C^* при различных значениях максимальной деформации гибкого колеса w_0 (рис. 7). Из рисунка видно, что с увеличением максимальной деформации ГК w_0 момент сопротивления, при котором наступает интерференция зубьев, увеличивается в первой ступени и уменьшается во второй ступени. Следовательно, в точке пересечения кривых *1* и *2* (см. рис. 7) момент сопротивления, при котором наступает интерференция зубьев в первой или второй ступенях, принимает максимальное значение. Для рассматриваемой передачи в точке пересечения кривых *1* и *2* получено значение $w_0 = 2,48$ мм.

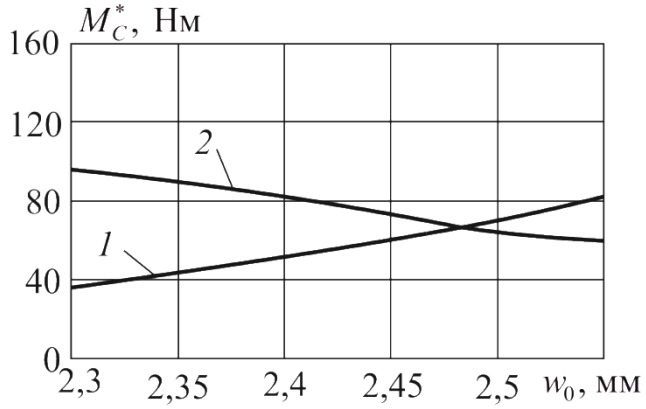


Рис. 7. Зависимость момента сопротивления, при котором наступает интерференция зубьев, от величины максимальной деформации ГК w_0: *1* – первая ступень; *2* – вторая ступень

Обсуждение

В работе рассматривается актуальная проблема удешевления производства волновых редукторов путем их изготовления с применением аддитивных технологий. Исследуется возможность создания двухступенчатого волнового редуктора с коротким гибким колесом и небольшим передаточным отношением $u = 30$, в котором зубчатые колеса выполнены из пластика PLA+.

Заключение

1. Если зубчатые колеса сдвоенной волновой зубчатой передачи с коротким гибким колесом изготовлены из пластика PLA+, то одним из основных показателей работоспособности такой передачи является значение момента сопротивления M_C^* на выходном валу, при котором наступает интерференция зубьев.

2. Для получения максимального значения M_C^* рассматриваемой двухступенчатой волновой зубчатой передачи необходимо:

– принимать максимально возможные значения коэффициента захода зубьев h_d^* и коэффициента смещения гибкого колеса x_g;

– принимать значение максимальной деформации ГК w_0 из условия равенства моментов сопротивления на выходном валу, при которых наступает интерференция зубьев в первой и второй ступенях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Волков Д. П., Крайнев А.Ф. Волновые зубчатые передачи. Киев, Техника, 1976. – 224с.

[2] Гинзбург Е.Г. Волновые зубчатые передачи. Л., Машиностроение, 1969. 159 с.

[3] Иванов М.Н. *Волновые зубчатые передачи.* Москва, Высшая школа, 1981. 184 с.

[4] Шувалов С. А. Теория и автоматизированное проектирование волновых зубчатых передач. Дис. … докт. техн. наук (05.02.02). Москва, 1986. 354 с.

[5] Полетучий А.И. *Теория и конструирование высокоэффективных волновых зубчатых механизмов*. Харьков, НАУ «ХАИ» им. М. Жуковского, 2005. 675 с.

[6] Тимофеев Г. А., Костиков Ю. В., Подчасов Е. О. Волновые зубчатые передачи. Теория и практика. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018, №5, с. 36-43.

[7] Тимофеев Г. А. Проектирование одноступенчатых волновых зубчатых передач и двухступенчатых с волновой муфтой *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016, № 1(670), с. 3-11.

[8] Новиков Е.С., Сильченко П.Н., Тимофеев Г.А., Красавин С.И. Оценка влияния погрешностей изготовления зубчатых передач на качественные показатели приводов летательных аппаратов. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019, №1(706), с. 29-36.

[9] Тимофеев Г.А., Люминарский И.Е., Люминарский С.Е. Математическая модель волновой зубчатой передачи с генератором волн внешнего деформирования. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2023, №7, с. 3-11.

[10] Люминарский И.Е., Люминарский С.Е., Люминарская Е.С. Анализ напряженно-деформированного состояния гибкого колеса волновой зубчатой передачи. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, №4 (360), с. 41–47.

[11] Lyuminarsky I.E., Lyuminarsky S.E., Lyuminarskaja E.S. Mathematical Model of Influence of Geometric Parameters on Wave Gear Teeth Wear // OP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 346(2021) 03016, Issue 1: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021 (ICMTME 2021), 6–10 September 2021, Sevastopol.

[12] Тимофеев Г.А., Костиков Ю.В. Расчет крутильной жесткости волновых зубчатых передач. Вестник машиностроения, 2016, №9, с. 28–31.

[13] Стрельников В.Н., Уваров В.А., Дектярь А.Н. Напряженное состояние диска генератора волн крупной волновой передачи. Стин, 2022, №8, с. 2-5.
[14] Тимофеев Г.А., Тарабарин В.Б., Яминский Н.А. Силовой расчет волновой передачи с дисковым генератором волн. Приводы и компоненты машин, 2023, № 1-3(40), с. 11-13.
[15] Flavius A. Ardelean. 3D modeling of the harmonic drive using "CATIA" . Annalsof the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering. 2007. Vol. VI(XVI). P. 882–885.

I.E. Lyuminarsky, V.V. Balasanian, S.E. Lyuminarsky

DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE DUAL HARMONIC DRIVE

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract

The paper considers the issues of designing a dual wave gear transmission (BWG) manufactured using additive technologies. The gear ratio of the gearshift is 30, the difference in the number of teeth of the flexible and rigid wheels in the first stage is 4. The second stage of the transmission is a gear clutch. The gears are also made of PLA+ plastic. A method for calculating the elastic interaction of transmission elements and determining the main transmission parameters is considered. The results showed that one of the main criteria for the operability of the transmission in question is the magnitude of the moment of resistance on the output shaft, at which interference of the teeth occurs. The main conditions that must be satisfied by the main transmission parameters are considered.

Key words: harmonic drive, flexible gear, rigid gear, tooth interference, additive technologies.

REFERENCES

[1] Volkov D. P., Krainev A.F. Wave gears. Kiev, Technika Publ., 1976. – 224s.
[2] Ginzburg E.G. Wave gears. L., Mashinostroenie, 1969. 159 p.
[3] Ivanov M.N. Wave gears. Moscow, Higher School, 1981. 184 p.
[4] Shuvalov S. A. Theory and computer-aided design of wave gears. Dis. ... doct. Technical Sciences (02/05/02). Moscow, 1986. 354 p.
[5] Poletuchy A.I. Theory and design of highly efficient wave gear mechanisms. Kharkiv, NAU "KHAI" named after M. Zhukovsky, 2005. 675 p.

[6] Timofeev G. A., Kostikov Yu. V., Podchasov E. O. Wave gears. Theory and practice. News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2018, No. 5, pp. 36-43.
[7] Timofeev G. A. Design of single-stage wave gears and two-stage with a wave clutch. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mechanical engineering. 2016, No. 1(670), pp. 3-11.
[8] Novikov E.S., Silchenko P.N., Timofeev G.A., Krasavin S.I. Evaluation of the influence of gear manufacturing errors on the quality indicators of aircraft drives. News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2019, No. 1(706), pp. 29-36.
[9] Timofeev G.A., Luminarskiy I.E., Luminarskiy S.E. Mathematical model of a wave gear transmission with an external deformation wave generator. News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2023, No. 7, pp. 3-11.
[10] Luminarskiy I.E., Luminarskiy S.E., Luminarskaya E.S. Analysis of the stress-strain state of a flexible wave gear wheel Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2023, No. 4 (360), pp. 41-47.
[11] Luminarskiy I.E., Luminarskiy S.E., Luminarskaya E.S. A mathematical model of the influence of geometric parameters on the wear of the teeth of a wave gear // Conference Series OP: Materials Science and Engineering, Volume 346(2021) 03016, Issue 1: International Conference on Current Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021 (ICMTME 2021), September 6-10, 2021, Sevastopol.
[12] Timofeev G.A., Kostikov Yu.V. Calculation of the torsional stiffness of wave gears. Bulletin of Mechanical Engineering, 2016, No. 9, pp. 28-31.
[13] Strelnikov V.N., Uvarov V.A., Dektyar A.N. The stressed state of the disk of the large wave transmission wave generator. Stin, 2022, No. 8, pp. 2-5.
[14] Timofeev G.A., Tarabarin V.B., Yaminsky N.A. Power calculation of wave transmission with a disk wave generator. Drives and components of machines, 2023, No. 1-3(40), pp. 11-13.
[15] Flavius A. Ardelean. 3D modeling of harmonic drive using "CATIA". The Chronicle of the University of Oradea. Faculty of Management and Technological Engineering. 2007. Volume VI(XVI). pp. 882-885.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 623.437.3.093; 629.03; 629.36
doi:10.18720/SPBPU/2/id-120

Р.Ю. Добрецов[1], Н.Н. Демидов[2], А.А. Красильников[3], А.Г. Семенов[4]

ПРЕСЕЛЕКТИВНАЯ КОРОБКА ПЕРЕДАЧ ДЛЯ ТРАНСМИССИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН



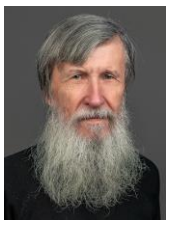
[1]Роман Юрьевич Добрецов, д.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: dr-idpo@yandex.ru



[2]Николай Николаевич Демидов, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: ndemidov51@mail.ru



[3]Андрей Александрович Красильников, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: a_kr36@mail.ru



[4]Александр Георгиевич Семенов, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: 00.agent.007@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрена кинематическая схема вальной коробки передач, позволяющая реализовать алгоритм выбора передачи, предусматривающий гибкую стратегию управления переключением, нехарактерную для традиционных DSG. Описаны основные конструктивные особенности новй коробки передач. Приведены характеристики семейства кинематических схем, к которому относится рассматриваемая коробка передач.

Ключевые слова: автоматическая трансмиссия, скорость переключения, роботизированная вальная коробка передач, трансформирующий механизм.

Введение

Современные преселективные коробки передач Direct-Shift Gearbox (DSG) [1] могут конкурировать с автоматическими гидромеханическими планетарными трансформирующими механизмами по топливной экономичности, расходу масла, массогабаритным характеристикам, скорости переключения, простоте и технологичности конструкции. Однако принцип построения редукторной части DSG позволяет переключаться лишь последовательно на заранее подготовленную передачу: не предусмотрена возможность пропуска передачи, при переключении могут возникать рывки. Для увеличения скорости переключения с передачи n выгодно иметь две подготовленные передачи: смежную повышенную n+1 и смежную пониженную n–1. Однако бинарная логика традиционной DSG это исключает. Сам же по себе принцип известен и реализован, например, в трансмиссии [2]. Данное решение имеет свои недостатки – усложнение конструкции, увеличение масс коробки передач. Пропуск передач при переключении остается нереализуемым.

Переключение передач без разрыва потока мощности в сочетании с автоматизацией управления трансформирующим механизмом – задача актуальная для строительной, транспортной и специальной техники. Большие крутящие моменты, характерные для трансмиссий таких машин, затрудняют масштабирование конструкции DSG и использование подобных коробок передач на специальной технике. Таким образом, поиск новых принципов построения коробок передач с преселективным переключением, адаптированных для работы на строительной и специальной технике, является актуальной проблемой.

Цель работы

Целью работы является создание вальных ступенчатых трансформирующих механизмов, реализующих переключение передач без разрыва потока мощности, способных работать в составе механических и гидромеханических трансмиссий строительных и специальных транспортных машин.

Объект исследования

В работе рассматривается семейство преселективных коробок передач с параллельными грузовыми/промежуточными валами.

Методы

Методологическая основа данного исследования – принципы и методы, характерные для теории колесных и гусеничных машин, расчета и конструирования деталей, узлов и агрегатов трансмиссий, основы теоретической механики и математического анализа.

Результаты

При поиске вариантов кинематической схемы коробки передач были заложены следующие положения.

1. Переключение передач производится на всех режимах переднего и заднего хода без разрыва потока мощности.

2. Изделие разрабатывается для эксплуатации на строительных и специальных транспортных машинах, для которых характерен широкий диапазон изменения сопротивления внешней среды и специфические требования по обеспечению минимальной скорости движения.

3. Изделие преимущественно работает под контролем цифровой системы управления, однако сохраняется и режим управления оператором.

4. На машине, для которой разрабатывается изделие, установлен современный дизельный двигатель с цифровой системой управления.

5. Изделие может входить в состав однопоточной механической или гидромеханической трансмиссии с комплексным гидротрансформатором.

6. Редукторная часть должна позволять реализовать преселективный алгоритм выбора передач, допускать переключение «вниз» и «вверх» с пропуском передачи и допускать трогание с места не на первой передаче.

Требованию положения 1 удовлетворяют планетарные коробки передач [3], вальные коробки с сухим сдвоенным сцеплением (DSG) и классическими синхронизаторами [1, 2], вальные коробки передач с индивидуальным включением режимов с помощью фрикционных элементов управления (ФЭУ) [4].

Положение 2 позволяет не прибегать к тяговому расчету с целью определения числа передач, а исходить из известных закономерностей: для строительных и специальных машин характерно наличие двух-трех технологических передач (минимальная скорость на первой передаче не превышает скорости пешехода, если иное не обусловлено дополнительными требованиями) и 4-7 передач транспортного назначения. «Технологический» и «транспортный» диапазоны могут перекрываться [4]. Принцип разбивки передач на данном этапе нас не интересует. Итого, число передач прямого хода не превышает девяти, число передач заднего хода не превышает трех. Для трансмиссий строительных и специальных машин характерны большие значения передаваемого крутящего момента. Это делает предпочтительным использование дисковых муфт, работающих в масле.

Положение 3 позволяет сохранить число передач прямого хода более семи (тенденции современного рынка автоматических трансмиссий оче-

видны: число передач определяется не требованиями тягового расчета, а соображениями топливной экономичности и может составлять 8-12). При реализации алгоритмов ручного управления часть передач придется, по-видимому, сделать для водителя недоступными (опыт эксплуатации быстроходных гусеничных машин показал, что при ручном переключении число передач прямого хода не должно превышать семи). Приводы ФЭУ должны обеспечивать качественную работу под контролем цифровой системы управления – то есть следует предусмотреть электромеханическое или электрогидравлическое управление. Учитывая положение 1, выбор делается в пользу электрогидравлических систем с возможностью управления буксованием ФЭУ [5-8] (замкнутые или следящие системы управления силой сжатия пакета дисков на основе принципа широтно-импульсной модуляции давления в гидроприводе).

Положение 4 обязывает предусмотреть возможность совместной работы электронных блоков управления двигателем и трансмиссией, интеграции их в бортовую сеть *CAN*. Современные двигатели (в частности, семейство ЯМЗ-500) характеризуется наличием «широкой полки» постоянного крутящего момента. Этому диапазону частот соответствует и «полка» максимальной экономичности. При наличии девяти передач прямого хода представляется возможным распределить передаточные отношения так, чтобы на большинстве режимов двигатель работал с минимальным расходом топлива.

Наличие гидротрансформатора (положение 5) поможет увеличить плавность работы трансмиссии, реализовать часть работы буксования в моменты переключения режимов, изменит значения передаточных отношений ступеней коробки передач. Однако, уменьшение числа передач (см. комментарий к положению 3) не представляется целесообразным. Положение 5 указывает на то, что предпочтение следует отдать кинематической схеме, допускающей более свободное варьирование передаточных чисел режимов. К сожалению, планетарный редуктор не всегда такое варьирование допускает без изменения кинематической схемы.

Положению 6 в наибольшей степени удовлетворяют планетарные редукторы. Однако имеется семейство кинематических схем вальных коробок передач [9-12], наилучшим образом удовлетворяющее всем перечисленным положениям.

На рис. 1 представлена упрощенная кинематическая схема вальной коробки передач. Отличительным признаком семейства схем, к которым принадлежит данная, является наличие параллельных грузовых/промежуточных валов [9, 12]. Отобранная схема имеет четыре таких вала, позволяет реализовать 9 передач прямого хода и до трех передач заднего хода. Переключение происходит без разрыва потока мощности. Число степени свободы равно трем.

Крутящий момент поступает от силового агрегата на входной вал *О*. Если в коробке передач не включен ни один ФЭУ, связанный с валом *О,* реализуется нейтраль.

Грузовые/промежуточные валы обозначены, соответственно, *A*, *B*, *C*, *R*. Суммирование потоков мощности, проходящих по этим валам, происходит на сумматоре. В простейшем случае это – блок шестерен с неподвижными осями. При наличии вала *R*, однако, предпочтительно подключать его к сумматору через дифференциальный механизм. Кроме того, в конструкции ФЭУ C_R целесообразно применить положения, сформулированные в публикации [13].

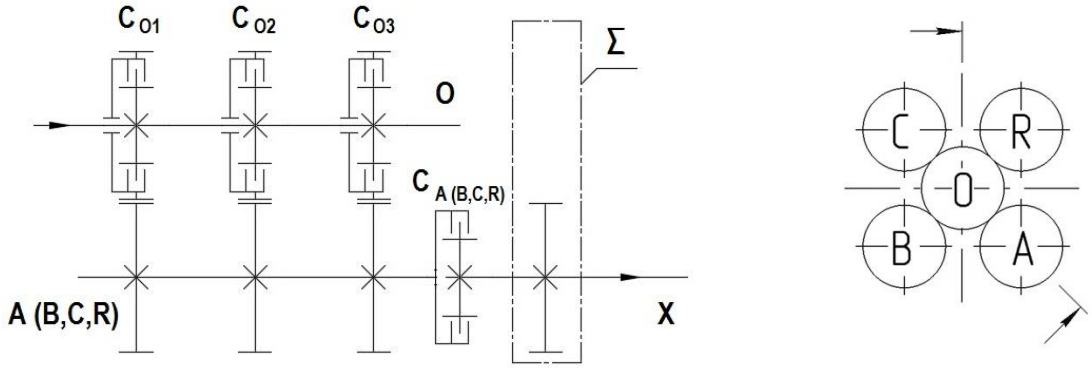


Рис. 1. Упрощенная кинематическая схема коробки передач: O, X, A (B,C,R) – входной, выходной, параллельные грузовые валы; $C_{O1...O3}$ и $C_{A(B,C,R)}$ – дисковые муфты на входном и грузовых валах; Σ – суммирующий редуктор

Трогание с места в штатном режиме предусматривается на второй передаче, при этом включается ФЭУ C_{O1} и ФЭУ, соединяющий вал данной передачи с выходным валом X – C_B. Работа буксования рассеивается между двумя одновременно буксующими ФЭУ. Если в состав силового агрегата входит гидротрансформатор, то работа буксования рассеивается на нем.

С момента включения C_{O1} к оперативному включению подготовлены смежные передачи – первая и третья. При наборе скорости и переключении «вверх» можно пропускать передачи (редукторная часть это допускает), соответствующим образом организовав алгоритм переключения.

При переключении в пределах первой-третьей передач достаточно синхронно отключать ФЭУ текущей передачи и плавно подключать ФЭУ смежной передачи. Поэтому в гидравлической системе и следует предусмотреть управление буксование дисков ФЭУ. Но в момент включения третьей передачи нужно «подготовить» ко включению четвертую передачу. Для этого следует включить ФЭУ C_A . При включении четвертой передачи плавно выключается ФЭУ C_{O1}, включается C_{O2}. Разрыва потока мощности не происходит.

Если для интенсификации разгона требуется понизить передачу (режим kick down) кинематическая схема редуктора позволяет это сделать – вопрос лишь в отладке алгоритма управления.

Аналогично, возможен и пропуск передач, как при переключениях «вверх», так и при переключениях «вниз». На рис. 2 показаны сечения коробки передач плоскостями нормальными осям валов в областях ФЭУ C_{O1},

C_{O2}, C_{O3}. Цифрами 1-9 обозначены номера передач прямого хода, $R_{1\text{-}3}$ – передач заднего хода.

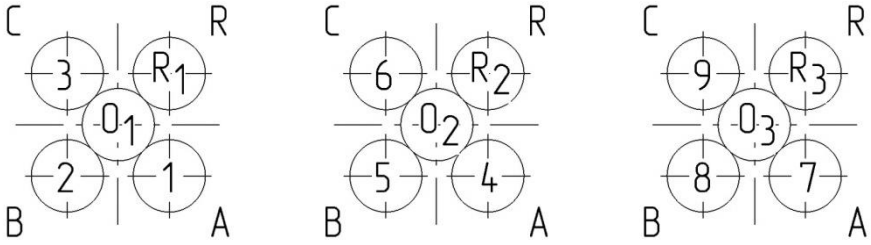


Рис. 2. Группы передач: A,B,C,R –параллельные грузовые валы; 1…9 и $R_{1...3}$ – шестерни ведомые передач прямого и заднего хода; $O_{1...3}$ – ведущие шестерни трех групп передач

Особенность рассматриваемого семейства кинематических схем – в необходимости выносить передачи заднего хода на отдельный вал. На рис. 1 этот вал обозначен R. На нем возможно размещение от одной до трех шестерен. Число передач заднего хода определяется техническим заданием. Для большинства машин оптимальным является наличие двух передач заднего хода, первая из которых является по существу технологической, а вторая – транспортной.

В таблице 1 приведен порядок включения ФЭУ для коробки передач, выполненной по схеме рис. 1.

Таблица 1. Включаемые ФЭУ

	C_{O1}	C_{O2}	C_{O3}	C_A	C_B	C_C	C_R
1	×			×			
2	×				×		
3	×					×	
4		×		×			
5		×			×		
6		×				×	
7			×	×			
8			×		×		
9			×			×	
R1	×						×
R2		×					×
R3			×				×

Конкретизация массогабаритных характеристик транспортного средства, условий его эксплуатации, введение специальных требований могут оказать существенное влияние на потребное число передач. А значит, представленная на рис. 1 схема не является вполне универсальной и оптимальной для всех видов строительных и специальных транспортных машин. Однако, сам принцип организации таких схем делает их конкурентоспособными по сравнению со схемами планетарных коробок передач. Рас-

сматриваемое семейство схем может быть разбито на две подгруппы – схемы с тремя и четырьмя степенями свободы.

Подгруппа схем с тремя степенями свободы наглядно представлена вариантом на рис. 1. Другое число передач может быть получено, например, с помощью иной периферии грузовых валов (табл. 2).

Таблица 2. Семейство кинематических схем АКПП с тремя степенями свободы

№ п/п	Число ФЭУ на ведущем валу, k	Число грузовых валов, n	Число режимов работы, Z	Общее число ФЭУ, Y	Общее число валов, N
1	2	2	4	4	3
2	2	3	6	5	4
3	2	4	8	6	5
4	2	5	10	7	6
5	2	6	12	8	7
6	3	2	6	5	3
7	3	3	9	6	4
8	3	4	12	7	5
9	3	5	15	8	6
10	3	6	18	9	7
11	4	2	8	6	3
12	4	3	12	7	4
13	4	4	16	8	5
14	4	5	20	9	6
15	4	6	24	10	7

Ожидаемые преимущества предлагаемых схем:

• короткие, жесткие валы с минимальным числом ФЭУ;

• простая, симметричная кинематическая схема;

• компактность;

• широкие возможности варьирования передаточных отношений режимов;

• передаточные отношения режимов независимы друг от друга;

• возможность унифицировать ведомые валы, большинство деталей и узлов;

• возможность применять с гидродинамической передачей и любым двигателем, устанавливая согласующий редуктор на входе и корректируя передаточное отношение сумматора;

• любой ведомый вал можно использовать для получения группы передач заднего хода и (при установке дополнительного ФЭУ, связанного с ведущим валом) для создания двухпоточной трансмиссии.

В последнем случае вместо гидрообъемной передачи можно использовать более дешевый, но функционально конкурентоспособный фрикционный механизм [5, 6, 14].

Ожидаемые недостатки:

• на каждой передаче включен ФЭУ на ведомом валу (включение целесообразно осуществлять без нагрузки);

• наличие массивного сумматора;

• число передач заднего хода целесообразно делать равным числу передач, получаемом на одном валу;

• при работе коробки передач грузовые валы постоянно вращаются;

• затруднен доступ к ФЭУ ведущего вала при ремонте.

Передаточное отношение на выбранном режиме работы:

$$u = \omega_0 / \omega_x = u_\Sigma \sum_{k=1}^{p} \left(u_{jxk} h_{jxk} \right).$$

Здесь ω_0 и ω_x – угловые скорости ведущего и ведомого валов; u_{jxk} – передаточные отношения для зацеплений грузовых валов с промежуточным ($k = \overline{1, p}$, в рассматриваемом примере p=5); h_{jxk} – коэффициент, принимающий значение 1, если на данном режиме используется пара шестерен с индексом jx, или 0, если пара не используется; u_Σ – передаточное отношение сумматора. В общем случае $u_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \left(u_{\Sigma i} h_{\Sigma i} \right)$.

Обозначим N_0 – число ФЭУ на ведущем валу.

Для кинематических схем семейства выполняются следующие соотношения:

• число режимов работы: $Z = N_0 \cdot p$;

• число ФЭУ: $Y = N_0 + p$;

• число валов в коробке передач при простейшей конструкции суммирующего редуктора: $N = p + 1$.

Применение коробок передач, построенных на основе группы схем по табл. 2 может быть рационально при относительно небольшом числе режимов работы. Сохраняя изложенные принципы построения схем, предлагается ввести дополнительный промежуточный вал и увеличить число степеней свободы редукторной части до четырех.

На рис. 3 приведена упрощенная кинематическая схема коробки передач, реализующей 24 режима работы. Используется девять дисковых ФЭУ. При работе коробки передач мощность передается с входного вала через муфту C_{o1} или C_{o2} и связанную с муфтой пару шестерен на промежуточный вал. Коробка имеет четыре параллельных грузовых вала. Используемый на данном режиме работы грузовой вал соединяется с суммирующем редуктором Σ через включенную муфту C_{xi} ($i = \overline{1, n}$ – номер грузового вала; в рассматриваемом примере n=4). Мощность передается на используемый грузовой вал через муфту $C_{1...3}$, и соответствующую пару шестерен. Далее мощность передается на выходной вал через суммирующий редуктор. В простейшем случае выходным валом является один из грузовых валов, а суммирующий редуктор представляет собой блок шестерен с осями неподвижными в пространстве. Таким образом, коробка передач при использовании в таком режиме имеет четыре степени свободы. Параллельных потоков мощности в ней нет.

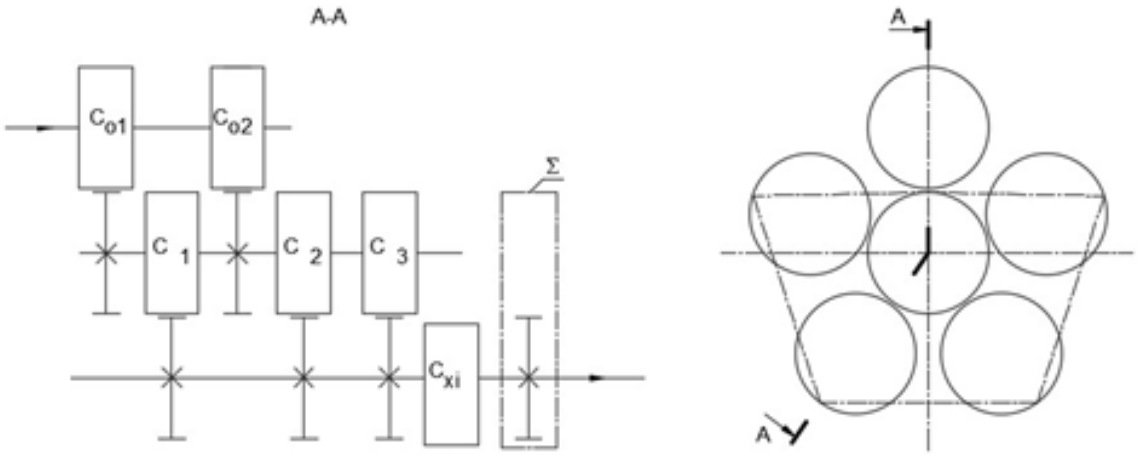


Рис. 3. Упрощенная кинематическая схема коробки передач с четырьмя степенями свободы: показано расположение валов в пространстве; C_{o1} и C_{o2} , $C_{1...3}$, C_{xi} – соответственно, дисковые муфты на входном, промежуточном, используемом грузовом валах; Σ – суммирующий редуктор

В табл. 3 приведены параметры семейства схем, для которого имеют место следующие зависимости.

Передаточное отношение на выбранном режиме работы:

$$u = \omega_0 / \omega_x = \left[u_{01} h_{01} \left(u_{1x1} h_{1x1} + u_{1x2} h_{1x2} + ... \right) + u_{02} h_{02} \left(u_{2x1} h_{2x1} + u_{2x2} h_{2x2} + ... \right) \right] u_\Sigma =$$

$$= u_\Sigma \sum_{j=1}^{m} u_{0j} h_{0j} \left(\sum_{k=1}^{p} \left(u_{jxk} h_{jxk} \right) \right) .$$

Здесь u_{0j} – передаточное отношение для одной из $j = \overline{1,m}$ пар шестерен, связывающих ведущий вал с промежуточным (в данном примере m=2); h_{0j} – коэффициент, принимающий значение 1, если на данном режиме используется пара шестерен с индексом $0j$, или 0, если пара не используется.

Таблица 3. Семейство коробок передач с четырьмя степенями свободы при числе режимов работы Z≤36

№ п/п	m	p	n	Z	Y	N	№ п/п	m	p	n	Z	Y	N	№ п/п	m	p	n	Z	Y	N
1	2	2	2	8	6	4	7	2	3	4	24	9	6	13	3	3	2	18	8	4
2	2	2	3	12	7	5	8	2	3	5	30	10	7	14	3	3	3	27	9	5
3	2	2	4	16	8	6	9	2	4	2	16	8	4	15	3	3	4	36	10	6
4	2	2	5	20	9	7	10	2	4	3	24	9	5	16	3	3	5	45	11	7
5	2	3	2	12	7	4	11	2	4	4	32	10	6	17	3	4	2	24	9	4
6	2	3	3	18	8	5	12	2	4	5	40	11	7	18	3	4	3	36	10	5

Число режимов работы: $Z = m \cdot p \cdot n$.

Число ФЭУ: $Y = m + p + n$.

Число валов в коробке передач при простейшей конструкции суммирующего редуктора: $N = n + 2$.

Если семейство схем представить, как планарный граф, то можно заметить, что наибольшее число режимов работы при минимальном числе ФЭУ и валов даст решение, при котором реализуется «троичное ветвление» в вершинах графа: на ведущем и промежуточном валу располагается по три ФЭУ, число грузовых валов (и, соответственно, число муфт C_{xi}) также равно трем.

Увеличение числа передач делает более выраженным ухудшение массогабаритных характеристик вальной коробки передач. Представляется, что при числе режимов более 24 целесообразно отказаться от вальной схемы. Дальнейшее развитие вопроса использования коробок передач с параллельными грузовыми валами связано с обеспечением их совместной работы с управляемыми механизмами распределения мощности [15, 16] и в составе гибридных трансмиссий [17].

Выводы

1. Коробка передач для строительных и транспортных машин может быть в первом приближении унифицирована по следующим параметрам: число передач прямого хода – до девяти, из которых первые две-три используются, как технологические; число передач заднего хода – не более трех. Переключение передач должно осуществляться без разрыва потока мощности, следует обеспечить пропуск передач при работе коробки в автоматическом режиме.

2. Для использования на строительных и специальных транспортных машинах при принятых базовых гипотезах являются вальные коробки передач с параллельными грузовыми/промежуточными валами. Дополнительным их преимуществом по сравнению с планетарными коробками передач оказываются простота и технологичность изготовления.

3. При увеличении числа режимов работы по крайней мере до 24 целесообразно использовать рассмотренные схемы вальных коробок передач с четырьмя степенями свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Volkswagen Technical Site. https://vwts.ru/index. php?p =page05_02e.
[2] Forsyth, J.R., Pat. US 7,552,658 B2 USA. Three clutch powersift transmission; Magna Powertrain Inc.. – Appl No 11/626,420; Field. 24.01.2007 ; Prior publication date 20.09.2007.
[3] Автоматические коробки передач / Харитонов С.А. – М.: ООО «Издательство Аристель», ООО «Издательство АСТ», 2003. – 335 с.
[4] Теория и расчет трактора "Кировец" / Е.А. Шувалов, А.В. Бойков, Б.А. Добряков, М.Г. Пантюхин ; Под ред. А.В. Бойкова. – Ленинград : Машиностроение, 1980 . – 208 с.
[5] Porshnev, G.P. ect,. The estimation of main parameters of the power plant and electromechanical powertrain for the wheeled vehicle,. International

Review of Mechanical Engineering. 2020. vol. 14 (2), pp. 139-145. https://doi.org/10.15866/ireme.v14i2.18262.
[6] Dobretsov, R.Y., Uvakina, D.V. The Mechatronic Device Impulse Control in Vehicle Powertrains. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. p. 63-73. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_7.
[7] Didikov R.A. ect, About the possibility of using the hydraulic actuator in the mechanism of power distribution. *Vestnik AAI*, 2016, N5(100), pp. 30-32.
[8] Demidov, N.N. ect, 2019. Friction turning mechanisms in two-thread transmissions of transport tracked vehicles. Tractors and agricultural machines, vol 1, pp. 60-69.
[9] Bukashkin A.Yu. etc. Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox. Procedia Engineering Vol. 206 (2017). Pp 1728-1734.
[10] Dobretsov, R., Semenov, A. Multi-shaft gearbox "Chamomile": pat. 2 658 474 Ros. Federation : IPK51 F16H 3/095, F16H 3/097, No. 2017113579, application No. 19.04.2017, publ. 21.06.2018, Bul. No. 18..
[11] Hoodorozhkov, S.I., Krasilnikov A.A., Gubachev M.S., 2021. Optimization of an algorithm for automatic control of transmission in a wheeled tractor. International journal of automotive and mechanical engineering (IJAME), vol. 18, №3, 2021, pp. 9051-9060. https://doi.org/10.15282/ijame. 18.3.2021.17.0694.
[12] Abyzov, O., Galyshev, Y. ect. Stationary test complex for vehicle and tractor gearboxes International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2020. vol. 14, №2, (2020). pp. 127-132. https://doi.org/10.15866/ ireme.v14i2.18267.
[13] Пат. RU 2618661 C1 Российская Федерация. Бесфлаттерная многодисковая фрикционная муфта для соединения валов привода с возможностью разнонаправленного их вращения / Лозин А.В., Добрецов Р.Ю., Семенов А.Г. // 2016112846; заявл. 04.04.2016; опубл. 05.05.2017. Бюл. №13.
[14] Demidov, N.N. ect, 2020. Friction Steering Devices as an Object of Impulse Control. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 49-62.
[15] Didikov R.A. etc. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox: Management of the Power Distribution Mechanism. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). - 2018. - Vol. 12, №. 9 pp. 790-796.
[16] Didikov R.A. etc. Power Distribution Control in the Transmission of the Perspective Wheeled Tractor with Automated Gearbox. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 692. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Springer International Publishing AG, 2018. 1367 p. Pp. 192-200.
[17] R. Dobretsov, M. Gubachev, I. Naletov and A. Vasiliev. On the way to driverless road-train: Digital technologies in modeling of movement, calculation and design of a road-train with hybrid propulsion unit. IV Interna-

tional Scientific Conference “The Convergence of Digital and Physical Worlds: Technological, Economic and Social Challenges” (CC-TESC2018). 2018. Pp.1-9.

R.Y. Dobretsov, N.N. Demidov, A.A. Krasilnikov, A.G. Semenov

TRANSMISSION OF CONSTRACTION AND TRANSPORT VEHICLES WITH PRESELECTIVE GEARBOX

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers a kinematic scheme for a shaft gearbox. This scheme allows implementing a gear selection algorithm providing a flexible strategy for shift control, uncharacteristic for traditional preselective direct-shift gearboxes (DSG). Adjacent modes are prepared for use by shifting gears. Shifts can be performed with skipping gears. The control is automatic, and it is also possible to manually select the gear. Other transmission components (mechanical or hydrodynamic) can be series-connected to this gearbox. The scheme allows to implement 9 forward gear modes and up to 3 reverse gear modes in a roller gearbox. The control elements of the gearbox are individual oil friction disk clutches. The friction clutches are primarily electrohydraulic-actuated, with the option for pulse-width pressure modulation. The main aspects of the novel gearbox designed are briefly described. We have given the characteristics for the family of kinematic schemes to which the gearbox belongs, proposing the expressions that allow to relate the number of shafts, controls and possible operating modes of the gearbox. The main advantages and disadvantages of the schemes are given and briefly and briefly analyzed.

Key words: automatic transmission, direct-shift gearboxes, robotic shaft gearbox, transforming mechanism.

REFERENCES

[1] Volkswagen Technical Site. https://vwts.ru/index. php?p =page05_02e (accessed: 11/30/2021).
[2] Forsyth, J.R., Pat. US 7,552,658 B2 USA. Three clutch powersift transmission; Magna Powertrain Inc.. – Appl No 11/626,420; Field. 24.01.2007 ; Prior publication date 20.09.2007.
[3] Kharitonov S.A. ect. Automatic transmissions. Publishing House Aristel: LLC "Publishing House AST", 2003. 335 p.
[4] Shuvalov, E.A. ect,. Theory and calculation of the tractor "Kirovets". Leningrad: Mashinostroenie. 1980

[5] Porshnev, G.P. ect. The estimation of main parameters of the power plant and electromechanical powertrain for the wheeled vehicle,. International Review of Mechanical Engineering. 2020, vol. 14 (2), pp. 139-145. https://doi.org/10.15866/ireme.v14i2.18262
[6] Dobretsov, R.Y., Uvakina, D.V. The Mechatronic Device Impulse Control in Vehicle Powertrains. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. p. 63-73. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_7.
[7] Didikov, R.A. ect. On the possibility of using a hydraulic drive in a power distribution mechanism. Bulletin of the AAI. 2016, vol 5(100), pp. 30-32.
[8] Demidov, N.N. ect, 2019. Friction turning mechanisms in two-thread transmissions of transport tracked vehicles. Tractors and agricultural machines, vol 1, pp. 60-69.
[9] Bukashkin A.Yu. ect, 2017. Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox. Procedia Engineering, vol. 206, pp 1728-1734. https://doi.org/10.1016/j.proeng. 2017.10.705
[10] Dobretsov, R., Semenov, A. Multi-shaft gearbox "Chamomile": pat. 2 658 474 Ros. Federation : IPK51 F16H 3/095, F16H 3/097, No. 2017113579, application No. 19.04.2017, publ. 21.06.2018, Bul. No. 18.
[11] Hoodorozhkov, S.I., Krasilnikov A.A., Gubachev M.S., 2021. Optimization of an algorithm for automatic control of transmission in a wheeled tractor. International journal of automotive and mechanical engineering (IJAME), vol. 18, №3, 2021, pp. 9051-9060. https://doi.org/10.15282/ijame. 18.3.2021.17.0694
[12] Abyzov, O., Galyshev, Y. ect,. Stationary test complex for vehicle and tractor gearboxes International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2020. vol. 14, №2, (2020). pp. 127-132. https://doi.org/10.15866/ ireme.v14i2.18267
[13] Lozin, A. ect. A flutterless multi-disc friction clutch for connecting drive shafts with the possibility of multidirectional rotation. Pat. RU 2618661 C1 Russian Federation, No 2016112846, application 04.04.2016, publ. 05.05.2017, Bul. No 13.
[14] Demidov, N.N. ect, 2020. Friction Steering Devices as an Object of Impulse Control. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 49-62. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_6
[15] Didikov, R.A., Galyshev, Y. ect, 2018. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox: Management of the Power Distribution Mechanism. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), vol. 12, No. 9, pp. 790-796. https://doi.org/doi.org/10.15866/ ireme.v12 i9.15646
[16] Didikov, R.A. ect, 2018. Power Distribution Control in the Transmission of the Perspective Wheeled Tractor with Automated Gearbox.Advances in Intelligent Systems and Computing. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. vol. 692. Springer International Publishing AG, 1367 p. pp. 192-200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1

[17] Dobretsov R., Gubachev M., Naletov I. and Vasiliev A. On the way to driverless road-train: Digital technologies in modeling of movement, calculation and design of a road-train with hybrid propulsion unit. IV International Scientific Conference “The Convergence of Digital and Physical Worlds: Technological, Economic and Social Challenges” (CC-TESC2018). 2018. Pp.1-9

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 629.3.023.1:007.52
doi:10.18720/SPBPU/2/id-121

Р.Ю. Добрецов[1], А.А. Красильников[2],
Н.Н. Демидов[3], А.Г. Семенов[4], К.Н. Серов[5]

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОТОЧНОГО КОЛЕСНОГО РЕДУКТОРА ПОРТАЛЬНОГО МОСТА ДЛЯ ТРАКТОРОВ СЕМЕЙСТВА «КИРОВЕЦ»



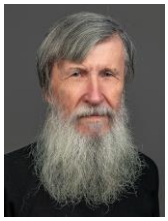
[1] Роман Юрьевич Добрецов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: dr-idpo@yandex.ru



[2] Андрей Александрович Красильников, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: a_kr36@mail.ru



[3] Николай Николаевич Демидов, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: ndemidov51@mail.ru



[4] Александр Георгиевич Семенов, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: 00.agent.007@mail.ru



[5] Кирилл Николаевич Серов, аспирант,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: spielberg080@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос расчетной оценки чисел зубьев и выбора значений межосевых расстояний для кинематической схемы неуправляемого однорядного вального колесного редуктора, в котором мощность передается от ведущей шестерни к шестерне выходного вала через две промежуточные (паразитные) шестерни. Преимуществом такой схемы является снижение нагрузок в зубчатых зацеплениях и симметричное распределение реакций. Необходимость выполнения оценочных расчетов была вызвана затруднением применения при проектировании традиционных пакетов «*KISSoft*» и «Компас». Семейство тракторов «Кировец» выбрано, поскольку для него рассматривается вопрос замены ведущих колес гусеничными модулями, что ведет к увеличению высоты расположения центра тяжести шасси и возникает потребность в проектировании портального моста.

Ключевые слова: силовая передача, трансмиссия трактора, передаточное отношение, корригирование

Введение

Портальные мосты более характерны для конструкции специальных автомобилей, в случае необходимости увеличить дорожный просвет [1], и для городских автобусов, где применяются для понижения уровне пола в салоне. За рубежом портальные мосты различных конструкций выпускаются серийно (например, мост от производителя *Zahnrad Fabrik* [2]). Применительно к конструкции трактора портальный мост может быть востребован при проектировании специальных тракторов (например, трактор для работы на чайной плантации или в случае установки на полноприводный колесный трактор треугольных гусеничных модулей.

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая типичный состав ведущего моста.

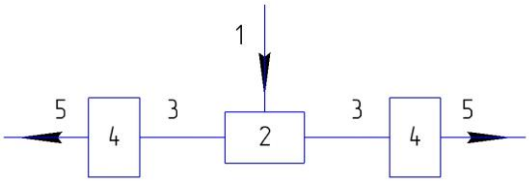


Рис. 1. Агрегаты трансмиссии в составе портального моста (остановочные тормоза условно не показаны): 1 – подвод мощности от карданной передачи; 2 – редуктор (главная передача и механизм распределения мощности); полуось; 4 – колесный редуктор; 5 – отвод мощности к ведущему колесу

В качестве механизма распределения мощности 2 в практике находят широкое применение дифференциалы с повышенным внутренним трением

[3], симметричные конические блокируемые дифференциалы [4] и устройства на основе механизмов свободного хода (см., например, монографию [5]). Собственно эффект коррекции значения дорожного просвета достигается для портального моста в основном за счет компоновки колесных редукторов ось ведомого вала 5 смещена по вертикали вверх или вниз относительно оси ведущего вала. Поэтому при выборе кинематической схемы колесного редуктора в первую очередь обращают внимание на обеспечение необходимого межосевого расстояния для этих валов. Как правило, в конструкции моста применяются схемы неуправляемых одноступенчатых редукторов с неподвижными в пространстве осями вращения звеньев (вальные редукторы). Но для увеличения передаточного отношения могут использоваться и двухступенчатые редукторы, как вальные, так и вально-планетарные.

Управляемый колесный редуктор находит применение на специальных шасси (см., например, авторское свидетельство [6]), но для тракторов высоких тяговых классов их применение затруднительно ввиду больших крутящих моментов, действующих на этом участке трансмиссии.

Большая нагруженность колесного редуктора трактора заставляет искать кинематические схемы, обеспечивающие более равномерное распределение реакций на опорах валов, увеличение долговечности (за счет, например, применения плавающих звеньев), уменьшение нагрузок в зацеплениях. Одним из актуальных вариантов является схема с двумя промежуточными шестернями (рис. 2). Специфической трудностью при проектировании редуктора по такой схеме оказалась невозможность применить традиционное программное обеспечение (пакеты «*KISSoft*» [7] и «Компас» [8]) – для такой схемы не предусмотрены типовые программные решения.

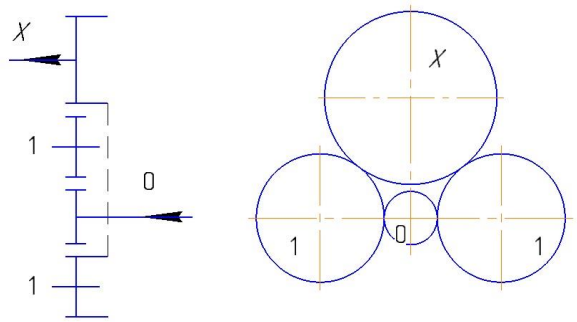


Рис. 2. Упрощенная кинематическая схема колесного редуктора (слева) и взаимное расположение шестерен (справа): 0, 1, *X* – ведущее, промежуточные, ведомое звенья

В данной статье представлены результаты анализа геометрических закономерностей, характерных для кинематических схем такого типа.

Методы

Использованы методы, характерные для дисциплины «Теория машин и механизмов» в сочетании с подходами, адаптированными для использования в тракторостроении (см. основные работы [9, 10, 11, 12, 13, 14], ходовой части колесной машины [14], теории движения трактора [15,16,17].

Результаты

В редукторе, выполненном по кинематической схеме, показанной на рис. 2, поток мощности разветвляется между промежуточными шестернями. Даже с учетом неравномерности распределения крутящего момента, это обеспечивает существенное (практически в два раза) снижение нагрузки на зацепление без необходимости применять меры по увеличению длины линии контакта (см., например, монографию [18]).

Промежуточные шестерни установлены симметрично относительно ведущей, оси вращения располагаются на единой горизонтали: распределение реакций симметрично, ведущую шестерню можно выполнить плавающей, что улучшит условия работы зацепления.

Недостатком представляется необходимость обеспечить большие диаметры промежуточных шестерен. На рис. 3 приведена расчетная схема, из которой видно, что провести нужные геометрические построения возможно, только если размеры промежуточных и ведомой шестерни соизмеримы.

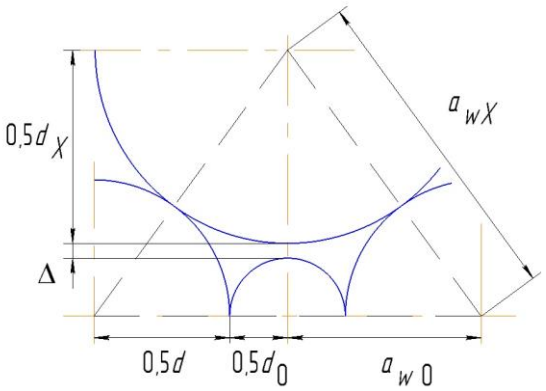


Рис. 3. Расчетная схема колесного редуктора в составе портального моста (вал и шестерни межбортовой связи условно смещены): d_0, d, d_X – делительные диаметры ведущей, промежуточных и ведомой шестерен; a_{w0}, a_{wX} – межосевые расстояния для зацеплений ведущей и промежуточной, промежуточной и ведомой шестерен; Δ – зазор между ведущей и ведомой шестернями

Передаточное отношение редуктора определяется зависимостью:

$$u = Z_x / Z_0 = d_x / d_0 > 0 .$$

Используемые обозначения расшифрованы в подписи к рис. 3.

Межосевые расстояния для пар шестерен:

$$a_{w0X} = 0,5d_0 + \Delta + 0,5d_x ;$$

$$a_{w0} = 0,5d + 0,5d_0 ;$$

$$a_{wX} = 0,5d + 0,5d_x .$$

Значение зазора Δ между ведущей и ведомой шестернями будет влиять на гидродинамические потери в редукторе, хотя не так существенно, как в планетарных коробках передач. Из опыта проектирования можно предполагать, что следует обеспечить $\Delta \geq 4$ мм.

Из геометрических соотношений справедлива запись:

$$a_{wX}^2 = a_{w0}^2 + a_{w0X}^2 .$$

Последнюю зависимость можно представить, как функцию делительных диаметров шестерен:

$$\left(0,5d + 0,5d_x\right)^2 = \left(0,5d + 0,5d_0\right)^2 + \left(0,5d_0 + \Delta + 0,5d_x\right)^2 .$$

В такой форме зависимость связывает все геометрические характеристики и позволяет выбирать интересующие их комбинации. Выражение может быть представлено также в виде:

$$\left(d + ud_0\right)^2 = \left(d + d_0\right)^2 + \left(d_0\left[1 + u\right] + 2\Delta\right)^2 .$$

Например, при заданном значении зазора Δ и известных значениях u и d_0 , можно вычислить геометрически совместимый делительный диаметр для промежуточных шестерен:

$$d = \frac{\left(d_0\left(u+1\right) + 2\Delta\right)^2 - d_0^2\left(u^2 - 1\right)}{2d_0\left(u - 1\right)} > 0 .$$

Полученное значение делительного диаметра в общем случае будет дробным. При изготовлении зубчатых колес придется применить коррегирование (см., например, справочники [9; 10, 11]). Выбрать параметры зацепления будет возможно и с помощью программных пакетов.

В некоторых случаях, в частности, в учебном процессе, представляет интерес продемонстрировать возможность проектирования шестерен без корригирования. Поскольку $d_j = mZ_j$ (где m – модуль зацепления), можно записать:

$$Z \simeq \frac{\left(Z_0\left(u+1\right) + 2\Delta/m\right)^2 - Z_0^2\left(u^2 - 1\right)}{2Z_0\left(u - 1\right)}, \quad Z \in \mathbf{N} .$$

Используя последнее выражение можно выбрать целые значения для *Z*, изменяя значения Δ. При этом, естественно, следует обеспечить $\Delta > 0$ и проводить округления до ближайшего целого (хотя бы потому, что при расчете на компьютере по данной формуле неизбежно накопление ошибки

вычислений).

С использованием представленных зависимостей были проведены расчеты для перспективного колесного редуктора, проектируемого для грузового автомобиля. На производстве выбор параметров проводился с использованием итерационного процесса. Предлагаемый подход позволил получить, как частный случай, и заводской результат (Z_0=22, u=2,5, m=2,8 мм, Z=71, отклонение по значениям межосевых расстояний – не более 1,2%). Однако, аналитический подход позволяет найти сочетания чисел зубьев, при реализации которых не требуется корригирования и дает варианты с шагом для промежуточной шестерни в один зуб.

На рис. 4 (слева) в качестве примера приведен вид зависимости значения зазора Δ между ведущей и ведомой шестерней в зависимости от числа зубьев Z на промежуточной шестерне. При расчетах зафиксированы значения Z_0=22, u=2,5, m=2,8. Результаты расчетов показывают, что зависимость близка к линейной, но линейной не является. Для демонстрации нелинейного характера зависимости $\Delta(Z)$ построен отрезок прямой – хорда, описываемая уравнением вида $y = kZ + b$ и стягивающая точки на границах расчетного интервала.

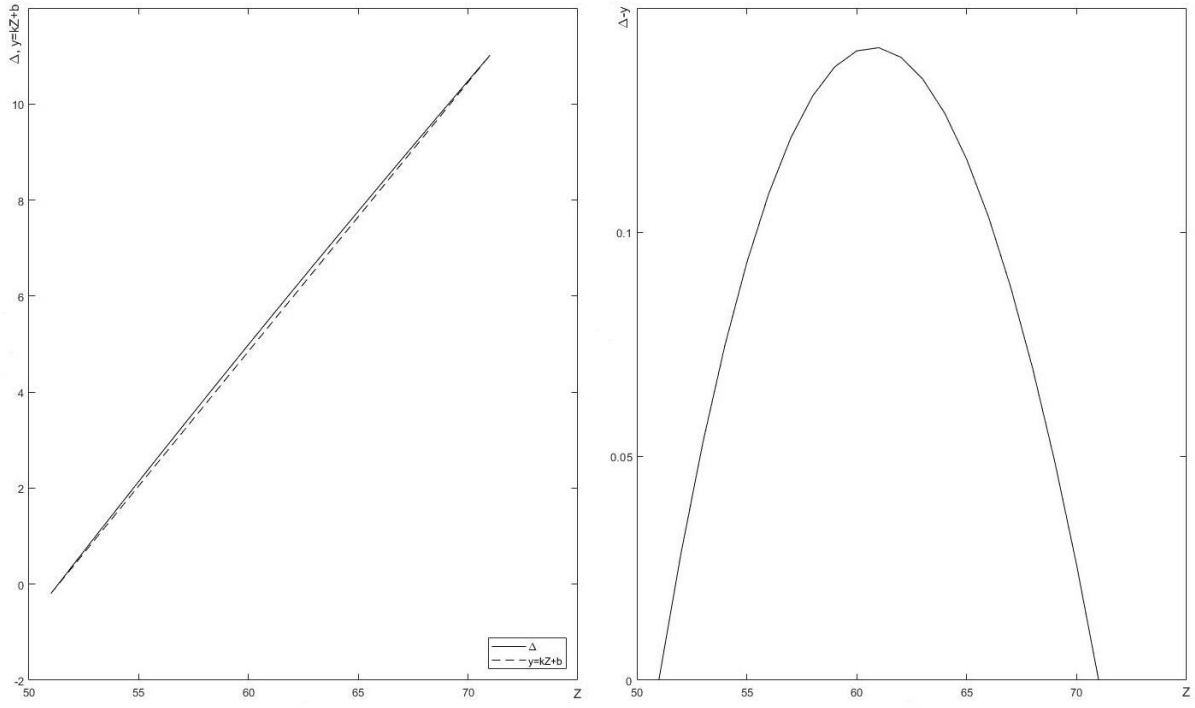


Рис. 4. Вид расчетной зависимости значения зазора между ведущей и ведомой шестернями Δ от числа зубьев на промежуточной шестерни Z при фиксированных значениях Z_0 и u в сравнении с прямой, построенной через края рассмотренного интервала (слева); иллюстрация нелинейности графика $\Delta(Z_0)$ – ошибка по функции (справа)

На рис. 4 (справа) приведен график значений рассогласования функций $\Delta(Z)$ и $y = kZ + b$. Отклонение закономерно достигает максимума в середине

интервала: функция $\Delta(Z)$ является квадратичной параболой, что соответствует математической постановке рассматриваемой задачи.

В практическом случае для оперативной оценки поведения $\Delta(Z)$ представляется достаточным произвести расчеты на границах интервала и аппроксимировать рассматриваемую функцию хордой.

Для тракторов серии К-7М Петербургского тракторного завода с целью снижения положения центра тяжести после установки треугольных гусеничных модулей вместо пневматических ведущих колес, можно провести аналогичные расчеты. Существенной будет разница в значении модуля зацепления (предполагается использовать шестерни с m=6,0 мм).

Задавая Z_0=15, u=3,0, получаем ряд вариантов, из которых предпочтительной представляется реализация значений Z=71, a_{w0}=118,250 мм и a_{wX}=200,750 мм, Δ=38,477 мм.

Уточненные расчеты можно будет произвести по окончании проектирования треугольного гусеничного модуля.

Обсуждение

Наиболее вероятный сценарий использования портальных мостов оригинальной конструкции на тракторах К-5 и К-7М – компенсация увеличения высоты расположения центра тяжести при установке треугольного гусеничного движителя.

При этом портальный мост должен иметь передаточное отношение, обеспечивающее заданные тягово-динамические характеристики трактора после модернизации.

Портальный мост с колесным редуктором рассмотренной конструкции применим и в составе гибридной электромеханической трансмиссии, в случае, если ТЭД подключается, например, к коробке передач [19,20,21,22,23].

Сходная задача определения геометрических параметров размещения шестерен и выбора числа зубьев существует для так называемых «коробок передач с параллельными грузовыми валами» (см. патенты [24,25]), по принципам построения близкими к вальным коробкам с сухим сдвоенным сцеплением (DSG) [26]. Предполагается, что подходы, предложенные при работе над редуктором, удастся использовать и для упомянутого семейства трансформирующих механизмов с целью упрощения проектирования, а в перспективе – снижения затрат на производство.

В настоящее время результаты работы используются в учебном процессе при реализации в Высшей школе транспорта ООП магистратуры «Наземные транспортно-технологические комплексы» [27,28] и планируется дальнейшее развитие темы.

Заключение

Таким образом, есть основания предполагать, что результаты могут быть применены в практике отечественного тракторостроения. При этом в качестве потенциального промышленного партнера рассматривается в первую очередь АО «Петербургский тракторный завод».

По результатам работы можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложенные принципы могут быть использованы при разработке портального ведущего моста для грузовых автомобилей, автобусов, тракторов, в том числе – в случае использования на шасси с шарнирно-сочлененной рамой треугольных гусеничных модулей.
2. При проектировании конструкции портального моста представляется возможным применить апробированные методы, основы которых изучаются в учебном процессе, например, при подготовке магистров и специалистов в Высшей школе транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета.
3. Проектирование и производство рассмотренных редукторов и портальных мостов в целом, может быть локализовано на производственной базе АО «Петербургский тракторный завод»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Селифонов В.В., Бирюков М.К. Устройство и техническое обслуживание грузовых автомобилей. М. : Издательский центр «Академия», 2013. 400 с.

[2] URL: https://5koleso.ru/avtopark/vyhod-na-publiku-noveyshie-razrabotki-zf-dlya-avtobusov/?ysclid=lod877rzzv932556925 (дата обр. 15.04.2024).

[3] Решетов Л.Н. Кулачковые механизмы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1953. – 428 с.

[4] Андреев А.В., Ванцевич В.В., Лефаров А.Х. Дифференциалы колесных машин / Под ред. Лефарова А.Х. М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.

[5] Пилипенко М.Н.. Механизмы свободного хода. М., Л.: Изд-во «Машиностроение», 1966. – 288 с.

[6] А.с. СССР № 329044. Двухступенчатая коробка передач привода колеса транспортной машины: опубликовано 09.11.1972/ Г.П. Корепанов, М.И. Маленков, П.С. Сологуб, В.И. Комисаров, В.И. Койнаш, Г.И. Рыков и Е.Н. Друян. – Текст: электронный.

[7] 7 https://kisssoft.compmechlab.ru/article/proektirovanie-i-raschet-reduktora

[8] https://kompas.ru/kompas-educational/publications/books/?ysclid=m77yosu54d262070334
[9] Планетарные передачи. Справочник. Под ред. докторов техн. наук В.Н. Кудрявцева и Ю.. Кирдяшева. Л.: «Машиностроение», 1977. – 536 с.
[10] Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении. М.: «Машгиз», 1962. – 532 с.
[11] Справочник по корригированию зубчатых колес. Под ред. канд. техн. наук И.А. Болотовского. М.: «Машиностроение», 1967. – 576 с.
[12] Fischer R The Automotive Transmission Book, Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Najork, R., Pollak, B. // ISBN 978-3-319-05262-5, ISBN 978-3-319-05263-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-05263-2, © Springer International Publishing Switzerland 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, © 2015.
[13] Шеломов В.Б. Проектирование наземных транспортно-технологических машин. Планетарные коробки передач. Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 31 с.
[14] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.
[15] Павлов В.В., Кувшинов В.В. Теория движения многоцелевых гусеничных и колесных машин. Чебоксары : ООО «Чебоксарская типография №1», 2011. 424 с.
[16] Основы теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с.
[17] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
[18] Вулгаков Э.Б. Зубчатые передачи с улучшенными свойствами. Обобщенная теория и проектирование. – М.: «Машиностроение», 1974. – 264 с.
[19] Поршнев Г.П., Добрецов Р.Ю., Красильников А.А. Трансмиссия с электромеханической передачей для тракторов и дорожно-строительных машин. Известия МГТУ МАМИ. 2020. №2 (44). С. 33-41.
[20] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 с.
[21] Belko V., Glivenko, ect., "Current Pulse Polarity E D.ffect on Metallized Film Capacitors Failure," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 6, pp. 1020-1025, June 2017. DOI: https://doi.org/ 10.1109/TPS.2017.2703947
[22] Belko V.O., Emelyanov O.A., Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design (2016) Journal of Applied Physics, 119 (2), статья № 024509
[23] Belko V.O., Petrenya Y.K., ect., "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of

Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800-802. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657272
[24] Многовальная коробка передач «Ромашка» : 2658474 C1 Рос. Федерация / Р.Ю. Добрецов, А.Г. Семенов; заявитель и патентообладатель СПбПУ. – №2017113579; заявл. 19.04.2017; опубл. 21.06.2018.
[25] Пат. RU 2 723 206 Российская Федерация. Преселективная коробка передач "Ромашка-3Ф" для трансмиссий транспортных средств / Добрецов Р.Ю., Семенов А.Г. // 2019123556; заявл. 25.07.2019; опубл. 09.06.2020. Бюл. №16 – 15 с.
[26] Конструктивные особенности и история появления роботизированных трансмиссий с двумя сцеплениями Коваленко О.И., Колодяжный И.А., Казак В.В., Минасян Г.А. Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 5. С. 60-66.
[27] Добрецов Р.Ю.. Гибридные технологии обучения в магистратуре: проектирование мобильных энергетических платформ. Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 29-40.
[28] Dobretsov R., Krasilnikov A., ect., The use of a hybrid form of education in the master’s program on the example of the discipline “fundamentals of digital design of mobile energy platforms. AIP Conf. Proc. 3102, 020026 (2024). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0199902

R.Yu. Dobretsov, A.A. Krasilnikov,
N.N. Demidov, A.G. Semenov, K.N. Serov

FEATURES OF THE CHOICE OF PARAMETERS OF THE WHEEL GEARBOX OF THE PORTAL AXEL FOR TRACTORS OF THE KIROVETS LINEUP

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article considers the issue of calculating of teeth and choosing the values of the axial distances for the kinematic scheme of an uncontrolled single-row wheeled gearbox, in which power is transferred from the drive gear to the gear of the output shaft through two intermediate gears. The advantage of this scheme is the reduction of loads in the gears and the symmetrical distribution of reactions. The need to perform evaluation calculations was caused by the difficulty of using the traditional programs in the design process. The Kirovets tractor line up was chosen because it considers replacing the driving wheels with

tracked modules, which leads to an increase in the height of the chassis center of gravity and a need to design a portal axels.

Key words: power plant, transmission, chassis, movement system, power distribution

REFERENCES

[1] Selifonov V.V., Biryukov M.K. Device and maintenance of trucks. Moscow : Publishing center "Academy", 2013. 400 p.. (rus.)
[2] URL: https://5koleso.ru/avtopark/vyhod-na-publiku-noveyshie-razrabotki-zf-dlya-avtobusov/?ysclid=lod877rzzv932556925 (дата обр. 15.02.2025).
[3] Решетов Л.Н. Кулачковые механизмы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1953. – 428 с.
[4] Андреев А.В., Ванцевич В.В., Лефаров А.Х. Дифференциалы колесных машин / Под ред. Лефарова А.Х. М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
[5] Пилипенко М.Н.. Механизмы свободного хода. М., Л.: Изд-во «Машиностроение», 1966. – 288 с.
[6] А.с. СССР № 329044. Двухступенчатая коробка передач привода колеса транспортной машины: опубликовано 09.11.1972/ Г.П. Корепанов, М.И. Маленков, П.С. Сологуб, В.И. Комисаров, В.И. Койнаш, Г.И. Рыков и Е.Н. Друян. – Текст: электронный.
[7] URL: https://kisssoft.compmechlab.ru/article/proektirovanie-i-raschet-reduktora (дата обр. 15.02.2025).
[8] URL: https://kompas.ru/kompas-educational/publications/books/?ysclid=m77yosu54d262070334 (дата обр. 15.02.2025).
[9] Планетарные передачи. Справочник. Под ред. докторов техн. наук В.Н. Кудрявцева и Ю.. Кирдяшева. Л.: «Машиностроение», 1977. – 536 с.
[10] Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении. М.: «Машгиз», 1962. – 532 с.
[11] Справочник по корригированию зубчатых колес. Под ред. канд. техн. наук И.А. Болотовского. М.: «Машиностроение», 1967. – 576 с.
[12] Fischer R The Automotive Transmission Book, Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Najork, R., Pollak, B. // ISBN 978-3-319-05262-5, ISBN 978-3-319-05263-2 (eBook) DOI 10.1007/978-3-319-05263-2, © Springer International Publishing Switzerland 2015, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, © 2015.
[13] Shelomov V.B. Design of ground transportation and technological machines. Planetary gearboxes. St. Petersburg : POLYTECH PRESS, 2019. 31 p. (rus.)
[14] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.
[15] Pavlov V.V., Kuvshinov V.V. Theory of motion of multi-purpose tracked and wheeled vehicles. Cheboksary : Cheboksary Printing House No. 1 LLC, 2011. 424 p. (rus.)

[16] Fundamentals of the theory and calculation of a tractor and a car. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p.
[17] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
[18] Вулгаков Э.Б. Зубчатые передачи с улучшенными свойствами. Обобщенная теория и проектирование. – М.: «Машиностроение», 1974. – 264 с.
[19] Porshnev G.P., Dobretsov R.Yu., Krasilnikov A.A. Transmission with electromechanical transmission for tractors and road construction machines. Izvestiya MGTU MAMI. 2020. No.2 (44). pp. 33-41. (rus.)
[20] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 с.
[21] Belko V., Glivenko, ect., "Current Pulse Polarity E D.ffect on Metallized Film Capacitors Failure," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 6, pp. 1020-1025, June 2017. DOI: https://doi.org/ 10.1109/TPS.2017.2703947
[22] Belko V.O., Emelyanov O.A., Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design (2016) Journal of Applied Physics, 119 (2), статья № 024509
[23] Belko V.O., Petrenya Y.K., ect., "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800-802. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657272
[24] Многовальная коробка передач «Ромашка» : 2658474 C1 Рос. Федерация / Р.Ю. Добрецов, А.Г. Семенов; заявитель и патентообладатель СПбПУ. – №2017113579; заявл. 19.04.2017; опубл. 21.06.2018.
[25] Пат. RU 2 723 206 Российская Федерация. Преселективная коробка передач "Ромашка-3Ф" для трансмиссий транспортных средств / Добрецов Р.Ю., Семенов А.Г. // 2019123556; заявл. 25.07.2019; опубл. 09.06.2020. Бюл. №16 – 15 с.
[26] Конструктивные особенности и история появления роботизированных трансмиссий с двумя сцеплениями Коваленко О.И., Колодяжный И.А., Казак В.В., Минасян Г.А. Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 5. С. 60-66.
[27] Добрецов Р.Ю.. Гибридные технологии обучения в магистратуре: проектирование мобильных энергетических платформ. Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 29-40. (rus.)
[28] Dobretsov R., Krasilnikov A., ect., The use of a hybrid form of education in the master’s program on the example of the discipline “fundamentals of digital design of mobile energy platforms. AIP Conf. Proc. 3102, 020026 (2024). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0199902

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.893
doi:10.18720/SPBPU/2/id-122

А.И. Рудской[1], А.Я. Башкарев[2], В.Ю. Лебедева[3]

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ



[1]Андрей Иванович Рудской,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:(812)552-6757, E-mail:rector@spbstu.ru



[2]Альберт Яковлевич Башкарев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)950-3715, E-mail: bashkarev@spbstu.ru .



[3]Виктория Юрьевна Лебедева,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(931)292-4945, E-mail: bessonova.viktoria@yandex.ru.

Аннотация

В связи с перспективностью применения в узлах трения тонкослойных полимерных покрытий обосновывается необходимость дополнительных исследований физико-механических свойств полиамидов, способных создавать прочные адгезионные соединения с металлической подложкой. Теоретически и экспериментально доказывается, что при расчете контактных напряжений в подшипниках скольжения при толщине полимерного слоя менее 1 мм его деформацию можно не учитывать.

Ключевые слова: узлы трения, подшипники скольжения, полимерные покрытия, контактные напряжения

Введение

Особенность работы узлов трения тяжело нагруженных механизмов, например, строительных машин, таких как экскаваторы, дробильно-сортировочное оборудование и других, заключается в том, что для них характерны высокие нагрузки при относительно небольших скоростях скольжения. Автономность расположения затрудняет создание для них системы принудительной смазки, поэтому приходиться применять консистентную смазку или материалы, способные работать в режимах сухого трения. Примеры таких узлов – это гусеничные тележки экскаваторов, ковшевые и транспортные цепи, шарниры рабочего оборудования и т.д.

Соединения, работающие в режимах пластической смазки и сухого трения, по величине контактных напряжений мало отличаются. Различие лишь в величине сил трения и соответствующей создаваемых ими касательных напряжений.

Для подшипников скольжения, где применяются монолитные полимерные втулки, расчет контактных напряжений разработан и не вызывает трудности. При этом деформация металлических частей в конструкции узла в расчет не принимается.

Главным разрушающим фактором узлов трения с антифрикционными полимерными вкладышами являются возникающие в них под воздействием рабочих нагрузок высокие контактные напряжения. Пропорционально им возрастает сила трения, повышается температура, что приводит к снижению прочности их соединения с металлической подложкой, если они применяются в виде антифрикционного покрытия.

Большинство термопластичных полимерных материалов, например, полиамиды, которые благодаря хорошим антифрикционным свойствам и способности образовывать прочные адгезионные соединения со многими металлами наиболее часто применяются в узлах трения в виде тонкослойных покрытий.

Благодаря мало толщине полимерного слоя улучшается отвод, выделяемого при трении тепла, уменьшается его деформация, снижается стоимость изготовления, особенно, если возникает необходимость применять уникальные дорогостоящие полимерные композиты. Особенно важна простота процесса нанесения покрытий, например с помощью мелкодисперсных полимерных порошков. Такую технологию можно применять в любых механических мастерских, что дает возможность восстанавливать изношенные поверхности деталей в непосредственной близости с местом эксплуатации механизмов, транспортирование которых связано с большими трудностями [1-4].

Естественно, возникает вопрос о несущей способности полимерного слоя в узлах трения, воспринимающих нагрузки аналогичные металлическим антифрикционным материалам. Считается, что благодаря малой величине модуля упругой деформации полимеров, величина контактных напряжений оказывается значительно меньше, чем в металлической паре трения.

С полимерным тонкослойным покрытием, соединенным адгезионными связями с металлом, это задача пока не имеет общепризнанного решения.

При рассмотрении механизма деформирования полимерных материалов следует принимать во внимание, что при общепринятой стандартной форме образцов значительная часть их деформации — это перераспределение объема материала. Применительно к условиям тонкослойного покрытия возможность такой пластической деформации ограничено адгезионным соединением с металлической подложкой, т.е. имеет место характерное трехосное, т.е. объемное сжатие без перемещения полимера в зоне контакта трущихся поверхностей.

Расчетная схема нагружения узла трения с полимерным покрытием, нанесенным на внутреннюю поверхность втулки, изображена на рисунке 1, где A – радиус внешней поверхности покрытия, B – радиус адгезионного соединения, $в$ – монтажный зазор, R – радиус стального вала, β - половина угла контакта, u_0 – максимальное радиальное перемещение полимера, r и θ – полярные координаты, O – центр втулки, O_1 – центр вала после деформации полимерного слоя, P – нагрузка на узле трения, приведенная к единице длины.

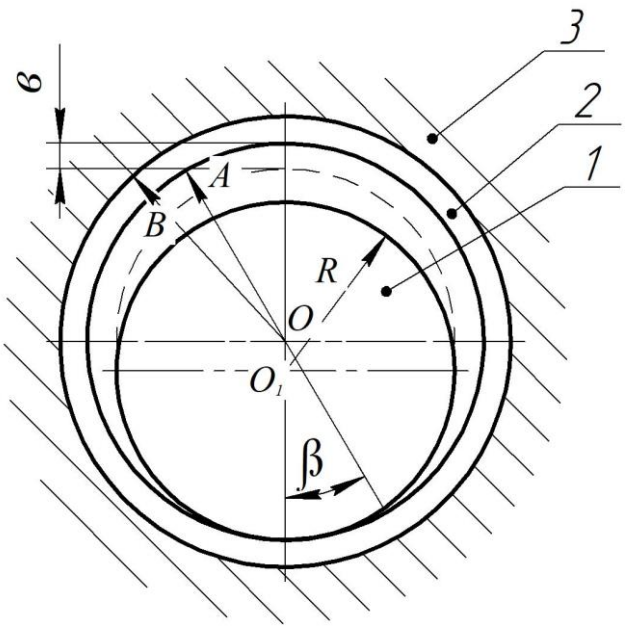


Рис. 1. Расчетная схема для подшипника скольжения с полимерным покрытием: 1 – вал, 2 – полимерный слой, 3 – металлическая подложка

С использованием методики Раевского А.С. [1] для несжимаемых полимерных материалов, когда коэффициент Пуассона μ равен 0,5, применительно к рассматриваемой задаче (рисунок 1) в работе, было получено уравнение для определения угла контакта 2β:

$$\frac{P}{4G_{в}} = \frac{6\mu}{1+\mu} \cdot \frac{2A^2B^2}{B^4 - A^4 - 4A^2B^2 \ln\frac{B}{A}}\left(\sin\beta - \beta\cos\beta\right) + \\ + \frac{(B^2 - A^2)^2 + \frac{6\mu}{1+\mu}(B^2 + A^2)^2}{B^4\left(2\ln\frac{B}{A} - 1\right) + A^4\left(2\ln\frac{B}{A} + 1\right)}\left(\sin\beta - \beta\cos\beta\right) \quad (1)$$

Но это выражение представляет решение задачи, при условии деформации только полимерного слоя, а материал подложки и контртела принимаются абсолютно жесткими. Такая расчетная модель может быть при достаточно большей толщине полимерного слоя, т.е. значительно более 1 мм.

Методы

Исследование деформативных свойств полимерного слоя.

Среди известных марок полиамидных материалов наименьший модуль упругости имеют смолы П-54, П-66/6. По справочным данным его нижний предел может доходить до 400 МПа. Однако деформативные свойства полиамидов существенно зависят от технологии их переработки, поскольку ее режимы предопределяют их надмолекулярные структуры, степень термодеструкции молекул и т.д.

Процесс нанесения покрытий с точки зрения термо-временного воздействия на материал имеет свою выраженную специфику. Как правило, здесь используются более высокие температуры, чем, например, при изготовлении дателей методами литья, но при этом продолжительность теплого воздействия оказывается значительно короче. Большое влияние оказывают также кислород воздуха и структурообразующее воздействие металлической подложки.

Таким образом, проводить измерение и исследование деформативных характеристик полиамидов применительно к тонкослойным покрытиям целесообразно только на образцах, сформированных на металлической основе при идентичных технологических режимах.

В связи с этим в данной работе была использована специальная методика, согласно которой значения коэффициентов Пуассона и

квазистатического модуля упругости устанавливались по результатам испытания на сжатие и сдвиг непосредственно металлополимерных образцов, изображенных на рисунке 2.

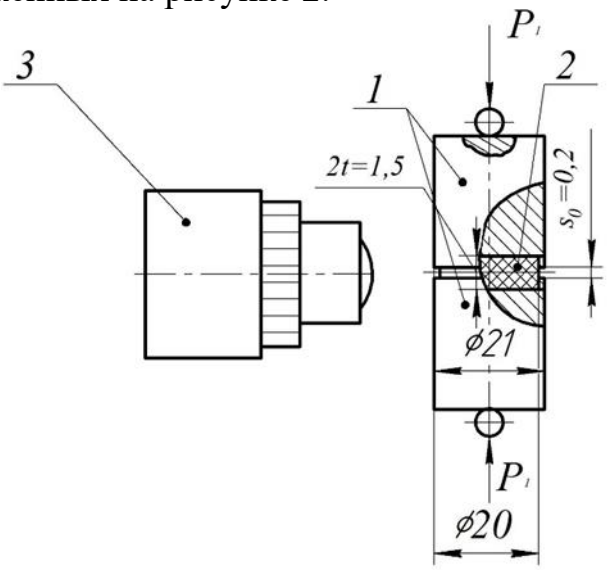


Рис. 2. Испытание полимерного слоя на сжатие: 1 – стальные цилиндры, 2 – полимерный слой, 3 – измерительный микроскоп

Полиамидное покрытие наносилось на их торцы, которыми они после его оплавления соединялись. Предложенные и примененные способы и установки для нанесения покрытий описаны в работах [5-9]. После остывания и удаления наплывов отвержденного полимера образцы нагружались по схеме, изображенной на рисунке 2.

Наличие адгезионных связей, конфигурация образцов и малая величина зазор S_0 исключали возможность перемещения «запертого» материала в поперечном направлении, поэтому деформация слоя при нагружении образцов происходила за счет изменения объема материала. Устранялось влияние торцевого трения, проявляющееся при испытании на сжатие монолитных образцов. Абсолютная погрешность измерения деформации полимерного слоя с помощью использованного микроскопа составляла $0{,}6 \cdot 10^{-3}$ мм.

Решение осесимметричной задачи теории упругости о перемещениях упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием сжимающих сил P_I, находилось при помощи бигармонической функции $\psi = \psi(r, z)$, удовлетворяющей граничным условиям задачи [10-12].

Искомые величины напряжений и перемещений, выраженные через бигармоническую функцию ψ, определялись следующими соотношениями:

$$2Gu = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} \tag{2}$$

$$2Gw = 2(1-\mu)\nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \tag{3}$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z}\left[(2-\mu)\nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}\right] \tag{4}$$

где: u – радиальные перемещения, w – осевые перемещения, σ_z – нормальные напряжения сжатия, $\vec{\nabla}$ – оператор Лапласа, G – модуль сдвига материала покрытия, μ – коэффициент Пуассона.

Условия равновесия полимерного слоя под действием сжимающей нагрузки P_I имеет вид:

$$P_I = \int_0^R \int_0^{2\pi} r\sigma_z dr d\Theta \tag{5}$$

Функция перемещений ψ принята в виде суммы полиномов Лежандра третьей степени [13]:

$$\psi = a\left(2z^3 - 3r^2 z\right) + в\left(r^2 z + z^3\right) \tag{6}$$

Частные производные от этой функции в работе были использованы в операторе Лапласа, неизвестные постоянные которого определялись из граничных условий деформирования образцов. При этом было доказано, что нормальные напряжения в замкнутом полимерном слое (рисунок 2) от координаты r не зависят, т.е. для любой точки справедливо выражение:

$$\sigma_z = \frac{P_1}{\pi R^2} \tag{7}$$

Для условий нагружения образцов, представленных на рисунке 2 модуль упругости полимера будет равен:

$$E = \frac{P_1}{\pi R^2} \cdot \frac{(1-2\mu)\cdot(1+\mu)h}{(1-\mu)\cdot S} \tag{8}$$

Таким образом, получено значение модуля упругости, выраженное через продольное сближение образцов S и коэффициента Пуассона μ, величина которого пока не известна. Для ее определения были проведены

испытания призматических металлополимерных образцов при простом сдвиге [14-16] (рисунок 3).

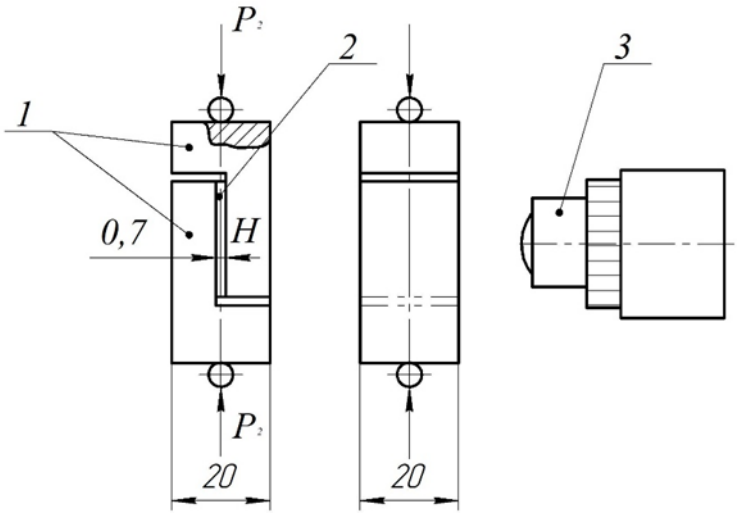


Рис. 3. Испытание полимерного слоя на сдвиг: 1 – стальные цилиндры, 2 – полимерный слой, 3 – измерительный микроскоп

В этом случае касательные напряжения, возникающие в полимерном слое под действием сдвигающей нагрузки P_2, рассчитывались по формуле:

$$\tau = \frac{P_2}{F_{сд}} = G\gamma = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \frac{l}{H} \qquad (9)$$

где l – смещение одной поверхности полимерного слоя толщиной H относительно другой, $F_{сд}$ – площадь полимерного покрытия.

Следовательно:

$$E = \frac{2P_2H(1+\mu)}{lF_{сд}} \qquad (10)$$

Полимерные слои в образцах для испытаний при сжатии и сдвиге были получены с помощью одной и той же полимерной композиции при идентичной технологии нанесения. Поэтому здесь справедливо применить равенство правых и левых частей выражений (8) и (10).

Откуда:

$$\frac{P_1F_{сд}lh}{P_2HS\pi R^2}(1-2\mu) = 2(1-\mu) \qquad (11)$$

Тогда выражение для коэффициента Пуассона может быть записано в виде:

$$\mu = \frac{a}{2(1+a)}, \qquad (12)$$

где $a = \dfrac{P_1 \cdot F_{co} \cdot l \cdot h}{P_2 HS\pi R^2}$

После подстановки значения коэффициента Пуассона в (11) можно определить величину модуля упругости материала покрытия.

В соответствии с разработанной методикой были определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для покрытий на основе полиамидных смол П-66/6, П-68 и поликапроамида. Эти материалы по своим деформационным свойствам занимают среди полиамидов крайние и промежуточное положения, чем и был определен их отбор для эксперимента.

Полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона полимерных покрытий

Материал покрытия	Модуль упругости, МПа		Коэффициент Пуассона	
	среднее значение	доверительный интервал, α=0,95	среднее значение	доверительный интервал, α=0,95
Смола П-66/6	530	49	0,490	0,003
Смола П-68	1245	84	0,492	0,004
Поликапроамид	1425	68	0,493	0,003

Экспериментальное исследование напряженного состояния полиамидного покрытия.

Особого внимания заслуживает процесс изменения деформации полиамидного и его напряженного состояния при постоянных и длительных нагрузках. Как отмечалось выше, этот процесс существенно зависит от величины гидростатического давления, которое в наиболее нагруженной контактной зоне сопрягаемых деталей достигает у тонкослойного полиамидного покрытия величины, близкой к значениям максимальных контактных давлений. Этот вывод легко подтверждается с помощью выражения (11), представленного выше. Рассматриваемое свойство полиамидных материалов доказывает их перспективность для тяжелонагруженных узлов [17-20].

Проведенные исследования деформативных свойств полиамидных покрытий ставят под сомнение целесообразность включения в расчетную модель цилиндрического сопряжения деформацию самого полимерного слоя. Окончательное заключение по этой предпосылке можно сделать после сравнения ее с деформацией металлической подложки и контртела.

Согласно исследованиям, выполненных в 1973 году Необердиным Ю.А. угол контакта в металлической паре 2β, когда радиусы сопрягаемых деталей близки по величине, может быть определен из уравнения (13):

$$\frac{2P}{вE}\cdot\frac{(1+\chi)(1+\mu)}{4\pi}+\frac{\alpha^2(\alpha+1)}{2\alpha^4+\ln(\alpha^2+1)-2}=0 \qquad (13)$$

где $\alpha = tg\frac{\beta}{2}$, $\chi=\frac{3-\mu}{1+\mu}$.

Известна также эмпирическая зависимость [1]:

$$\beta = arctg2\sqrt{(\upsilon_1+\upsilon_2)\cdot\frac{2P}{вД}} \qquad (14)$$

где $\upsilon_1=\frac{1-\mu_1^2}{\pi E_1}, \upsilon_2=\frac{1-\mu_2^2}{\pi E_2}$.

При одинаковом материале оси и втулки она принимает вид:

$$\beta = arctg4\sqrt{\frac{1-\mu^2}{\pi E}\cdot\frac{P}{в}} \qquad (15)$$

Авторы провели расчеты угла контакта, полученные с помощью выражения (15) рисунок 4 – кривая I и 1 – кривая 2 для следующих параметров: А=35 мм, Р=350 кН/м, в=0,2 мм и толщина полимерного слоя – 0,5 мм. Их анализ показывает, что зависимость угла контакта от деформации металлических массивных деталей значительно больше, чем от тонкослойного полиамидного покрытия и с увеличением нагрузки это различие становится более ощутимым. Следует заметить, что расчет выполнен при тех условиях, когда роль полимерного слоя должна проявиться в максимальной степени, т.е. при минимальных значениях модуля упругости и толщинах в 1,5 раза больше оптимальных.

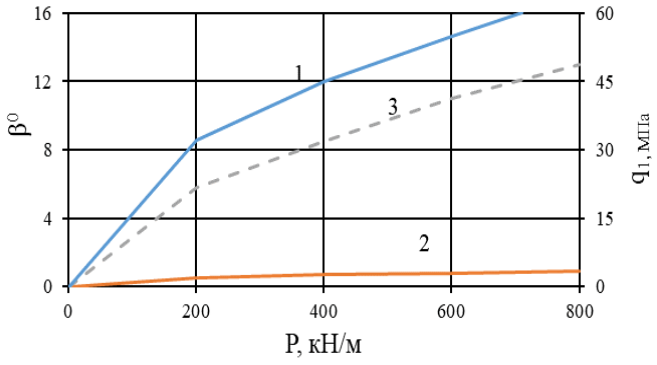


Рис. 4. Зависимость угла контакта и максимального контактного давления в шарнире от величины нагрузки: 1, 2 – угол контакта, 3 – контактные давления, I – с учетом деформации контртела и подложки, 2 – с учетом деформации только полимерного

покрытия. Диаметр сопряжения – 70 мм, монтажный зазор – 0,2 мм, толщина полимерного покрытия – 0,5 мм

Если принимать в расчет только деформацию подложки и контртела, то расчет максимальных контактных давлений можно проводить с помощью зависимости:

$$q_{\max} = \frac{P}{\pi A}\left\{N_1 - N_2\left[N_3 + \frac{вE}{P}\cdot\frac{\pi}{(1+\chi)(1+\mu)}\right]\right\} \qquad 16)$$

где $N_1 = \frac{\sqrt{\omega}-1}{\omega}\ln\frac{\sqrt{\omega}-\alpha}{\sqrt{\omega}+\alpha} + \frac{2\alpha}{\sqrt{\omega}}$,

$N_2 = \frac{1}{2-\ln\omega}\ln\frac{\sqrt{\omega}-\alpha}{\sqrt{\omega}+\alpha}$,

$N_3 = \frac{\alpha^2 + \left(\sqrt{\omega}-1\right)(2-\ln\omega)}{\omega}$,

$\omega = tg^2\frac{\beta}{2}+1$, $\alpha = tg\frac{\beta}{2}$.

Тогда касательные напряжения, обусловленные действием фрикционных сил, соответственно будут определяться выражением (17):

$$\tau = fq = \frac{Pf}{\pi A}\left\{N_1 + N_2\left[N_3 + \frac{вE}{P}\cdot\frac{\pi}{(1+\chi)(1+\mu)}\right]\right\} \qquad (17)$$

На рисунке 4 приведен также график изменения контактных давлений, значения которых были рассчитаны по формуле (16) и определены экспериментально по описанной ниже методике.

Таким образом, очевидно, что деформация полимерного покрытия, если его толщина не превышает 1 мм, во много раз меньше деформации в зоне контакта металлических деталей. Эта закономерность подтверждается для всех известных марок полиамидов с учетом их деформаций, развивающихся во времени при продолжительном действии рабочих нагрузок. Следовательно, для исследуемых конструкций можно пользоваться расчетной моделью, в которой учитывается деформация только металлической подложки покрытия и контртела.

Поскольку этот вывод пока сделан на основе сравнения результатов расчета, выполненного с помощью теоретических моделей, его окончательная достоверность была проверена по данным измерения контактных давлений.

Экспериментальное исследование контактных давлений.

Малая толщина полимерного покрытия создает значительные трудности для экспериментальных исследований их напряженного состояния в зоне контакта с контртелом.

Известно несколько опубликованных работ, в которых представлено несколько способов решения подобной задачи, но почти все они применимы только для толстостенных полимерных втулок, т.к. требуют закрепления в них специальных датчиков.

В связи с этим в данной работе была использована другая методика, основанная на применении емкостных датчиков в виде узких полосок лавсановой пленки толщиной 6 мкм с двухсторонним алюминиевым покрытием, которые закладывались в контакт.

Исследование проводилось на специальном узле, состоящем из втулки 1 с полимерным покрытием (смола П-54), вала 2 с тарировочной площадкой А и рабочей поверхностью Б, подставкой-опорой 3. Размеры деталей: диаметр вала – 70 мм, ширина втулки – 60 мм, толщина ее стенки – 20 мм.

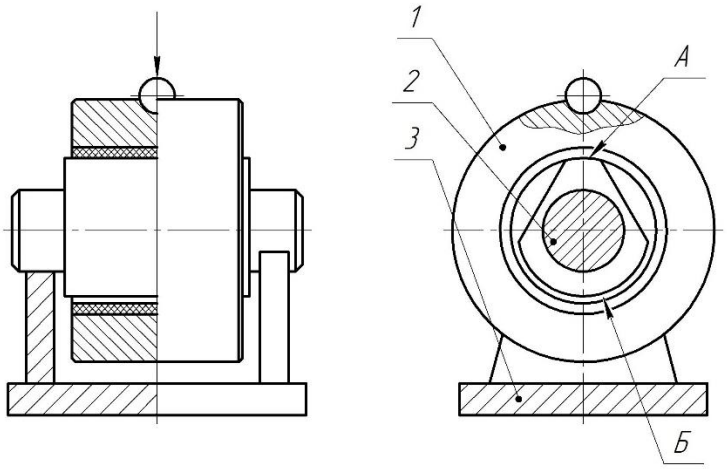


Рис. 5. Узел для экспериментального исследования контактных напряжений в металлополимерном шарнире: 1 – втулка с полимерным покрытием, 2 – стальная ось, 3 – подставка-опора

В ходе экспериментальных исследований изучалось влияние геометрических размеров металлополимерных узлов на величину контактных давлений. При постановке эксперимента варьировалась толщина антифрикционного покрытия и диаметрального зазора. Это достигалось применением стальных втулок с различным внутренним диаметром и периодическим растачиванием наносимого на него полимерного слоя.

Опыты были повторены также с различными материалами втулок, используемых для нанесения покрытий. Втулки изготавливались из стали (Ст 5), алюминиевого сплава (Ал-9) и бронзы (БРаЖ-9-4). Вал во всех случаях оставался один и тот же (стальной).

Результаты

Результаты измерений контактных давлений представлены на рисунках 6-8. Они показывают, что их значение существенно зависело от монтажного зазора. Влияние толщины полимерного слоя в исследованном диапазоне было малозаметным.

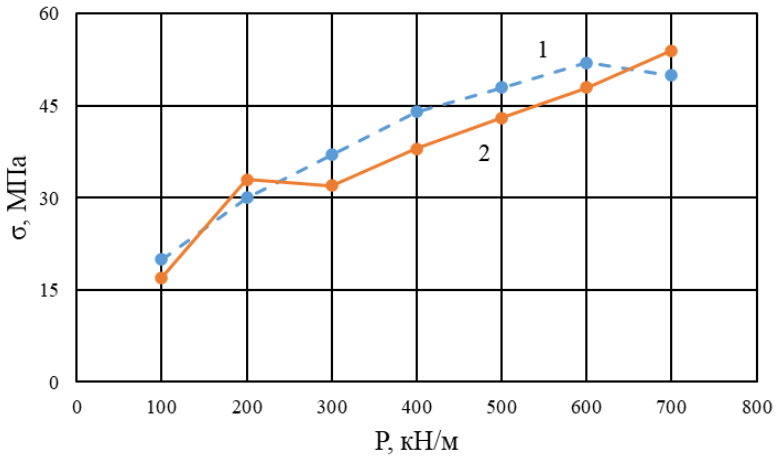


Рис. 6. Зависимость максимальной величины нормальных контактных напряжений от нагрузки в шарнире с монтажным зазором 0,3 мм: толщина полимерного слоя 1 – 0,3 мм, 2 – 0,5 мм, подложка и вал – стальные

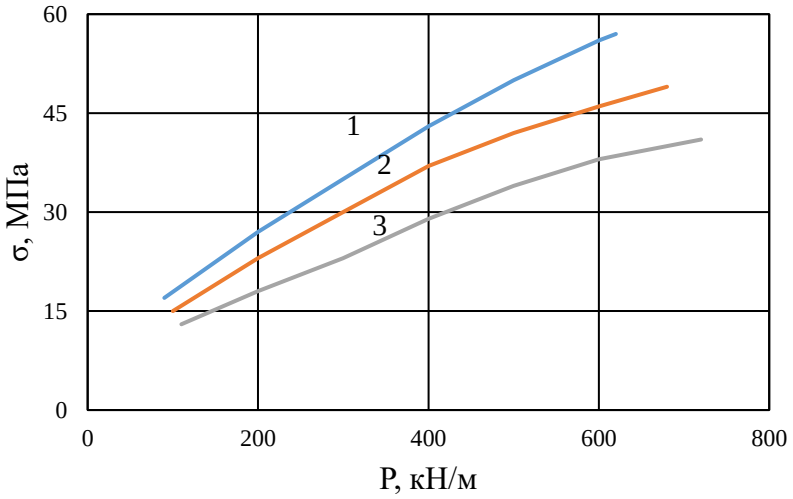


Рис. 7. Зависимость величины максимальных контактных напряжений от нагрузки при толщине слоя 0,8 мм: величина монтажного зазора 1 – 1,0 мм, 2 – 0,6 мм, 3 – 0,3 мм

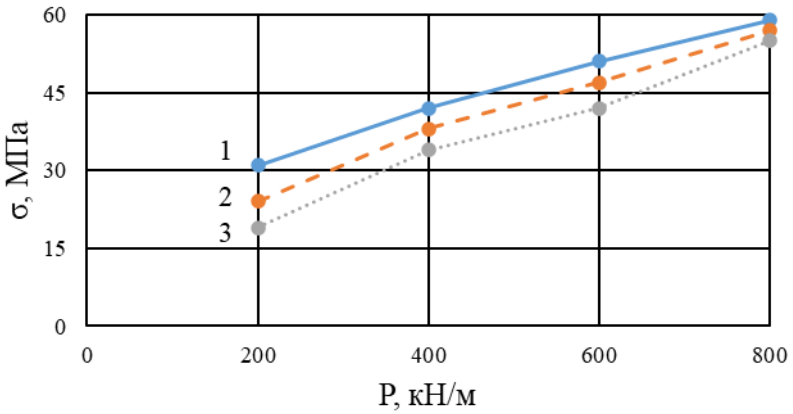


Рис. 8. Зависимость величины максимальных контактных напряжений от нагрузки при разном материале подложки: 1 – сталь, 2 – бронза, 3 – алюминий, толщина полимерного слоя – 0,5 мм, монтажный зазор – 0,3 мм

Заключение

1. Прочная адгезионная связь между металлической подложкой и полиамидным покрытием настолько ограничивает его эластичную деформацию, что при вычислении контактных напряжений ее можно в расчет не принимать. Деформация полиамида происходит в условиях объемного сжатия за счет изменения расстояния между молекулярными структурами. В этих условиях существующее представление о том, что коэффициент Пуассона у полиамида равен 0,5, не работает. Таким образом, характеристики деформационных свойств полиамидов, определенные по

стандартным методикам для расчетов тонкослойных покрытий не приемлемы.

2. Сделанные по результатам экспериментов выводы с нагружением контртел из различных металлов подтвердили достоверность выполненных теоретических исследований.
3. Разработанная экспериментальная методика определения контактных давлений с помощью металлизированных полимерных пленок может найти применение для исследования значительно большего круга инженерных задач, связанных с расчетами контактных напряжений, например, во фланцевых соединениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Раевский А. Н. Полиамидные подшипники: расчет и проектирование. - М.: Машиностроение, 1967. - 137 с.

[2] G. Kaush. Polymer Fracture (Berlin: Springer, 1978) – 456 p.

[3] Firas Awaja, Michael Gilbert, Georgina Kelly, Bronwyn Fox, Paul J. Pigram, Adhesion of polymers, Progress in Polymer Science, Vol. 34, Issue 9, 2009, 948-968 pp.

[4] Zhang, Y., Hasegawa, K., Sota, K., Takagi, K., Ma, W., Takahara, A. and Takahara, A., Enhanced Adhesion Effect of Epoxy Resin on Metal Surfaces Using Polymer with Catechol and Epoxy Groups, vol. 2, no. 4, pp. 1500–1507.

[5] Башкарев А. Я., Кущенко А. В., Стукач А. В., Славутин Л. В. Технологии ремонта с применением полиамидов // Вестник машиностроения -2021- № 1 -С. 67-70.

[6] Яковлев А.Д., Здор В.Ф., Каплан В.И. Порошковые материалы и покрытия на их основе. – Л.: Химия, 1971. – 256 с. (1-е изд.); 1979. – 270 с. (2-е изд.).

[7] Серкова Е. А., Хмельницкий В. В., Застрогина О. Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. №5 (99). С.56-61

[8] Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Передельская О.А., Наумова А.В. Технология изготовления деталей узлов трения из полимерных композиционных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение, Т. 15, № 2, 2015, с. 13-19.

[9] Zhang, H., Ge, X., & Ye, H. Effectiveness of the heat conduction reinforcement of particle filled composites. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 13(3), (2005), 401–412 pp. doi:10.1088/0965-0393/13/3/009

[10] Владимиров В.С., Жаринов В. В. Уравнения математической физики: Учебник для вузов. — 2-е изд., стереотип. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 400 с.
[11] John W. Eaton, David Bateman, Soren Hauberg, Rik Wehbring. GNU Octave - Edition 4 for Octave version 4.4.1 August 2018 – 1060 p
[12] Никольский С. М. Квадратурные формулы. — 4-е изд., доп. с добавлением Н. П. Корнейчука. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.- 256 с.
[13] Хаиров А.Р. О различных формах представления многочленов Лежандра // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, Т. 33, № 3, 2018, С. 80-93.
[14] Рудской, А. И. Долговечность полимерных композиционных материалов / А. И. Рудской, А. Я. Башкарев, Л. В. Славутин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 675-689.
[15] Башкарев А.Я., Славутин Л.В., Кущенко А.В., Бессонова В.Ю. Положительное влияние отрицательных напряжений на адгезионную прочность и долговечность полимерных композитов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2021. № 10. С. 690-701.
[16] Милов А. Б. О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений // Проблемы прочности. -1973,- № 1. С. 70-72.
[17] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P.225-234 https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22
[18] Яковлев В.Ф. Измерения деформаций и напряжений деталей машин. - 2-е изд., испр. и перераб. - Москва; Ленинград: Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1963. - 192 с.
[19] Becker R. Uber die Plfstizitat amorpher und Kristalliner fester Korper. - Physikalische Zeitschrift, 1925. -1.25,7. S. 919 – 925 pp.
[20] Kumlutaş, Dilek & Tavman, Ismail. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. (2006). Vol.19. 441-455 pp.

A.I. Rudskoy, A.Y. Bashkarev, V.Y. Lebedeva

STRESS STATE OF ANTIFRICTION POLYMER COATINGS IN PLAIN BEARINGS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

Due to the prospects of using thin-layer polymer coatings in friction units, the need for additional studies of the physico-mechanical properties of polyamides capable of creating strong adhesive joints with a metal substrate is justified. Theoretically and experimentally, it is proved that when calculating contact stresses in sliding bearings with a polymer layer thickness of less than 1 mm, its deformation can be ignored.

Key words: friction units, sliding bearings, polymer coatings, contact stresses

REFERENCES

[1] Raevski A. H. Polyamide bearings: calculation and design. - M.: Mechanical engineering, 1967. - 137 p.
[2] G. Kaush. Polymer Fracture (Berlin: Springer, 1978) – 456 p.
[3] Firas Awaja, Michael Gilbert, Georgina Kelly, Bronwyn Fox, Paul J. Pigram, Adhesion of polymers, Progress in Polymer Science, Vol. 34, Issue 9, 2009, 948-968 pp.
[4] Zhang, Y., Hasegawa, K., Sota, K., Takagi, K., Ma, W., Takahara, A. and Takahara, A., Enhanced Adhesion Effect of Epoxy Resin on Metal Surfaces Using Polymer with Catechol and Epoxy Groups, vol. 2, no. 4, pp. 1500–1507.
[5] Bashkarev A. Ya., Kushchenko A. V., Stukach A. V., Slavutin L. V. Repair technologies with the use of polyamides // Machine Building Vestnik - 2021- No.1 - 67-70 pp.
[6] Yakovlev A.D., Zdor V.F., Kaplan V.I. Powder materials and coatings on their basis. - L.: Khimiya, 1971. - 256 p. (1st ed.); 1979. - 270 p. (2nd ed.).
[7] Serkova E. A., Khmelnitsky V. V., Zastrogina O. B. Polymeric materials for antifriction coatings (review) // Proceedings of VIAM. 2021. No.5 (99). 56-61 pp.
[8] Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Peredelskaya O. A., Naumova A. V. Technology of manufacturing parts of friction units from polymer composite materials // Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, 2015, p. 13-19.

[9] Zhang, H., Ge, X., & Ye, H. Effectiveness of the heat conduction reinforcement of particle filled composites. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 13(3), (2005), 401–412 pp. doi:10.1088/0965-0393/13/3/009
[10] Vladimirov B.C., Zharinov V.V. Equations of mathematical physics: Textbook for universities. - 2nd ed., stereotype. - M.: FIZMATLIT, 2004. - 400 p.
[11] John W. Eaton, David Bateman, Soren Hauberg, Rik Wehbring. GNU Octave - Edition 4 for Octave version 4.4.1 August 2018 – 1060 p
[12] S. Nikolskoye, M. The quadrature formula. — The 4th is decreasing., extras. adding S. N. Very much. Korneychuk. — M.: Nauka. G. land rent.. phys.-math. is., 1988.- p. 256.
[13] Khairov A.R. On various forms of representation of Legendre polynomials // Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences, vol. 33, No. 3, 2018, pp. 80-93.
[14] Rudskoy, A. I. Durability of polymer composite materials / A. I. Rudskoy, A. Ya. Bashkarev, L. V. Slavutin // Modern mechanical engineering. Science and education. - 2021. – No. 10. – pp. 675-689.
[15] Bashkarev A.Ya., Slavutin L.V., Kushchenko A.V., Bessonova V.Yu. The positive effect of negative stresses on the adhesive strength and durability of polymer composites // Modern mechanical engineering. Science and education. 2021. No. 10. pp. 690-701.
[16] Milov A. B. On calculating the contact stiffness of cylindrical joints // Problems of strength. -1973, No. 1. pp. 70-72.
[17] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P.225-234 https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22
[18] Yakovlev V.F. Measurements of deformations and stresses of machine parts. - 2nd ed., corrected and revised. - Moscow; Leningrad: Mashgiz. [Leningrad branch], 1963. - 192 p.
[19] Becker R. Uber die Plfstizitat amorpher und Kristalliner fester Korper. - Physikalische Zeitschrift, 1925. -1.25,7. S. 919 – 925 pp.
[20] Kumlutaş, Dilek & Tavman, Ismail. A Numerical and Experimental Study on Thermal Conductivity of Particle Filled Polymer Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. (2006). Vol.19. 441-455 pp.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.793.18: 621.2.082.18
doi:10.18720/SPBPU/2/id-123

М.А. Волосова[1], А.П. Митрофанов[2], Я.Р. Мелешкин[3], С.В. Федоров[4]

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ДИБОРИДА ТИТАНА В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ



[1]Марина Александровна Волосова,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: m.volosova@stankin.ru.



[2]Артем Петрович Митрофанов,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: a.mitrofanov@stankin.ru



[3]Ярослав Романович Мелешкин,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: ya.meleshkin@stankin.ru.



[4]Сергей Вольдемарович Федоров,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499) 972-94-29, E-mail: sv.fedorov@stankin.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы влияния теплового воздействия на трибологические свойства покрытия TiB_2 в сопоставление с известным и часто применяемым на режущие пластины покрытием TiAlSiN. Результаты показали, что противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия TiAlSiN, причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний с равномерным характером

изнашивания покрытия TiB_2. Установлено, что температурное воздействие оказывает положительное влияние на коэффициент трения покрытия TiB_2 снижая его вплоть до величины 0,1 с формированием антифрикционной пленки которая под действием механических нагрузок срывается с резким увеличением коэффициента трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание –удаление». Такой механизм обеспечивает стабильный и равномерный износ покрытия, тогда как у покрытия TiAlSiN происходит полная деструкция с частичным повреждением подложки.

Ключевые слова: покрытие TiB_2, коэффициент трения, морфология дорожки трения, износостойкость, элементный анализ, тепловое воздействие.

Введение

Всесторонний анализ показывает, что сегодня одним из мировых трендов в области разработки покрытий, которые смогли бы обеспечить повышенную износоустойчивость инструмента при повышенных теплосиловых нагрузках, является формирование на рабочих поверхностях инструментов покрытий на базе диборидов тугоплавких металлов MeB_2. Бориды обладают стойкостью к окислению при высоких температурах за счет формирования на их поверхностях трибопленок. В настоящее время одним из основных мировых трендов в области развития износоустойчивых покрытий для нужд инструментального производства является применение боридов переходных металлов Ti (наиболее термостабильной модификации MeB_2) [1-5].

Химическое соединение TiB_2 имеет ковалентную связь между атомами и относительно распространенных нитридов тугоплавких металлов, в которых кроме ковалентной имеет место металлическая связь, обладает более высокой твердостью, улучшенными барьерными свойствами и менее интенсивным адгезионным схватыванием при высокотемпературном трении [1, 3, 6]. Покрытия TiB_2 относятся к классу, так называемых адаптивных покрытий, принцип функционирования которых заключается в том, что структура, состав и свойства покрытия изменяются в зависимости от внешних условий для минимизации трения за счет образования стабильных защитных оксидных слоев и высокотемпературных смазочных оксидов [7-9].

Одновременно с указанными выше уникальными благоприятными особенностями покрытия TiB_2 характеризуются значительными недостатками, ограничивающими их практическое применение – повышенная хрупкость (высокий модуль упругости) и сравнительно невысокая прочность адгезионной связи с инструментальными

подложками, значительно усугубляющаяся по мере увеличения толщины покрытий [3, 5, 10].

Имеющиеся в научно-технической литературе данные об исследовании покрытий TiB_2 в процессе резания фрагментарны и во многом противоречивы [11-13]. Кроме того, большинство авторов проводит испытания твердосплавных пластин с покрытиями в процессе точении при невысоких скоростях резания, т.е. в «комфортных» условиях, когда режущая кромка и контактные поверхности не подвергаются экстремальным термическим и циклическим механическим нагрузкам, которые характерны для фрезерования труднообрабатываемых сплавов на повышенных скоростях резания [14-16].

В рамках выполнения работы поставлена задача исследования влияния условий контактного взаимодействия в зоне резания на функциональные свойства покрытий, в том числе с диборидом титана, экспериментально реализованное посредствам трибологических испытаний с различными вариантами температурного воздействия.

Методы

При экспериментах по нанесению покрытий на образцы использовали гибридную вакуумно-плазменную установку, оснащенную магнетронной распылительной системой с мишенью TiB_2 и двумя вакуумно-дуговыми испарителями с катодами AlSi и Ti. Формировали два варианта покрытий при следующих режимах:

1) покрытие TiAlSiN осаждали при давлении 1,2 Па в вакуумной камере в газовой смеси Ar/N_2 при соотношении 5/95 об. %. и напряжении смещения 120 В на вращающемся столе с образцами. Осаждение выполняли при температуре 500 °С в рабочей камере, токе дуги 90 А на катоде Ti и 80 А на катоде AlSi; время осаждения составляло 40 мин, что обеспечило толщину 2,8÷3 мкм покрытия TiAlSiN;

2) покрытие TiB_2 (с подслоем TiAlSiN) осаждали при давлении 0,6 Па в вакуумной камере при распылении мишени TiB_2, полученной искровым плазменным спеканием в газовой среде Ar при подаче на мишень импульсного напряжения с частотой 30 кГц. Осаждение выполняли при температуре 500 °С в рабочей камере, напряжении смещения 50 В и разрядном напряжении 400 В; время осаждения составляло 60 мин, что обеспечило толщину 2,3÷2,5 мкм покрытия TiB_2 и промежуточным нитридным слоем толщиной ~2 мкм;

С целью исследования влияния различных условий термо-механического воздействия на функциональные свойства покрытий при проведении исследований были реализованы три варианта эксперимента: испытания при комнатной температуре (1), испытания после

предварительного нагрева образцов в муфельной печи при температуре 700 °С в течение 60 минут (2), испытания непосредственно в термокамере трибометра при поддержании температуры на уровне 700 °С в течение всего периода испытаний (3).

Трибологические испытания осуществляли с усилием 10 N и скоростью вращения 10 см/с на трибометре DUCOM POD-4.0 (контртела – шарик из Al_2O_3 для керамических образцов, шарик WC – для образцов из твердого сплава). Применяемая схема – Pin-on-Disk (ASTM G99), путь трения – 500 метров. Общий вид экспериментальной установки для трибологических испытаний представлен на рис. 1.

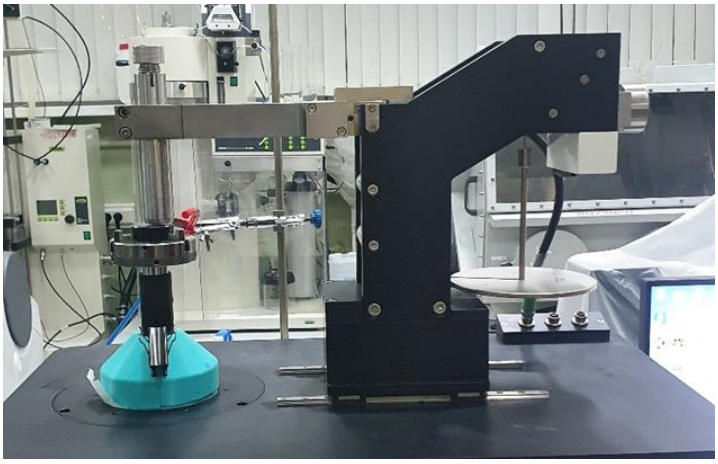


Рис. 1. Общий вид установки для трибологических испытаний

Для оценки износа покрытий после трибологических испытаний проводили измерение дорожки трения на образцах с использованием стилусного профилометра Dektak XT. Детальное исследование дорожек трения проводили на растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN (Чехия).

Исходные сведения об экспериментальных образцах и условиях трибологических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия эксперимента

№ Образца	1	2	3	4	5	6
Покрытие	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB^2	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB^2	TiAlSiN	TiAlSiN/ TiB^2
Условия испытаний*	1	1	2	2	3	3

** 1 - испытания при комнатной температуре, 2 - испытания после предварительного нагрева образцов в муфельной печи, 3 - испытания при нагреве в термокамере трибометра*

Результаты

Результаты трибологических испытаний (оценки коэффициента трения) образцов № 1 и 2 при комнатной температуре представлены на рис. 2.

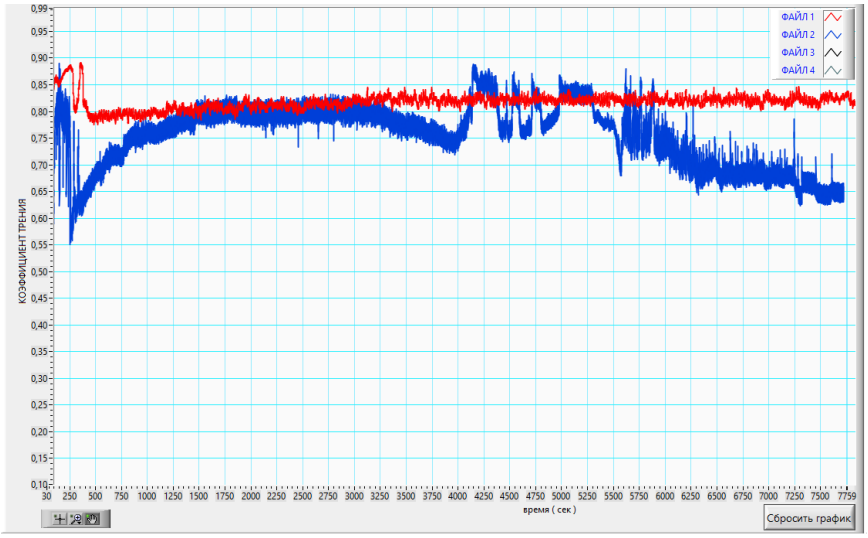


Рис. 2. Результаты оценки коэффициента трения образцов №1 (синий) и №2 (красный) при комнатной температуре

Можно видеть, что после стадии приработки у образца № 1 с покрытием TiAlSiN происходит постепенное увеличение коэффициента трения с выходом на стабильный уровень со значением 0,8, определяющим контактное взаимодействие покрытия с контртелом. Нестабильный характер кривой коэффициента трения при испытании покрытия TiAlSiN во второй половине дистанции отражает деструктивные процессы, в результате которых наблюдается разрушение покрытия. Напротив, при испытании покрытия TiB_2, за исключением этапа первоначальной приработки, на протяжении всего эксперимента отмечается стабильный характер изменения коэффициента трения со значением на уровне немногим более 0,8. Такой результат говорит о равномерном характере износа покрытия.

Морфология дорожки трения и элементное картирование (рис. 3) показывают, что покрытие TiAlSiN изнашивается до подложки в результате трибологических испытаний, при этом сам износ носит равномерный характер с преимущественным абразивным истиранием. Данное заключение хорошо иллюстрируется постепенным увеличением концентрации кислорода, как одного из элементов подложки, от края дорожки и далее вглубь (рис. 3). Стоит отметить, что помимо деструкции самого покрытия наблюдается и износ подложки в центральной части дорожки трения с формированием контрастного в отличии от всей контактной поверхности следа взаимодействия с контртелом.

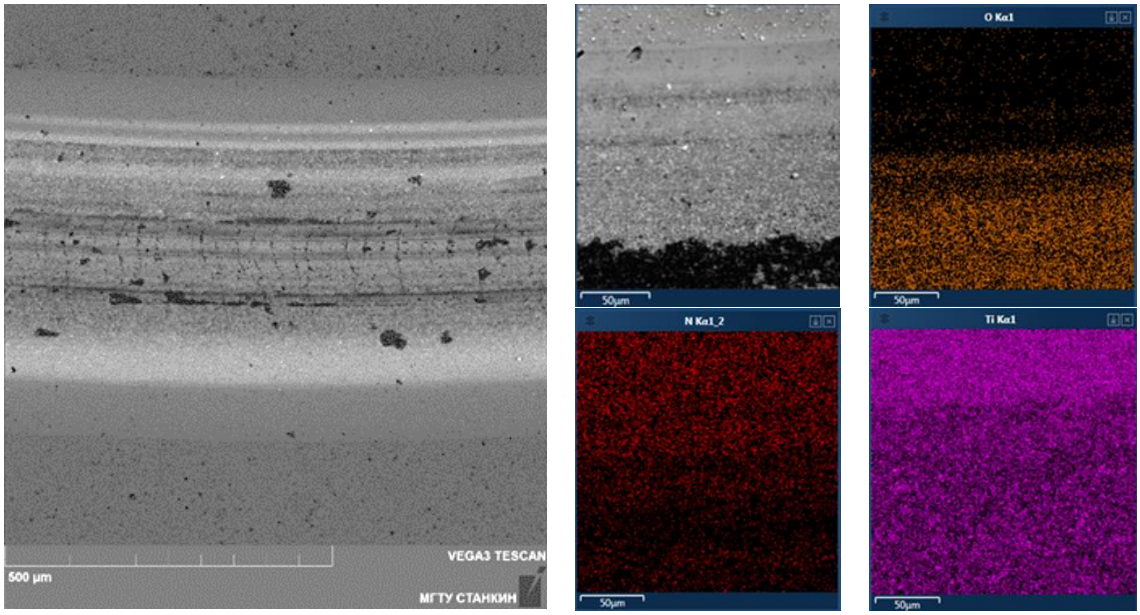


Рис. 3. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №1 (покрытие TiAlSiN)

Покрытие TiB_2 в результате контактного взаимодействия с контртелом имеет однородную по морфологии дорожку трения без явных проявлений процессов активного изнашивания (рис. 4). Сохраняется целостность покрытия, подтверждением чего является идентичность элементного состава не контактируемого края покрытия и дорожки трения (рис. 4).

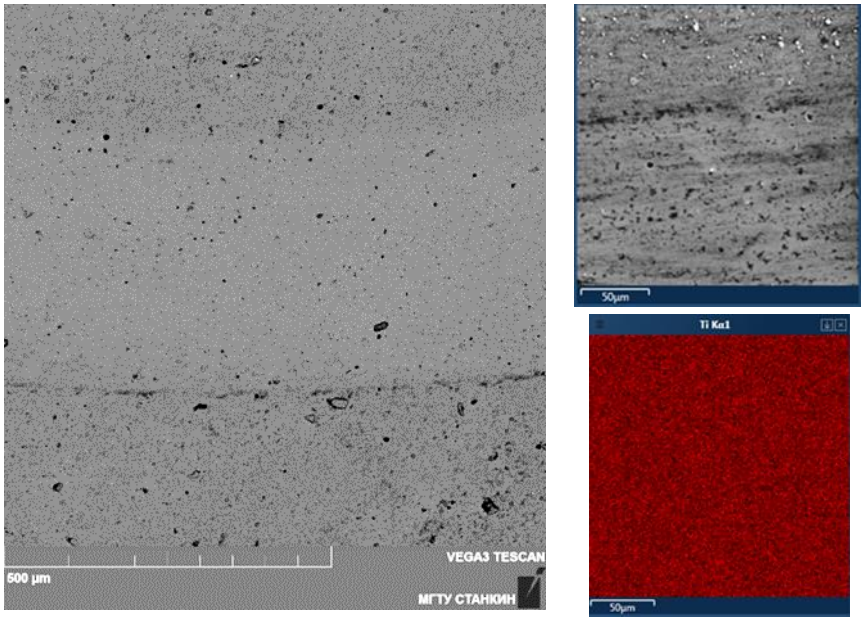


Рис. 4. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №2 (покрытие TiAlSiN/TiB_2)

Предварительный нагрев образцов в муфельной печи изменяет структуру и состав поверхностного слоя в результате этого трибологические показатели значительно трансформируются. Можно наблюдать существенное снижение коэффициента трения, особенно у покрытия TiB_2 с 0,8 до 0,55 при сохранении стабильности коэффициента трения на протяжении всего цикла испытаний (рис. 5). При этом, если при испытании исходных пластин, показания коэффициента трения для обоих вариантов покрытий практически аналогичны, то сравнение нагретых образцов показывает преимущество покрытия TiB_2 в отношении снижения трения. Последнее утверждение справедливо и для случая сравнения с исходной подложкой, т.к. в конце эксперимента покрытие TiAlSiN на дорожке трения отсутствует.

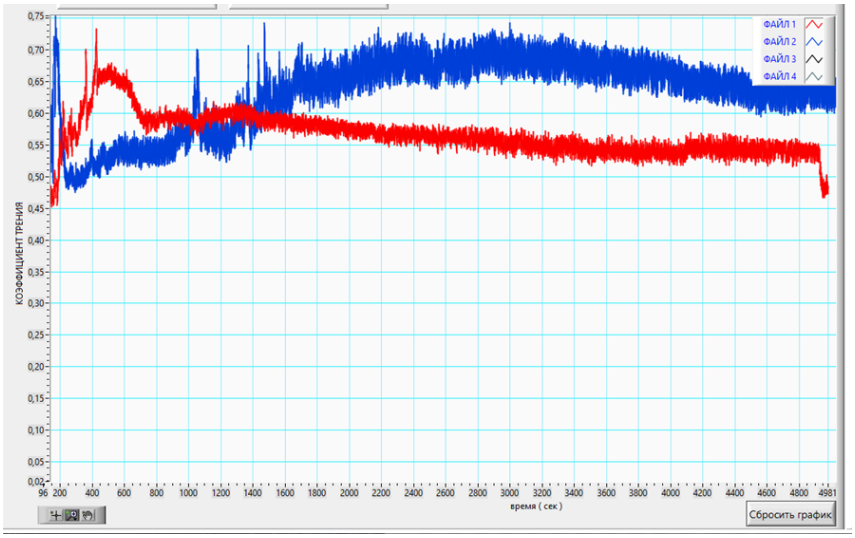


Рис. 5. Результаты оценки коэффициента трения образцов № 3 (синий) и №4 (красный) после нагрева в муфельной печи

Характер изнашивания покрытия TiAlSiN после нагрева в печи изменяется от преимущественного абразивного истирания для случая исходного состояния покрытия к хрупкому скалыванию, наблюдаемому по краям дорожки трения (рис. 6), что говорит об изменении физико-механических свойств поверхностного слоя. При этом происходит данный процесс не в результате возможного окисления покрытия при нагреве, т.к. количество кислорода на поверхности минимально (рис. 6). В ходе испытаний покрытие полностью разрушается с обнажением подложки, что отчетливо прослеживается по имеющейся резкой границе распределения основных элементов при картировании (рис. 6).

Однородность изнашивания покрытия TiB_2 при проведении трибологических испытаний предварительно нагретого образца можно наблюдать по морфологии дорожки трения, где отмечается равномерный характер абразивного износа (рис. 7). Покрытие сохраняет свою

целостность, что подтверждается контролируемым элементным составом (рис. 7). Тем не менее, происходят процессы окисления поверхностного слоя в результате нагревания образца, а концентрация кислорода постепенно снижается от края дорожки к центру, а при оценке концентрации бора наблюдается обратная тенденция (рис. 7).

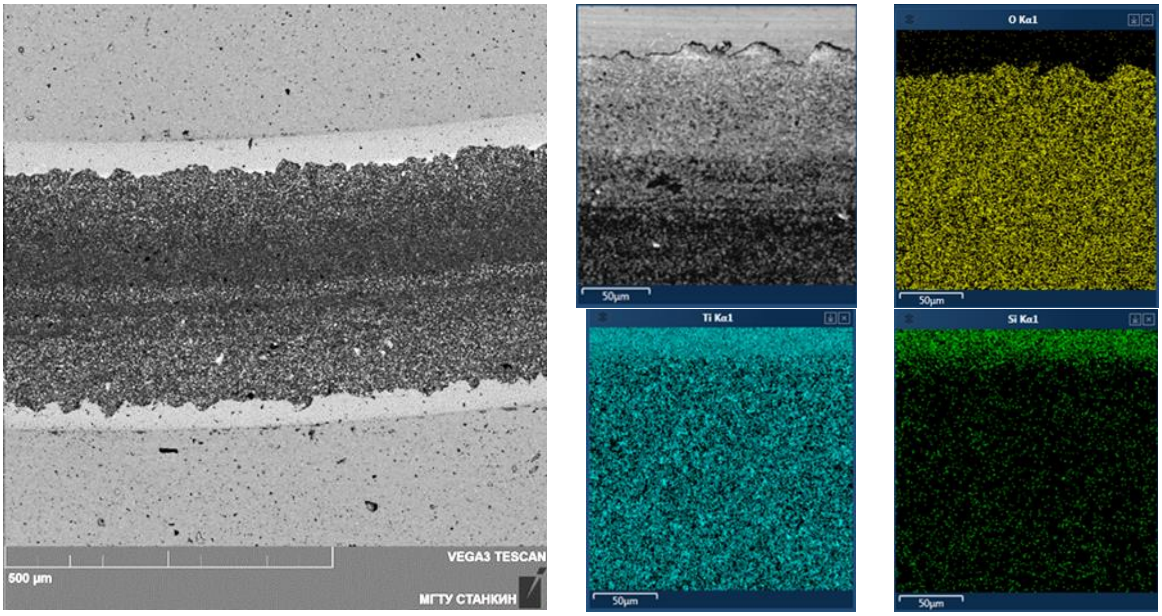


Рис. 6. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №3 (покрытие TiAlSiN)

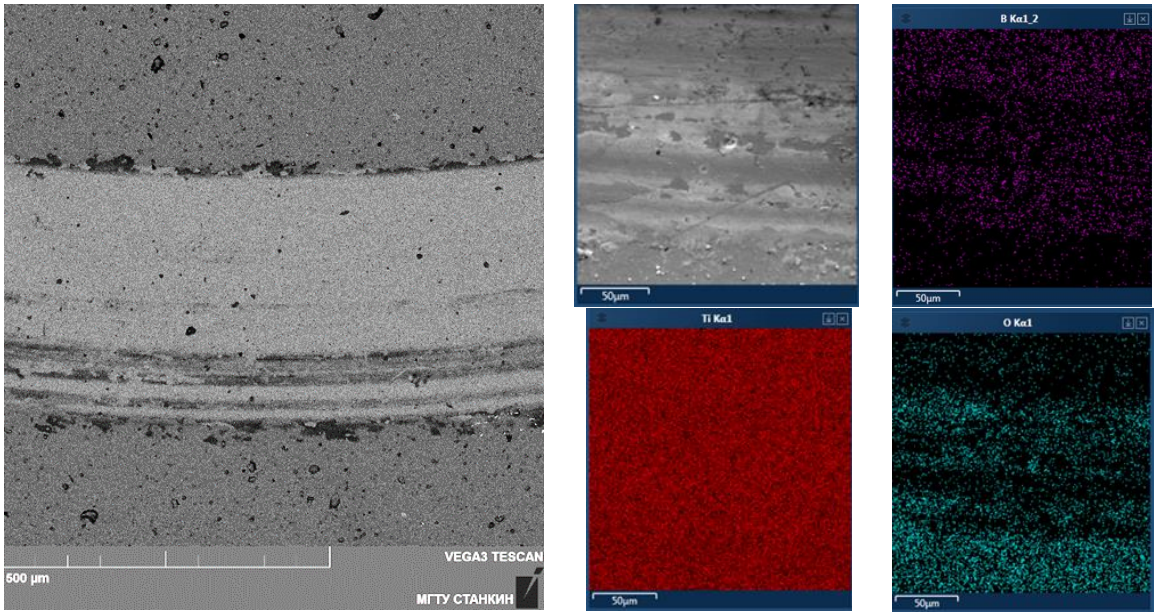


Рис. 7. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №4 (покрытие TiAlSiN/TiB_2)

Таким образом, в результате проведения испытаний верхний окисленный слой (оксиды титана), сформировавшиеся при предварительном нагревании образца, постепенно изнашиваются и дальнейший трибоконтакт происходит преимущественно в контакте контртела с TiB_2.

Трибологические испытания в термокамере трибометра при температуре 700 °С резко изменяют характер поведения кривых коэффициента трения. Так, у покрытия TiB_2 наблюдаются очевидные циклические процессы схватывания, сопровождающиеся повышением коэффициента трения, чередующиеся с периодами резкого падения коэффициента до значений меньше 0,1 (рис. 8). Цикличность просматривается и при испытании покрытия TiAlSiN, однако она менее ярко выражена и характеризует уже процессы адаптации подложки к условиям фрикционного контакта.

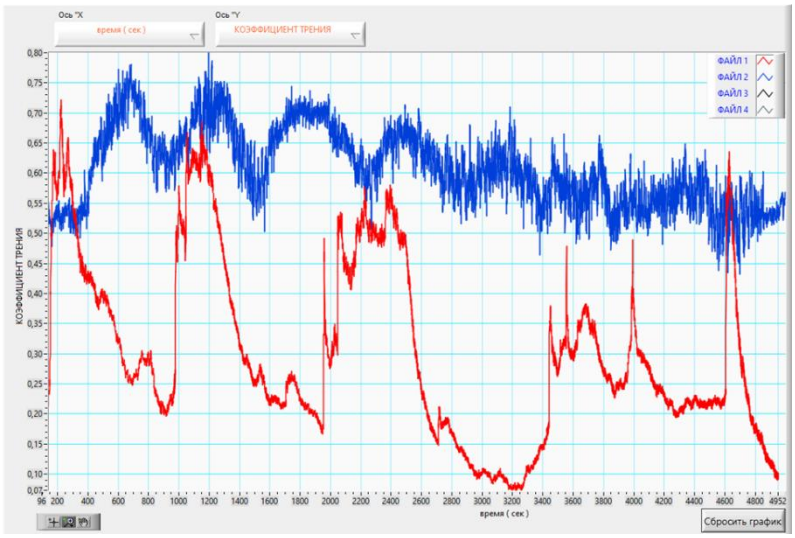


Рис. 8. Результаты оценки коэффициента трения образцов № 5 (синий) и № 6 (красный) при высокотемпературном нагреве
в камере трибометра

Оценка морфологии исследуемого образца показывает наличие следов хрупкого скалывания покрытия TiAlSiN, наблюдаемого по краям дорожки трения (рис. 9). Покрытие на подложке отсутствует, ее поверхность неоднородна с явными участками схватывания и очевидными процессами разрушения контактной поверхности. Указанное однозначно иллюстрируется элементным картированием – видны резкая граница распределения основных элементов и отсутствие покрытия на дорожки трения (рис. 9). Стоит отметить, что процесса окисления покрытия в результате термовоздействия не обнаружено.

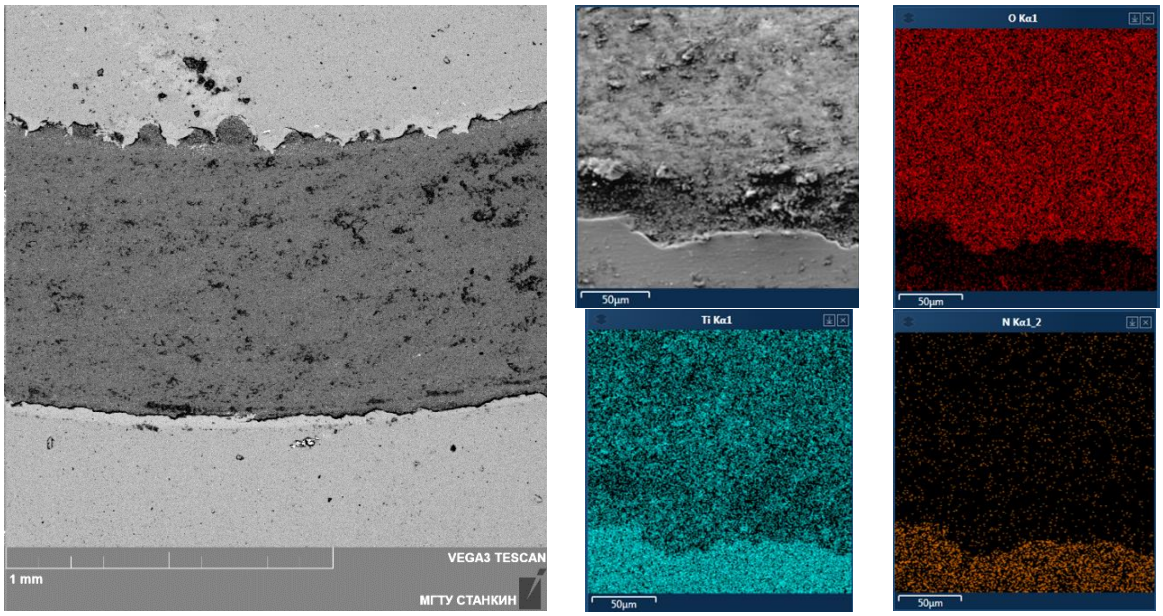


Рис. 9. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №5 (покрытие TiAlSiN)

Анализ результатов морфологического анализа покрытия TiB_2 показывает более резкие границы перехода от края к центру дорожки трения (рис. 10) Обнаруживается слоистость на поверхности дорожки (рис. 10), которая сформировалось в результате цикличности различных механизмов контактного взаимодействия, что, в том числе, отражается на изменении коэффициента трения в процессе трибологических испытаний.

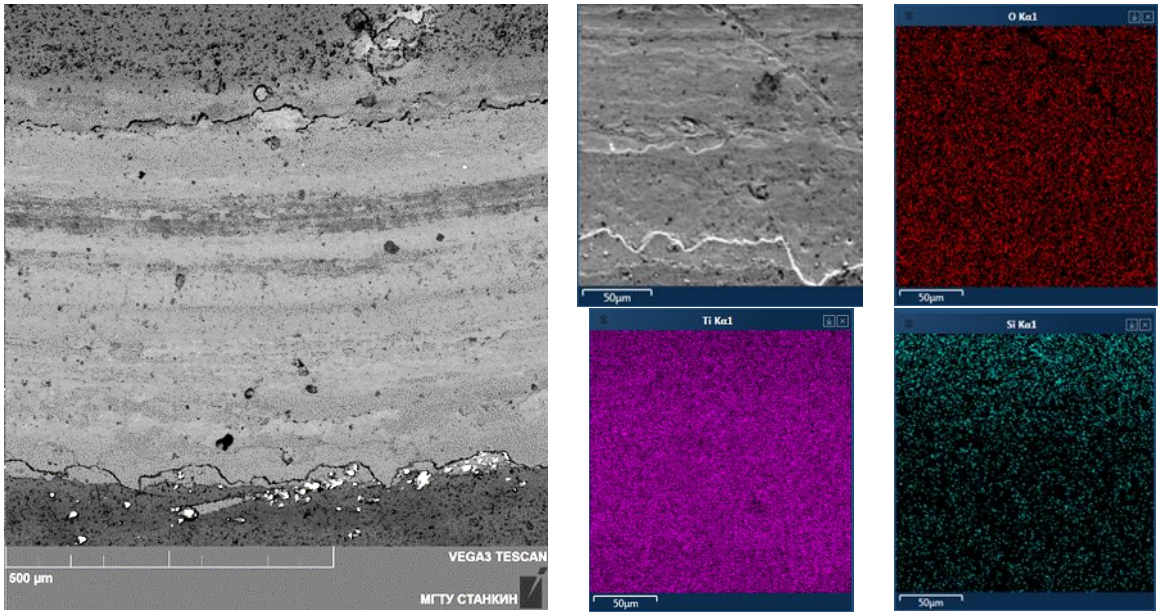


Рис. 10. Морфология дорожки трения и элементное картирование образца №6 (покрытие $TiAlSiN/TiB_2$)

Элементный анализ показывает наличие значительного процесса окисления покрытия, которое характеризуется равномерным распределением кислорода по всей исследуемой поверхности. Наблюдается значительное истончение покрытия TiB_2 от края в глубь дорожки трения, что видно по постепенному увеличению концентрации элементов подслоя (Si) на исследуемом участке (рис. 10). Тем не менее, несмотря на значительный износ, верхний слой TiB_2 преимущественно сохранялся и продолжал влиять на контактные процессы до конца эксперимента.

Износостойкость покрытий дополнительно оценивали по значениям объемного износа (рис. 11), полученного в результате расчета данных, измеренных профилированием дорожки трения. Испытание исходных покрытий при комнатной температуре показывает почти двухкратное превосходство TiB2 по износостойкости. Оценивая результаты по износоустойчивости покрытия TiAlSiN после испытаний образца, нагретого в печи, можно констатировать увеличение износа дорожки трения и деструкцию покрытия по всей контактной поверхности (рис 6). Однако в отличии от покрытия TiAlSiN противоизносные свойства TiB_2 после нагревания образца, наоборот, усилились, благодаря чему износостойкость возросла в 2 раза от величины испытания исходного покрытия (рис. 11). При испытаниях в условиях постоянного температурного воздействия обнаруживается катастрофический износ для покрытия TiAlSiN (рис. 11), где глубина изношенной дорожки трения превышает величину толщины покрытия и происходит уже разрушение основного материала подложки. Износ покрытия TiB_2 после испытаний значительно увеличился относительно других экспериментов, но не достиг критического уровня, противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены чем у покрытия TiAlSiN.

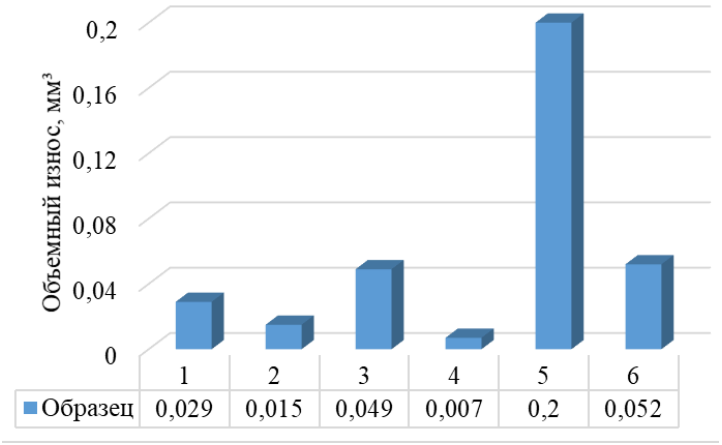


Рис. 11. Рассчитанный объемный износ дорожек трения после испытания образцов

Обсуждение

Тепловое воздействие оказывает значимый эффект на исследуемые покрытия изменяя и трансформируя их свойства и характер деструкции. Если при испытаниях с комнатной температурой наблюдается относительно высокий коэффициент трения покрытия TiB_2 который также отмечается и в работе [17], то эксперименты с воздействием температуры на покрытие TiB_2 показывают снижение фрикционной составляющей контактного взаимодействия, что особенно важно в случае резания материалов при практическом применении режущих пластин. Следует подчеркнуть важные результаты, полученные при испытании в термокамере трибометра при температуре 700 °C, где имеет место быть цикличность значений коэффициента трения с падением до величин 0,1. Соответственно в зоне контакта формируется антифрикционная пленка, при достижении критических значений нагрузок, происходит срыв контактного слоя, обнажается подлежащая поверхность и резко увеличивается коэффициент трения. Далее цикл повторяется по аналогичному сценарию. Обнаруженная в работе [16] минимизация изнашивания пластин с TiB_2 авторами объясняется образованием большого количества трибооксида B_2O_3, таким образом обнаруженный нами эффект можно отнести к случаю влияния B_2O_3 на процессы трения. Таким образом, характер изнашивания в реальных условиях резания обеспечивает равномерный износ покрытия с низким коэффициентом трения.

Основным механизмом износа покрытия TiB_2 при испытаниях в условиях комнатной температуры являлся абразивный износ, который трансформировался в абразивный износ и окислительный износ при высокой температуре. Вне зависимости от условий испытаний наблюдается равномерный характер изнашивания покрытия. Повышенная скорость износа при высокой температуре испытаний объясняется реакцией фрикционного окисления по всей поверхности трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание –удаление».

Противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия TiAlSiN, причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний. Особенно это важно при экспериментах с температурным воздействием, где у покрытия TiAlSiN происходит полная деструкция с частичным износом подложки.

Заключение

В работе проведены испытания покрытий TiB_2 и TiAlSiN в исходном состоянии, после предварительного термического нагрева в печи (700 °C)

и при испытании в термокамере трибометра при температуре 700 °C. Результаты работы показали, что противоизносные свойства TiB_2 более ярко выражены относительно покрытия TiAlSiN, причем данное утверждение справедливо для всех вариантов испытаний и варьируется от 2 до 7 кратного повышения износостойкости в зависимости от условий эксперимента. Характер изнашивания покрытия TiB_2 в целом равномерный, тогда как у покрытия TiAlSiN при испытаниях с тепловым воздействием имеет место полная деструкция с частичным повреждением подложки. Установлено, что при испытании в термокамере трибометра коэффициент трения покрытия TiB_2 снижается вплоть до величины 0,1 с формированием антифрикционной пленки, которая под действием механических нагрузок разрушается с резким увеличением коэффициента трения, в результате чего поверхность покрытия находится в динамическом процессе «окисление – изнашивание –удаление». Такой механизм обеспечивает стабильный и равномерный износ покрытия, что благоприятно будет сказываться при практическом применении в условиях контактных процессов при резании материалов. В качестве дальнейших перспектив исследования целесообразно будет провести элементный анализ тонких поверхностных слоев, сформированных на дорожках трения, чтобы определить природу химических соединений.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2023-0003)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Casais, R., Baptista, A.M., Silva, F.J., Andrade, F., Sousa, V., Marques, M.J. Experimental study on the wear behavior of B_4C and TiB_2 monolayered PVD coatings under high contact loads. 2022. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120, pp. 6585 - 6604.

[2] Kiryukhantsev – Korneev, P., Sytchenko, A., Kaplanskii, Y., Sheveyko, A., Vorotilo, S., Levashov, E. Structure, Corrosion Resistance, Mechanical and Tribological Properties of ZrB_2 and Zr-B-N Coatings. 2021. Metals. 11, 1194.

[3] Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. 2022. Surface and Coatings Technology. 429, 127949.

[4] Petrov, I., Hall, A., Mei, A.B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J., Hultman, L., Greene, J.E. Controlling

the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited TiB_x thin films. 2017. Journal of Vacuum Science & Technology A. 35(5), 050601.
[5] Šroba, V., Fiantok, T., Truchlý, M., Roch, T., Zahoran, M., Grančič, Peter Švec, B., Nagy, S., Izai, V., Kúš, P., Mikula, M. Structure evolution and mechanical properties of hard tantalum diboride film. 2020. Journal of Vacuum Science & Technology A. 38(3), 033408.
[6] Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Kovalyuk, T.T., Rappich, J., Gluba, M. Kinetic properties of TIN thin films prepared by reactive magnetron sputtering. 2013. Physics of the Solid State. 55(11), pp. 2234-2238.
[7] Wang, Z., Fu, T., Xie, B., Wang, H., Ye, P., Pan, X. Self-Lubricating Property of TiB_2-Ni Coating in the Hot Forging Die of Aluminum Alloy. 2022. Coatings. 12, 829.
[8] Rao, J., Cruz, R., Lawson, K.J., Nicholls, J.R. Carbon and titanium diboride multilayer coatings. 2004. Diamond and Related Materials. 13, pp. 2221 - 2225.
[9] Shi, Y., Chen, Z., Ji, L., Xiao, G., Yi, M., Zhang, J., Chen, H., Xu, C. Cutting performance and antifriction mechanism of Al_2O_3/TiC/TiB_2/h-BN/Al_2O_3 self-lubricating ceramic tool. 2023. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 125, pp. 809 - 818.
[10] Grigoriev, S., Volosova, M., Mosyanov, M., Fedorov, S. The Study of Radius End Mills with TiB_2 Coating When Milling a Nickel Alloy. 2023. Materials. 16, 2535.
[11] Akgün, M., Kara, F. Analysis and Optimization of Cutting Tool Coating Effects on Surface Roughness and Cutting Forces on Turning of AA 6061 Alloy. 2021. Advances in Materials Science and Engineering. 2021, pp. 466 - 472.
[12] Zainal1, A., Zakaria, M.H., Che Ghani, S.A. Investigation on machining performance of TiB_2 and TiN coatings with modified cutting insert in AISI 1017 turning. 2020. IOP Conference Series: Materials Science. 788, 012009.
[13] Alhadeff, L., Marshall, M., Slatter, T. The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. 2019. Precision Engineering. 60, pp. 306 - 319.
[14] Lee, K.W., Chung, Y.W., Korach, C., Keer, L.M. Tribological and dry machining evaluation of superhard TiB_2/TiC multilayer coatings deposited on Si(001), M2 steel, and C3 WC cutting tool inserts using magnetron sputtering. 2005. Surface and Coatings Technology. 194, pp. 184-189.
[15] Chowdhury, M.S.I., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S.C. Investigation of the Wear Performance of TiB_2 Coated Cutting Tools during the Machining of Ti6Al4V Alloy. 2021. Materials. 14, 2799.

[16] Шустер, Л.Ш., Фокс-Рабинович, Г.С., Чертовских, С.В. Влияние режимов резания на износостойкость инструментов с покрытием TiB_2 при обработке титанового сплава. 2021. Трение и износ. 42(6), С. 707-716.
[17] Zhao, G., Wang, J., Deng Y., Yan, T., Liang, W., Li, T., Zhang, L., Jia, Q., Wan, Y. The study of the tribological properties of TiB_2/Cr multilayered coatings over a wide temperature range. 2022. Journal of Materials Research and Technology. 16, pp. 290−301.

M.A. Volosova[1], A.P. Mitrofanov[1], Y.R. Meleshkin[1], S.V. Fedorov[1]

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TITANIUM DIBORIDE COATINGS UNDER THERMOMECHANICAL CONDITIONS

[1] Moscow State Technological University «Stankin», Russia;

Abstract

The paper considers the influence of thermal influence on tribological properties of TiB_2 coating in comparison with the known and frequently used TiAlSiN coating on cutting inserts. The results showed that the anti-wear properties of TiB_2 are more pronounced relative to TiAlSiN coating, and this statement is true for all variants of tests with a uniform character of wear of TiB_2 coating. It is established that the temperature effect has a positive effect on the friction coefficient of TiB_2 coating reducing it down to a value of 0.1 with the formation of antifriction film, which under the action of mechanical loads is torn off with a sharp increase in the coefficient of friction, resulting in the coating surface is in the dynamic process of ‘oxidation - wear - removal’. This mechanism provides stable and uniform wear of the coating, whereas TiAlSiN coating undergoes complete destruction with partial damage to the substrate.

Key words: TiB_2 coating, friction coefficient, friction path morphology, wear resistance, elemental analysis, thermal effects.

This work was funded by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FSFS-2023-0003.

REFERENCES

[1] Casais, R., Baptista, A.M., Silva, F.J., Andrade, F., Sousa, V., Marques, M.J. Experimental study on the wear behavior of B4C and TiB2 monolayered PVD coatings under high contact loads. 2022. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120, pp. 6585 - 6604.
[2] Kiryukhantsev – Korneev, P., Sytchenko, A., Kaplanskii, Y., Sheveyko, A., Vorotilo, S., Levashov, E. Structure, Corrosion Resistance, Mechanical and Tribological Properties of ZrB_2 and Zr-B-N Coatings. 2021. Metals. 11, 1194.
[3] Schalk, N., Tkadletz, M., Mitterer, C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. 2022. Surface and Coatings Technology. 429, 127949.
[4] Petrov, I., Hall, A., Mei, A.B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J., Hultman, L., Greene, J.E. Controlling the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited TiB_x thin films. 2017. Journal of Vacuum Science & Technology A. 35(5), 050601.
[5] Šroba, V., Fiantok, T., Truchlý, M., Roch, T., Zahoran, M., Grančič, Peter Švec, B., Nagy, S., Izai, V., Kúš, P., Mikula, M. Structure evolution and mechanical properties of hard tantalum diboride film. 2020. Journal of Vacuum Science & Technology A. 38(3), 033408.
[6] Solovan, M.N., Brus, V.V., Maryanchuk, P.D., Kovalyuk, T.T., Rappich, J., Gluba, M. Kinetic properties of TIN thin films prepared by reactive magnetron sputtering. 2013. Physics of the Solid State. 55(11), pp. 2234-2238.
[7] Wang, Z., Fu, T., Xie, B., Wang, H., Ye, P., Pan, X. Self-Lubricating Property of TiB_2-Ni Coating in the Hot Forging Die of Aluminum Alloy. 2022. Coatings. 12, 829.
[8] Rao, J., Cruz, R., Lawson, K.J., Nicholls, J.R. Carbon and titanium diboride multilayer coatings. 2004. Diamond and Related Materials. 13, pp. 2221 - 2225.
[9] Shi, Y., Chen, Z., Ji, L., Xiao, G., Yi, M., Zhang, J., Chen, H., Xu, C. Cutting performance and antifriction mechanism of Al_2O_3/TiC/TiB_2/h-BN/Al_2O_3 self-lubricating ceramic tool. 2023. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 125, pp. 809 - 818.
[10] Grigoriev, S., Volosova, M., Mosyanov, M., Fedorov, S. The Study of Radius End Mills with TiB_2 Coating When Milling a Nickel Alloy. 2023. Materials. 16, 2535.
[11] Akgün, M., Kara, F. Analysis and Optimization of Cutting Tool Coating Effects on Surface Roughness and Cutting Forces on Turning of AA 6061 Alloy. 2021. Advances in Materials Science and Engineering. 2021, pp. 466 - 472.
[12] Zainal1, A., Zakaria, M.H., Che Ghani, S.A. Investigation on machining performance of TiB_2 and TiN coatings with modified cutting insert in AISI

1017 turning. 2020. IOP Conference Series: Materials Science. 788, 012009.
[13] Alhadeff, L., Marshall, M., Slatter, T. The influence of tool coating on the length of the normal operating region (steady-state wear) for micro end mills. 2019. Precision Engineering. 60, pp. 306 - 319.
[14] Lee, K.W., Chung, Y.W., Korach, C., Keer, L.M. Tribological and dry machining evaluation of superhard TiB_2/TiC multilayer coatings deposited on Si(001), M2 steel, and C3 WC cutting tool inserts using magnetron sputtering. 2005. Surface and Coatings Technology. 194, pp. 184-189.
[15] Chowdhury, M.S.I., Bose, B., Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S.C. Investigation of the Wear Performance of TiB_2 Coated Cutting Tools during the Machining of Ti6Al4V Alloy. 2021. Materials. 14, 2799.
[16] Shuster, L., Fox-Rabinovich, G., Chertovskikh, S. Influence of Cutting Conditions on the Wear Resistance of Tools with a TiB2 Coating during Titanium Alloy Machining. 2021. Journal of Friction and Wear. 42, pp. 466-472.
[17] Zhao, G., Wang, J., Deng Y., Yan, T., Liang, W., Li, T., Zhang, L., Jia, Q., Wan, Y. The study of the tribological properties of TiB_2/Cr multilayered coatings over a wide temperature range. 2022. Journal of Materials Research and Technology. 16, pp. 290−301.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id-124

М.А.Скотникова[1], Г.В.Иванова[2], Г.В.Цветкова[3], Е.О.Куома[4], Д.С.Мишарев[5]

ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ



[1]Маргарита Александровна Скотникова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (921)987-8752, E-mail: skotnikova@mail.ru



[2]Галина Валерьевна Иванова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (921)575-9143, E-mail: galura@yandex.ru



[3]Галина Викторовна Цветкова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (911)902-9933, E-mail: tsvetkova_gv@mail.ru



[4]Куома Егор Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (952)486-7009, E-mail: kuk.kukob@yandex.ru



[5]Мишарев Дмитрий Сергеевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (911)828-8301, E-mail: dmisharev@gmail.com

Аннотация

Проведен сравнительный анализ результатов трибологических испытаний базовой пластичной смазки МС 5123-2 со сложной

двухкомпонентной (жидкостной и каркасной) структурой до и после добавления порошка частиц меди размером 45 мкм с различной концентрацией. Показано, что интенсивность изнашивания (I) шариков (из ШХ15) при 10 секундных испытаниях в смазке с добавлением частиц меди с концентрацией 0,5 и 1,0 %, оказалась равной 2,1192 10^{-7} и 1,2037 10^{-7}, соответственно, что по сравнению с базовой MS 5123-2 (I = 2,2489 10^{-7}), оказалась меньше в 1,1 и 1,9 раз, соответственно. Показатель износа (Dи) шариков (из стали ШХ15) при 1-часовом испытании в смазке с добавлением частиц меди с концентрацией 0,5 и 1,0 %, оказался равным 0,697 и 0,525 мм, соответственно, что по сравнению с базовой MS 5123-2 (Dи = 1,03 мм), оказался меньше в 1,5 и 2,0 раза, соответственно. Металлографические исследования показали, что с увеличением концентрации частиц меди, наблюдалось увеличение размера каркасных зерен в пластичной смазке и снижение её прочности.

Ключевые слова: пластичная смазка, частицы меди, трибологические свойства смазки.

Введение

При эксплуатации, износ подшипниковых узлов трения и их разрушение приводят к простоям в работе оборудования и дорогостоящему ремонту, что сокращает межремонтный ресурс и надежность работы подшипников [1-3].

Также значительные расходы обусловлены недооценкой значимости проблем износостойкости и долговечности подшипниковых узлов, как на этапе эксплуатации, так и на этапе разработки защитных пластичных смазочных материалов с высокими триботехническими характеристиками, с рациональным составом основных компонентов и концентрацией функциональных добавок [4-6].

Медь и медные порошки давно используются во многих промышленных приложениях, таких как: специальные проводящие материалы, износостойкие материалы, высокоэффективные катализаторы и добавки к смазочным материалам [7-13].

При работе подшипников в среде смазочных материалов, в зоне контактного взаимодействия трибосистемы «вал – втулка (вкладыш)», возникает сложный многофакторный процесс взаимодействия: трения, износа, адгезии, деформации, разрушения, на соотношение величин которых влияют физико-механические, химические, тепловые, релаксационные свойства контактирующих материалов, контактные напряжения, смазка, частота оборотов, температура и т.д.

Целью данной работы являлся сравнительный анализ результатов трибологических испытаний пластичного смазочного материала (ПСМ) МС 5123-2 с добавлением частиц меди размером 45 мкм и различной

концентрацией, для управления её трибологическими свойствами и использования в подшипниковых узлах трения.

Методы

В данной работе трибологические характеристики смазочных материалов с различным содержанием медного порошка были оценены на машине трения ЧШМ-3,2 с частотой оборотов шпинделя 1500 об/мин, для определения оптимальных параметров ПСМ до и после добавления медного порошка, (см. рис. 1).

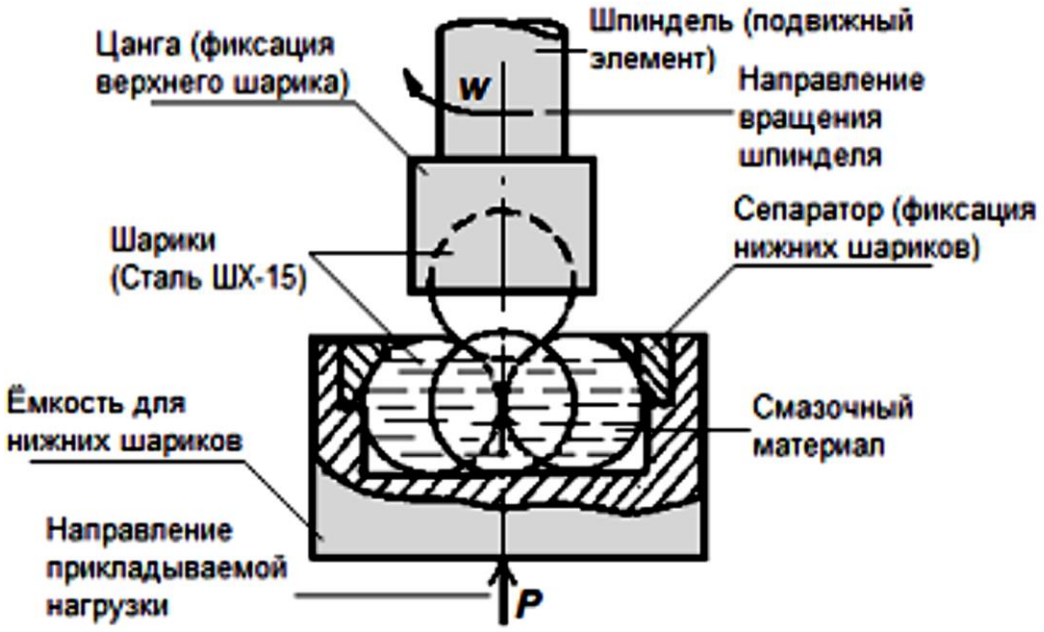


Рис. 1. Схема элементов узла трения машины ЧШМ-3,2

Испытанию подвергались 5 составов ПСМ по методике и режимам, описанным в ГОСТ 9490-1975 [14] и ГОСТ 32501-2013 [15]. Характеристики, подлежащие определению для всех марок ПСМ: показатель износа (Dи), интенсивность износа (I), критическая нагрузка (Ркр), нагрузка сваривания (Рсв), индекс задира (Из).

Пара 1: 120 шариков (сталь ШХ15) – в среде Базового ПСМ (Исходное состояние);

Пара 2: 120 шариков (сталь ШХ15) – в среде ПСМ + медной пудры с размером (45 мкм), долей 1,5%;

Пара 3: 120 шариков (сталь ШХ15) – в среде ПСМ + медной пудры с размером (45 мкм), долей 1%;

Пара 4: 120 шариков (сталь ШХ15) – в среде ПСМ + медной пудры с размером (45 мкм), долей 0,5%;

Пара 5: 120 шариков (сталь ШХ15) – в среде ПСМ + медной пудры чешуйчатой с размером (45 мкм), долей 0,25%.

Смазка закладывалась в чашу таким образом, чтобы шарики полностью были погружены в смазочный материал. Для каждой пробы пластичного смазочного материала были проведены от 8 до 15 испытаний с увеличением нагрузки до момента сваривания шариков.

Первая серия испытаний проводилась в течение 10 сек. (в широком интервале нагрузок от 200 до 2250 Н) и в течение 1 ч. (при нагрузке 200 Н) для определения среднего диаметра пятна износа шариков (dw) и показателя износа (Di), соответственно.

Расчет интенсивности изнашивания (I) шариков (отношение объемного износа шаров (Vw) к пути трения (L) при испытании 10 сек) производили по формуле (1).

$$\mathbf{I = Vw / L} \quad (1)$$

Расчет объёмного износа шаров (Vw) проводили по формуле (2)

$$V_w \cong 2\pi h_{w0.5}^2 \left(R - \frac{h_{w0.5}}{3}\right) \quad (2)$$

где R – радиус шара. Поскольку диаметр шаров равен 12,7 мм, а их радиус равен 6,35 мм,

$$V_w \cong 2\pi h_{w0.5}^2 \left(6{,}35 - \frac{h_{w0.5}}{3}\right)$$

где, $h_{w0.5}$ зысота изношенного шарового сегмента определялась по [15]

$$h_{w0.5} = 0.5\left(D - \sqrt{D^2 - d_w^2}\right) \quad (3)$$

где D – диаметр шара, dw – средний диаметр пятна (лунки) износа, для соответствующих серий испытаний.

$$h_{w0.5} = 0.5\left(12.7 - \sqrt{161.29 - d_w^2}\right)$$

Расчет пути трения (L). Поскольку частота оборотов шпинделя 1500 об/мин = 25 об/с, то за 10 секунд шарик делает – 250 оборотов.

Путь 1 оборота = $2\pi R$ = 6,28·3,175 = 19,939 мм = 20 мм.

L = 20 мм · 250 обор. = 5000 мм — это путь трения за 10 сек, на который нужно делить линейный (или объёмный) износ.

Результаты и обсуждение

На рисунках 2 - 4 представлены значения среднего диаметра пятна износа, интенсивности изнашивания шариков от нагрузки в результате испытания ПСМ на основе МС-5123-2 с частицами меди чешуйчатой формы размером 45 мкм и с различной концентрацией (0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 %).

Видно, что смазки, содержащие концентрацию медного порошка 0,5 и 1,0%, обладали большей стойкостью к износу. Интенсивность изнашивания (I) шариков (из стали ШХ15) при 10 секундных испытаниях в смазке с

добавлением частиц меди с концентрацией 0,5 и 1,0 %, оказалась равной 2,1192 10^{-7} и 1,2037 10^{-7}, соответственно, что по сравнению с базовой MS 5123-2 (I = 2,2489 10^{-7}), оказалась меньше в 1,1 и 1,9 раз, соответственно.

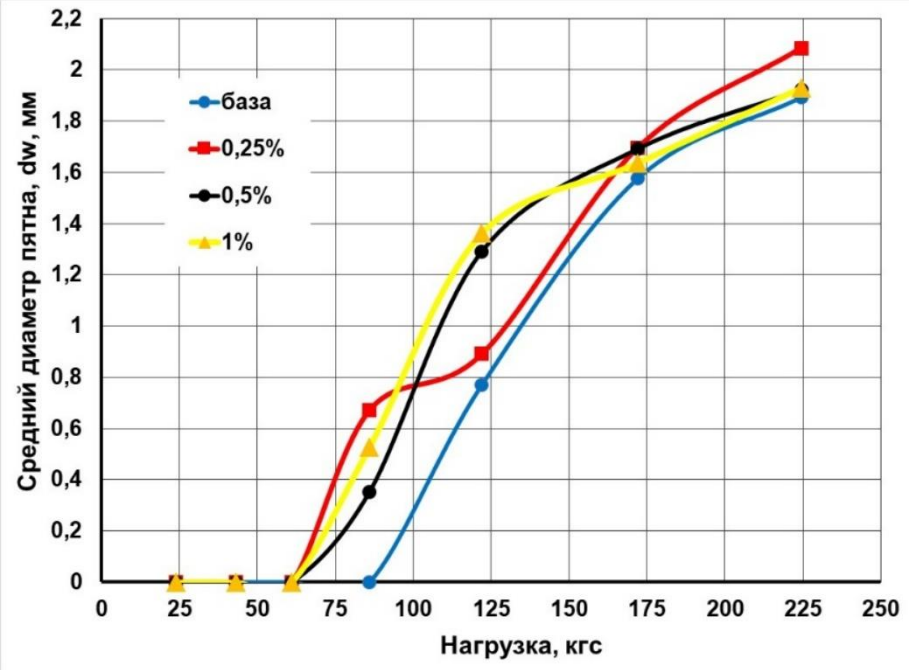


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра пятна износа шариков от нагрузки (после 10 сек. испытаний) для 4-х пластичных смазок с добавлением медной пудры чешуйчатой формы размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0 %.

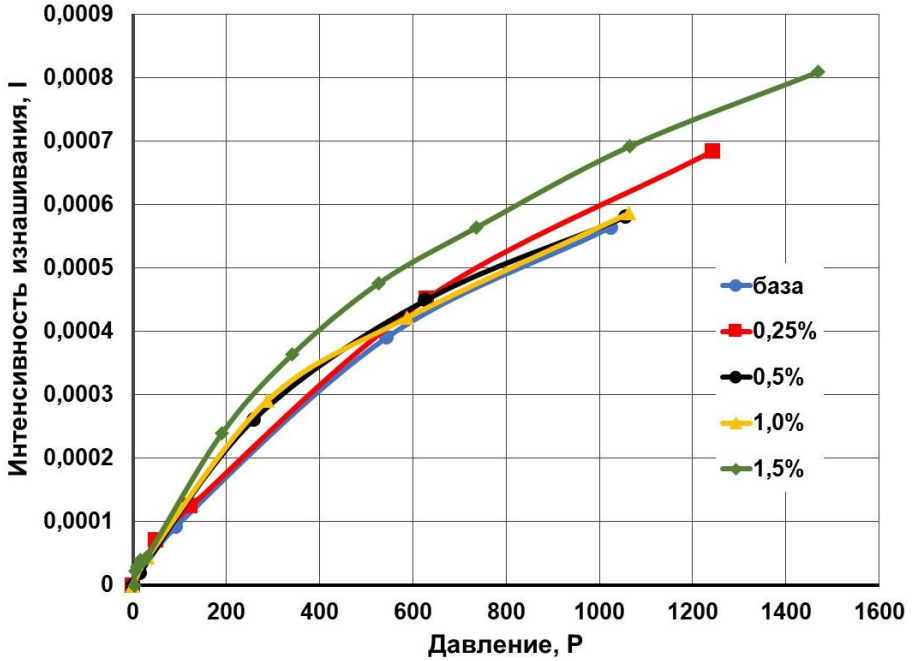


Рис. 3 – Зависимость интенсивности изнашивания шариков в течении 10 сек. от давления для 5-ти пластичных смазок с добавлением медной пудры размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 %

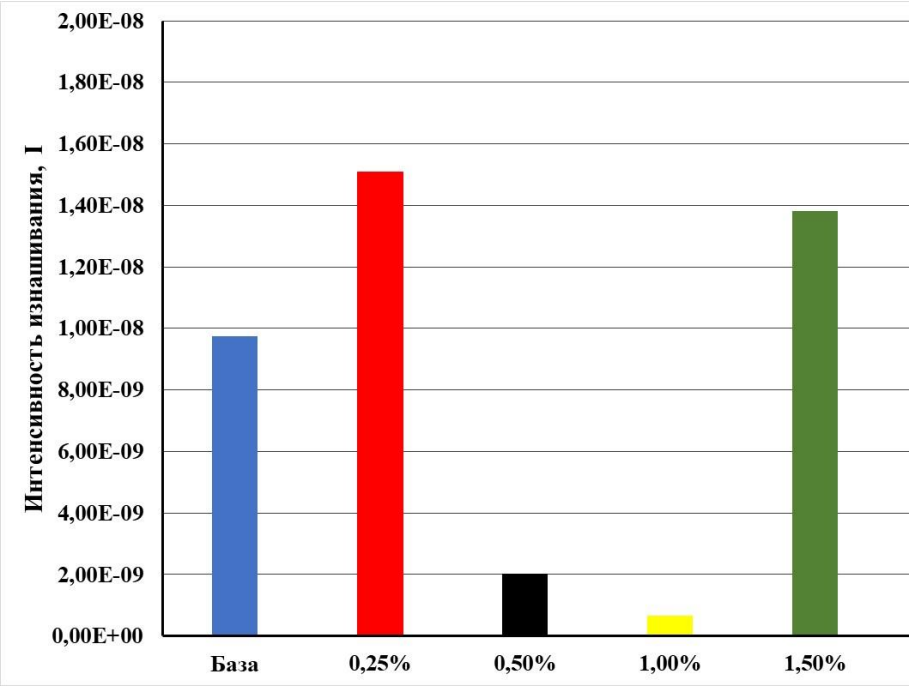


Рис. 4 – Зависимость интенсивности изнашивания шариков после часовых испытаний при нагрузке 20 кгс для 5-ти пластичных смазок с добавлением медной пудры чешуйчатой формы размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 %

График значений индекса задира для пяти ПСМ, (рис. 5), показал, что смазки, содержащие 0,25-1,0% частиц меди, обладали относительно хорошими трибологическими свойствами.

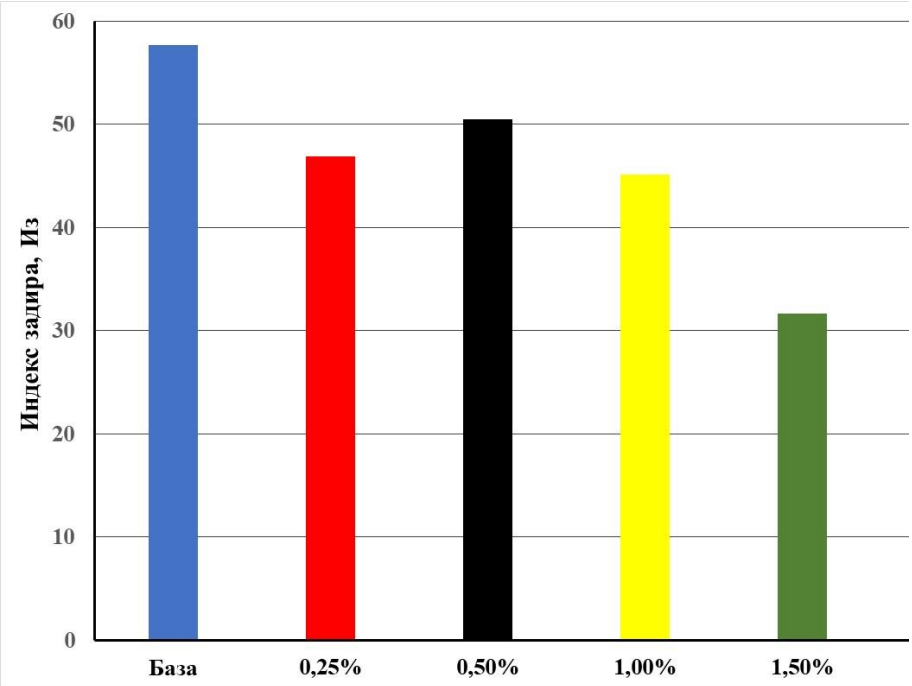


Рис. 5 – Диаграмма значений индекса задира, Из, для 5-ти пластичных смазок с добавлением медной пудры чешуйчатой формы размером 45 мкм и с концентрацией: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 %

Согласно сводной таблице 1 влияния концентрации частиц меди на трибологические свойства видно, что увеличение концентрации добавки меди улучшает противоизносные и снижают прочностные свойства базовой смазки в исследованном диапазоне концентраций (от 0,5 до 1,0 %).

Таблица 1. Сводная таблица влияние концентрации частиц меди на трибологические свойства ПСМ МС-5123-2

№, п/п	Наименование смазочного материала	Показатель износа (Dи), мм	Индекс задира (Из), кгс	Критическая нагрузка (Рк), кгс	Нагрузка сваривания (Рсв), кгс
1	Базовая смазка МС-5123-2	1,03	61,94	98,4	264,7
2	Базовая + 0,25% чешуек Cu	1,15	46,84	86	264,7
3	Базовая + 0,5% чешуек Cu	**0,697**	50,5	86	264,7
4	Базовая + 1,0% чешуек Cu	**0,525**	45,1	86	264,7
5	Базовая + 1,5% чешуек Cu	1,13	31,66	83,4	224,5

Микроструктуру площадок трения рабочих поверхностей образцов до и после испытания исследовали с помощью Микровизора отраженного света μVizo-MET при увеличении х500 крат (рис. 6).

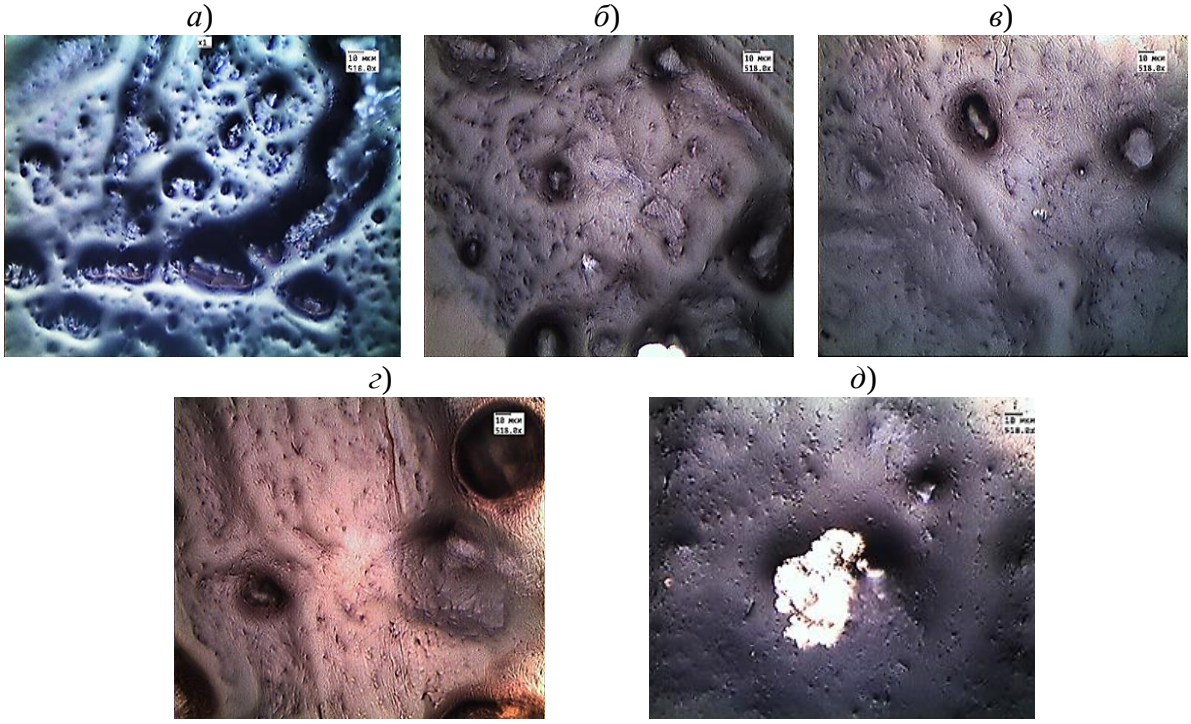


Рис. 6 – Микроструктура поверхности трения х500: *а*) Базовой смазки ПСМ-5123-2; *б*) базовой смазки + 0,25% чешуек Cu; *в*) базовой смазки + 0,5% чешуек Cu; *г*) базовой смазки + 1,0% чешуек Cu; *д*) базовой смазки + 1,5% чешуек Cu.

По результатам исследования микроструктуры смазки до и после модификации медью (рис. 6) видно, что с увеличением концентрации частиц меди, значительно увеличивался средний размер каркасов (зерен) пластичных смазочных материалов.

Заключение

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Интенсивность изнашивания (I) шариков (из стали ШХ15) при 10 секундных испытаниях в смазке с добавлением частиц меди с концентрацией **0,5 и 1,0 %,** оказалась равной 2,1192 10^{-7} и 1,2037 10^{-7}, соответственно, что по сравнению с базовой MS 5123-2 (I = 2,2489 10^{-7}), оказалась **меньше** в 1,1 и 1,9 раз, соответственно.

2. Показатель износа (Dи) шариков (из стали ШХ15) при 1-часовом испытании в смазке с добавлением чешуйчатой пудры из меди с концентрацией **0,5 и 1,0 %,** оказался равным 0,697 и 0,525 мм, соответственно, что по сравнению с базовой MS 5123-2 (Dи = 1,03 мм), оказался **меньше** в 1,5 и 2,0 раза, соответственно.

3. Металлографические исследования показали, что с увеличением концентрации медных частиц, наблюдалось увеличение каркасных зерен в пластичной смазке и снижение её прочности.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20092, https://rscf.ru/project/25-19-20092

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бай Я.С. Состояние исследований и прогресс в области износа шарнирных подшипников. Modern Manufacturing Engineering, 2012. С. 5.

[2] Пэн П., Чжу Ц.Ж., Гэо Ц. Прогресс в исследовании фрикционного износа. Современные производственные технологии и оборудование. - 2021. - Т. 57. - № 10. - С.112-114.

[3] Чжао Л.Ц., Бэй В.Д. Исследование и перспективы проблем износа подшипников качения. Механическая прочность. - 2016. - Т. 38. - № 6. - С.1189-1193.

[4] Skotnikova M.A., Breki A.D., Evsinc M.G., Kalinind V.Y., Wasilewskie M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils. AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2340. - 060005.

[5] Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Fadin Y.A. Antiwear properties of composite greases "LITOL-24–magnesium hydrosilicate

particles". Inorganic Materials: Applied Research. - 2018. - Т. 9. - № 1. - pp. 21-25.
[6] Margarita A. Skotnikova, Eugene K. Ivanov, Galina V. Ivanova, Ilnur S. Syundyukov, and Alexey Yu. Ryabikin. Comparative Studies of Motor Oils on Upgraded Friction Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, p. 59-69.
[7] Чжан Л. Исследование характеристик фрикционного износа и применение субмикронной меди в качестве присадок к смазочным материалам. Чунцинский университет. - 2017.
[8] Ли Р.Ю. Получение нанопорошка меди и его поведение в смазочном масле. Гуандунский технологический университет. - 2019.
[9] Хань Ш.С. Анализ и оптимизация трибологических свойств медных нанодобавок для смазочных материалов. Сианьский технологический университет. - 2016.
[10] Шу С., Лю Я.Ч., Ли В. Прогресс в исследовании токопроводящего фрикционного износа композитов с медной матрицей. Специальное литье и цветные сплавы. - 2022. - Т. 42. - № 4. - С.419-424.
[11] Хуссеин Х.А. Твёрдые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов: автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб, 2009. 18 с.
[12] Терентьев В. В., Акопова О. Б., Телегин И. А. Влияние мезогенной присадки бегената меди на реологические и триботехнические характеристики пластичных смазок. Жидк. крист. и их практич. использ. / Liq. Cryst. and their Appl, 2017, 17 (1), 93–100.
[13] Докшанин С.Г. Применение смазочных материалов с ультрадисперсными металоплакирующими наполнителями в опорах качения нефтегазового технологического оборудования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук Машиностроение и машиноведение, 2017, том 19, №1(2), 225-228.
[14] ГОСТ 9490–75 «Материалы смазочные жидкие и пластичные».
[15] ГОСТ 32501-2013. «Смазки пластичные. Определение противозадирных свойств на четырехшариковой машине». М.: Стандартинформ, 2019 год.

M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, G.V. Tsvetkova, E.O. Kuoma, D.S. Misharev

PLASTIC LUBRICANTS FOR FRICTION BEARING UNITS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A comparative analysis of the results of tribological tests of the basic MS 5123-2 grease with a complex two-component (liquid and frame) structure before and after the addition of 45 microns of copper particle powder with different concentrations was carried out. It is shown that the wear rate of (I) balls (from WX15) during 10-second tests in a lubricant with the addition of copper particles with a concentration of 0.5 and 1.0% turned out to be 2.1192 10^{-7} and 1.2037 10^{-7}, respectively, which compared with the base MS 5123-2 (I = 2.2489 10^{-7}), turned out to be 1.1- and 1.9-times lower times, respectively. The wear index (Di) of the balls (made of steel SHX15) during a 1-hour test in a lubricant with the addition of copper particles with a concentration of 0.5 and 1.0% turned out to be 0.697 and 0.525 mm, respectively, which, compared with the base MS 5123-2 (Di = 1.03 mm), turned out to be 1.5 and 2.0 times less, accordingly. Metallographic studies have shown that with an increase in the concentration of copper particles, there was an increase in the size of the frame grains in the grease and a decrease in its strength.

Keywords: grease, copper particles, tribological properties of the lubricant.

REFERENCES

[1] Bai Ya.S. The state of research and progress in the field of wear of articulated bearings. Modern Manufacturing Engineering, 2012. C. 5.

[2] Peng P., Zhu C.J., Geo C. Progress in the study of frictional wear. Modern production technologies and equipment. - 2021. - Vol. 57. - No. 10. - pp.112-114.

[3] Zhao L.C., Bei V.D. Research and prospects of rolling bearing wear problems. Mechanical strength. - 2016. - Vol. 38. - No. 6. - pp.1189-1193.

[4] Skotnikova M.A., Breki A.D., Evsinc M.G., Kalinind V.Y., Wasilewskie M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils. AIP Conference Proceedings. - 2021. - 2340. - 060005.

[5] Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Fadin Y.A. Antiwear properties of composite greases "LITOL-24–magnesium hydrosilicate

particles". Inorganic Materials: Applied Research. - 2018. - T. 9. - № 1. - pp. 21-25.
[6] Margarita A. Skotnikova, Eugene K. Ivanov, Galina V. Ivanova, Ilnur S. Syundyukov, and Alexey Yu. Ryabikin. Comparative Studies of Motor Oils on Upgraded Friction Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, p. 59-69.
[7] Zhang L. Investigation of the characteristics of frictional wear and the use of submicron copper as additives to lubricants. Chongqing University. - 2017.
[8] Lee R.Y. Production of copper nanopowder and its behavior in lubricating oil. Guangdong University of Technology. - 2019.
[9] Han S.S. Analysis and optimization of tribological properties of copper nanoadditives for lubricants. Xi'an University of Technology. - 2016.
[10] Shu S., Liu Ya.Ch., Li V. Progress in the study of conductive friction wear of composites with a copper matrix. Special casting and non-ferrous alloys. - 2022. - Vol. 42. - No. 4. - pp.419-424.
[11] Hussein H.A. Solid composite additives based on metallized graphite for plastic lubricants: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg, 2009. 18 p.
[12] Terentyev V. V., Akopova O. B., Telegin I. A. Influence of the mesogenic additive of copper behenate on rheological and tribotechnical characteristics of plastic lubricants. Liquid. Krist. and their practicality. I use it. / Liq. Cryst. and their Appl, 2017, 17 (1), 93–100.
[13] Dokshanin S.G. The use of lubricants with ultrafine metal-coating fillers in rolling bearings of oil and gas technological equipment. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Mechanical Engineering and Machine Science, 2017, Volume 19, No. 1(2), 225-228.
[14] GOST 9490-75 "Liquid and plastic lubricating materials".
[15] GOST 32501-2013. "Lubricants are plastic. Determination of extreme pressure properties on a four-ball machine. Moscow: Standartinform, 2019.

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.865.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id-125

М.Я. Альвардт[1], Х.М. Аль-Аражи[2]

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИЗБЕГАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В РОБОТИЗИРОВАННОМ МАНИПУЛЯТОРЕ



[1]Альвардт Мохаммад Ясин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (920)470-0241, E-mail: moh.alwardat@yahoo.com.



[2]Аль-Аражи Хасан Мохаммед,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.:(964)790 259 7660, E-mail: uotechnology.edu.iq.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы разработки алгоритма управления в реальном времени для избегания препятствий и сингулярностей в роботизированном манипуляторе с шестью степенями свободы. Предложенный подход сочетает ПИД-регулятор в декартовом пространстве с методом обратной кинематики на основе демпфированных наименьших квадратов (ДНК) и оптимизацией в нуль-пространстве. Контроллер адаптивно переключается между режимами избегания, стабилизации и удержания в зависимости от расстояния до ближайшего препятствия, обеспечивая при этом плавность движения и устойчивость системы. Разработанный метод демонстрирует улучшенные показатели управляемости, устойчивости и безопасности по сравнению с классическим ДНК-подходом.

Ключевые слова: Манипулятор, избегание препятствий, сингулярность, ПИД-регулятор, демпфированные наименьшие квадраты ДНК, оптимизация в нуль-пространстве.

Введение

Современные роботизированные системы широко используются в различных сферах человеческой деятельности, включая промышленность, медицину и сервисные задачи [1], [2]. Одной из актуальных проблем при управлении роботизированными манипуляторами является обеспечение их эффективной и безопасной работы в средах, насыщенных препятствиями и характеризующихся потенциальными сингулярностями [3], [4]. Необходимость решения этих задач обусловлена потребностью в устойчивости и плавности движений, что является ключевым аспектом надежного функционирования роботизированных комплексов [5].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма управления в реальном времени, направленного на эффективное избегание препятствий и предотвращение сингулярностей для роботизированного манипулятора с шестью степенями свободы. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Разработать методику интеграции ПИД-регулятора с методом демпфированных наименьших квадратов (ДНК);
- Реализовать оптимизацию в нуль-пространстве для повышения манипулируемости и соблюдения механических ограничений;
- Провести моделирование и оценить эффективность предлагаемого алгоритма.

Современные исследования в области управления роботизированными манипуляторами показывают, что существующие методы часто сосредоточены либо на избегании препятствий, либо на минимизации влияния сингулярных конфигураций. Например, классический ДНК эффективно решает задачи обращения кинематики, но без оптимизации в нулевом пространстве остается уязвимым к сингулярностям [6], [7]. Методы динамического планирования траекторий улучшают избегание препятствий, но не всегда обеспечивают сохранение высокой манипулируемости системы [8], [9].

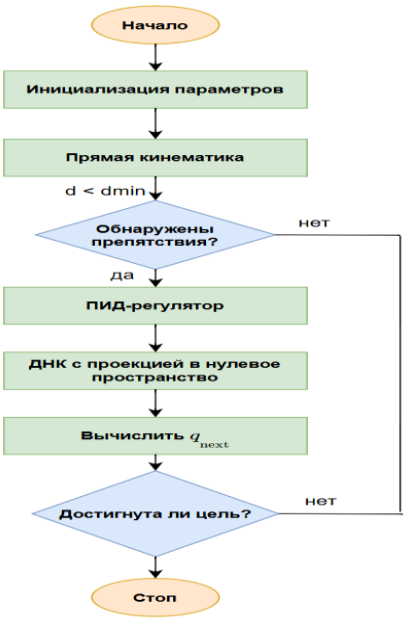
В то же время комплексные решения, одновременно учитывающие избегание препятствий и предотвращение сингулярностей в реальном времени, в научной литературе остаются ограниченными [10], [11], [12]. В связи с этим в данной работе предлагается интегрированный подход, сочетающий ПИД-регулирование, демпфированное обращение кинематики и оптимизацию в нулевом пространстве, что позволяет обеспечить устойчивое и безопасное движение манипулятора в сложных операционных условиях.

Основные результаты, полученные в ходе исследования, подтвердили эффективность предложенного алгоритма. Использование интегрированного подхода позволило значительно улучшить показатели

безопасности и устойчивости траекторий манипулятора, а также обеспечить его плавную работу в сложных условиях.

Методы

Разработанный алгоритм предназначен для обеспечения безопасного перемещения роботизированного манипулятора в реальном времени при наличии препятствий в рабочем пространстве. Он основан на вычислении расстояния до ближайшего объекта и динамическом изменении траектории движения с использованием интеграции ПИД-регулятора, демпфированного метода наименьших квадратов (ДНК) и оптимизации в нуль-пространстве.




```
Inputs:
  - P_obs[1:M]      # Obstacle positions
  - q_init          # Initial joint angles
  - d_target        # Target safe distance
  - PID gains (Kp, Ki, Kd)
  - Time step Δt
Initialize:
  - q ← q_init
  - e_integral ← 0
  - prev_error ← 0

Loop (for each control cycle):
  1. P_ee ← ForwardKinematics(q)
  2. For each obstacle i:
     d_i ← ||P_ee - P_obs[i]||
     e_i ← d_target - d_i
     If d_i < threshold:
        dir_i ← (P_ee - P_obs[i]) / ||P_ee - P_obs[i]||
        PID_i ← Kp * e_i + Ki * e_integral + Kd * (e_i - prev_error)/Δt
        X_desired_dot += PID_i * dir_i
  3. Update e_integral and prev_error
  4. Compute J ← Jacobian(q)
  5. Compute λ ← λ_0 + k_λ * |e|
  6. Compute q_dot ← J^T (J J^T + λ² I)^-1 X_desired_dot + (I - J^+ J) z
  7. q ← q + q_dot * Δt
  8. Enforce joint limits
  9. Repeat
```

Алгоритм 1: Пошаговый псевдокод (Pseudocode) для избегания препятствий

Для реализации поставленных задач и достижения целей исследования был разработан комплексный подход, основанный на интеграции трёх основных методов управления роботизированным манипулятором:

1. ПИД-регулятор в декартовом пространстве: данный метод использовался для генерации требуемой скорости конечного эффектора на основе оценки текущего расстояния до ближайших препятствий. Сигнал управления вычислялся следующим образом:

$$u(t) = k_p\, e(t) + k_i \int_0^t e(\tau)d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

Где $e(t)$ — ошибка в момент времени t. $u(t)$ — управляющий выходной сигнал (используется как величина скорости). k_p — Пропорциональный коэффициент →

реагирует на текущую ошибку. k_i — Интегральный коэффициент → накапливает прошлые ошибки (уменьшает установившуюся ошибку). k_d — Дифференциальный коэффициент → предсказывает будущую тенденцию (подавляет колебания).

2. Метод ДНК: для обеспечения численной устойчивости вычислений в условиях близости к сингулярным конфигурациям использовался метод ДНК, выраженный формулой:

$$\dot{q}_{\text{днк}} = J^T (J\,J^T + \lambda^2 I)^{-1} \dot{X}_{desired} \qquad (2)$$

Где: γ — коэффициент демпфирования (используется для предотвращения нестабильности вблизи сингулярностей). I — единичная матрица. $\dot{X}_{desired}$ — желаемая скорость конца исполнительного органа. $\dot{q}_{\text{днк}}$ — результирующий вектор скоростей сочленений.

3. Оптимизация в нуль-пространстве: для использования избыточных степеней свободы манипулятора и выполнения вторичных задач (таких как избегание механических ограничений суставов и повышение манипулируемости) была применена техника оптимизации в нуль-пространстве:

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{днк}} + (I - J^+ . J)\, z \qquad (3)$$

Где: J^+ — псевдообратная матрица на основе ДНК для избежания сингулярностей. I — единичная матрица. z — вторичная цель (например, отталкивание суставов от пределов или уход от сингулярностей). $(I - J^+ . J)$ — проектор нулевого пространства, обеспечивающий, чтобы влияние z не мешало достижению требуемой скорости конечного звена.

Интеграция ПИД, ДНК и нуль-пространств

Разработанный контроллер основан на многоуровневом подходе, объединяющем методы ПИД-регулирования, демпфированных наименьших квадратов ДНК и оптимизации в нуль-пространстве. Контроллер работает в режиме реального времени и обеспечивает непрерывную коррекцию траектории движения манипулятора при наличии препятствий и потенциальных сингулярностей.

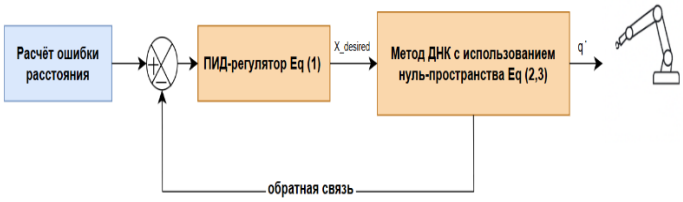


Рис. 1. Блок-схема контроллера

Математическое описание алгоритма избегания препятствий

1. Расчет расстояния до препятствия: Euclidean distance $d_{ee} = \|P_{ee} - P_{obstacle}\|$ где P_{ee} — положение конца манипулятора, $P_{obstacle}$ — положение ближайшего препятствия.
2. Ошибка расстояния: $e(t) = d_{target} - d_{ee}$. Это значение ошибки передаётся в ПИД-регулятор для генерации соответствующей реакции:
   - Если $e(t) > 0$, манипулятор находится слишком далеко от препятствия (нужно немного приблизиться);
   - Если $e(t) < 0$, манипулятор слишком близко (нужно быстро отодвинуться);
   - Если $e(t) = 0$ манипулятор находится на оптимальном расстоянии.
3. ПИД-регулятор:
$$u(t) = k_p\, e(t) + k_i \int_0^t e(\tau)d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}$$
4. Направление движения:
$$\hat{v} = \frac{P_{ee} - P_{obstacle}}{\|P_{ee} - P_{obstacle}\|}$$
5. Скорость в декартовом пространстве:
$$\dot{X}_{desired} = u(t).\hat{v}$$
$$\dot{X}_{desired} = \sum_{i\ with\ d_i<d_{max}} (P_i + I_i + D_i) \frac{P_{ee}-P_{obstacle}}{\|P_{ee}-P_{obstacle}\|}$$
6. Адаптивное демпфирование: $\lambda = \lambda_0 + k_\lambda . |e(t)|$
7. Метод ДНК: $\dot{q}_{\text{днк}} = J^T (J\, J^T + \lambda^2 I)^{-1} \dot{X}_{desired}$
8. Оптимизация в нуль-пространстве: $\dot{q} = \dot{q}_{\text{днк}} + (I - J^+ . J)\, z$
9. Индекс манипулируемости: $m = \sqrt{|\det(J^T J)|}$. Меньшее значение показателя m указывает на приближение робота к сингулярной конфигурации, что может негативно сказаться на эффективности управления.
10. Обновление состояния суставов: $q_{new} = q_{current} + \dot{q}\, dt$

Результаты

Результаты численного моделирования подтвердили эффективность предложенного алгоритма управления. При наличии трех статических препятствий в рабочем пространстве манипулятора система корректно определяла расстояние до ближайшего объекта и формировала безопасную траекторию движения конечного эффектора. Наблюдалось устойчивое избегание препятствий и стабильная работа при приближении к потенциальным сингулярностям.

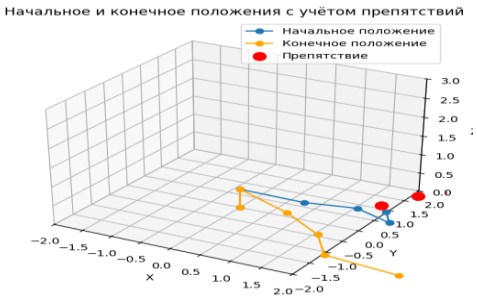


Рис. 2. Конфигурация робота

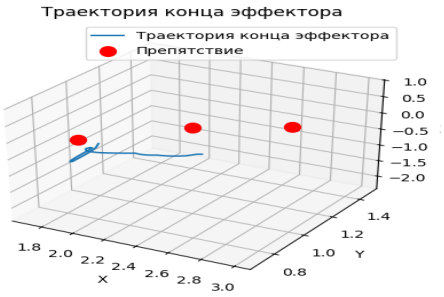


Рис. 3. Траектория движения

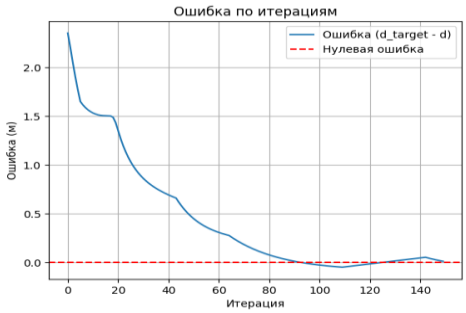


Рис. 4. Индекс манипулируемости

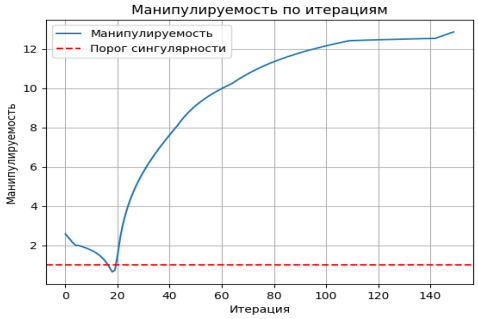


Рис. 5. Ошибка расстояния во времени

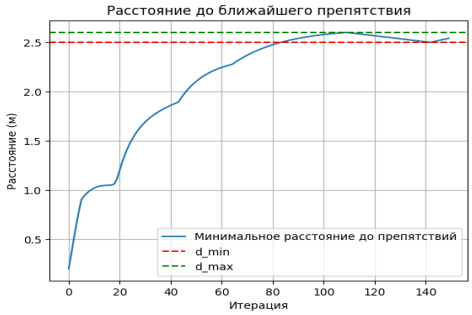


Рис. 6. Расстояние до ближайшего препятствия

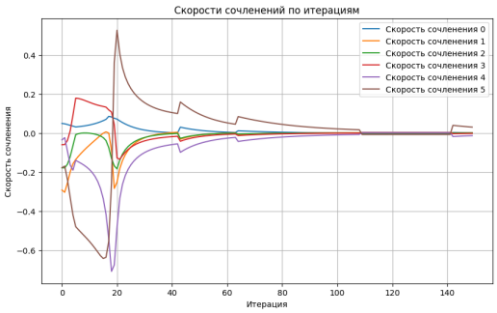


Рис. 7. Скорости сочленений

Таблица 1. Параметры предложенного алгоритма избегания препятствий

Параметр	Символ	Значение	Единица
ПИД	Kp, ki, kd	0.32, 0.005, 0.05	-
Шаг по времени	dt	0.15	s
Коэффициент демпфирования	λ	0.005	-
DLS base parameter	d_{min}	0.01	-
DLS scaling factor	k_λ	0.1	-
Мин и мак расстояние	d_{min}, d_{max}	2.5, 2.6	m
Целевое расстояние	d_{target}	2.55	m
Порог сингулярности	m_{thresh}	1.0	-
Количество итераций	N_{iter}	150	-

Сравнение ДНК и ДНК с оптимизацией в нуль-пространстве

Для оценки эффективности предлагаемой стратегии управления было проведено сравнительное исследование между классическим методом наименьших квадратов с демпфированием ДНК и усовершенствованным методом ДНК с оптимизацией в нулевом пространстве. Оба подхода были применены к одной и той же начальной конфигурации и среде с препятствиями для обеспечения справедливой оценки. Были оценены три основных показателя эффективности:

- Определитель матрицы JJ^T: для оценки избегания сингулярностей.
- Индекс манипулируемости: для количественной оценки подвижности манипулятора.
- Минимальное расстояние до ближайшего препятствия: для оценки эффективности избегания препятствий.

Таблица 2. Сравнение метода ДНК и ДНК с оптимизацией в нуль-пространстве

Metric	Только ДНК	ДНК в нуль-пространстве
Определитель матрицы JJ^T	57.5	57.9
Индекс манипулируемости	7.7	7.8
Минимальное расстояние (m)	2.0	2.5

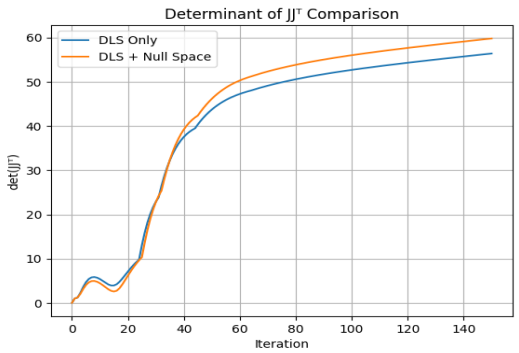


Рис. 8. Определитель матрицы JJ^T

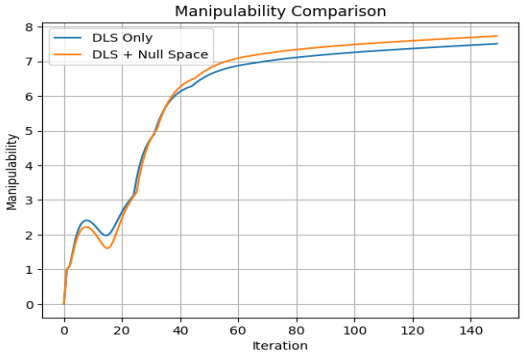


Рис. 9. Индекс манипулируемости

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода в сравнении с традиционными методами обратной кинематики. Интеграция ПИД-регулятора, метода ДНК и оптимизации в нуль-пространстве позволила достичь более стабильного и безопасного поведения манипулятора при работе в сложных условиях.

Особое внимание заслуживает тот факт, что предложенный контроллер демонстрирует улучшенные характеристики по нескольким ключевым метрикам:

- увеличение минимального расстояния до ближайших препятствий;
- повышение значения индекса манипулируемости;
- снижение колебаний суставных скоростей и сглаженность траектории движения.

Кроме того, динамическое переключение между режимами избегания, демпфирования и удержания позволило обеспечить адаптивное поведение системы, сохраняя её устойчивость при различных сценариях внешней среды. Такой подход делает предложенную стратегию особенно перспективной для применения в робототехнических системах, функционирующих в реальном времени и в условиях высокой неопределённости.

Заключение

В данной статье представлена эффективная и устойчивая стратегия управления для шестистепенного роботизированного манипулятора, обеспечивающая одновременное избегание препятствий и сингулярных конфигураций в режиме реального времени. Разработанный подход объединяет пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) контроллер с методом обратной кинематики, основанным на затухающих наименьших квадратах (ДНК), и оптимизацией в нулевом пространстве. Это позволяет системе не только реагировать на близость к препятствиям, но и избегать нежелательных конфигураций без нарушения основной задачи управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Zhang, L., Du, H., Qin, Z., Zhao, Y., & Yang, G. Real-time optimized inverse kinematics of redundant robots under inequality constraints. Scientific Reports. 2024. 14(1). pp. 29754. https://doi.org/10.1038/s41598-024-81174-8.

[2] Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., М’боло О.Э., Кочнева О. Исследование сингулярностей манипуляторов-роботов. Автоматизация. Современные технологии. 2024. №10. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

[3] Hameed, F. S., Alwan, H. M., & Ateia, Q. A. Obstacle avoidance method for highly redundant robotic arms. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. p. 012017.

[4] Zhang, Y., & Wang, H. Redundancy-based motion planning with task constraints for robot manipulators. Sensors. 2025. pp. 1900. https://doi.org/10.3390/s25061900.
[5] Elmogy, A., Alhemaly, N., & El-Ghaish, H. An enhanced neuro-adaptive PID sliding mode control for robot manipulators: Promoting sustainable automation. Neural Computing and Applications. 2025. pp. 6877–6898. https://doi.org/10.1007/s00521-025-10980-6
[6] Wang, X., Liu, X., Chen, L., & Hu, H. Deep-learning damped least squares method for inverse kinematics of redundant robots. Measurement. 2021. pp. 108821. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108821.
[7] Beck, F., Vu, M. N., & Kugi, A. Singularity avoidance with application to online trajectory optimization for serial manipulators. IFAC World Congress. pp. 284-291 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02516
[8] Palmieri, G., & Scoccia, C. Motion planning and control of redundant manipulators for dynamical obstacle avoidance. Machines. 2021. pp. 121. https://doi.org/10.3390/machines9060121.
[9] Ju, F., Jin, H., Wang, B., & Zhao, J. A predictable obstacle avoidance model based on geometric configuration of redundant manipulators for motion planning. Sensors. 2023. pp. 4642. https://doi.org/10.3390/s23104642
[10] Li, Y., & Wang, L. Comprehensive research and analysis on obstacle–singularity–joint limit avoidance of redundant robot. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2024. https://doi.org/10.1177/17298806241233910.
[11] Yoon, M., Kang, M., Park, D., & Yoon, S. Learning-based initialization of trajectory optimization for path-following problems of redundant manipulators. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2023. pp. 9686–9692. https://doi.org/10.1109/ICRA.2023.10161234
[12] Pagnotta, D., & Monteriu, A. Redundancy resolution scheme for manipulators subject to inequality constraints. International Journal of Control, Automation and Systems. 2023. pp. 575–590. https://doi.org/10.1007/s12555-021-0641-8.
[13] Zhang, X., Fan, B., Wang, C., & Cheng, X. An improved weighted gradient projection method for inverse kinematics of redundant surgical manipulators. Sensors. 2021. pp. 7362. https://doi.org/10.3390/s21217362
[14] Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., М’боло О.Э., Кочнева О. Геометрический вывод якобиана для шести степеней свободы с призматическим звеном. Робототехника и техническая кибернетика. 2024. №4. С. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403.
[15] Liang, Z., Quan, P., Di, S., & Huang, Z. Inverse kinematics optimization for redundant manipulators using motion-level factor. Mathematics. 2025. pp. 624. https://doi.org/10.3390/math13040624.

М. Я. Альвардт[1], Х. М. Аль-Аражи [2]

REAL-TIME CONTROL ALGORITHM FOR OBSTACLE AND SINGULARITY AVOIDANCE IN A ROBOTIC MANIPULATOR

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Технологический университет - Ирак

Abstract

This work addresses the development of a real-time control algorithm for obstacle and singularity avoidance in a six-degree-of-freedom robotic manipulator. The proposed approach combines a Cartesian PID controller with an inverse kinematics method based on Damped Least Squares (DLS) and null space optimization. The controller adaptively switches between avoidance, stabilization, and holding modes depending on the distance to the nearest obstacle, ensuring smooth motion and system stability. The developed method demonstrates improved performance in terms of manipulability, stability, and safety compared to the classical DLS approach.

Keywords: Manipulator, obstacle avoidance, singularity, PID controller, damped least squares, null space optimization.

REFERENCES

[1] Zhang, L., Du, H., Qin, Z., Zhao, Y., & Yang, G. Real-time optimized inverse kinematics of redundant robots under inequality constraints. Scientific Reports. 2024. pp. 29754. https://doi.org/10.1038/s41598-024-81174-8.

[2] Alwardat M.Y., Al-Araji H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Investigation of Singularities in Robot Manipulators. Automation. Modern Technologies. 2024. No. 10. pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.

[3] Hameed, F. S., Alwan, H. M., & Ateia, Q. A. Obstacle avoidance method for highly redundant robotic arms. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. p. 012017.

[4] Zhang, Y., & Wang, H. Redundancy-based motion planning with task constraints for robot manipulators. Sensors. 2025. pp. 1900. https://doi.org/10.3390/s25061900.

[5] Elmogy, A., Alhemaly, N., & El-Ghaish, H. An enhanced neuro-adaptive PID sliding mode control for robot manipulators: Promoting sustainable automation. Neural Computing and Applications. 2025. pp. 6877–6898. https://doi.org/10.1007/s00521-025-10980-6.

[6] Wang, X., Liu, X., Chen, L., & Hu, H. Deep-learning damped least squares method for inverse kinematics of redundant robots. Measurement. 2021. pp. 108821. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108821.
[7] Beck, F., Vu, M. N., & Kugi, A. Singularity avoidance with application to online trajectory optimization for serial manipulators. IFAC World Congress. pp. 284-291 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02516
[8] Palmieri, G., & Scoccia, C. Motion planning and control of redundant manipulators for dynamical obstacle avoidance. Machines. 2021. pp. 121. https://doi.org/10.3390/machines9060121.
[9] Ju, F., Jin, H., Wang, B., & Zhao, J. A predictable obstacle avoidance model based on geometric configuration of redundant manipulators for motion planning. Sensors. 2023. pp. 4642. https://doi.org/10.3390/s23104642.
[10] Li, Y., & Wang, L. Comprehensive research and analysis on obstacle–singularity–joint limit avoidance of redundant robot. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2024. https://doi.org/10.1177/17298806241233910.
[11] Yoon, M., Kang, M., Park, D., & Yoon, S. Learning-based initialization of trajectory optimization for path-following problems of redundant manipulators. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2023. pp. 9686–9692. https://doi.org/10.1109/ICRA.2023.10161234.
[12] Pagnotta, D., & Monteriu, A. Redundancy resolution scheme for manipulators subject to inequality constraints. International Journal of Control, Automation and Systems. 2023. pp. 575–590. https://doi.org/10.1007/s12555-021-0641-8.
[13] Zhang, X., Fan, B., Wang, C., & Cheng, X. An improved weighted gradient projection method for inverse kinematics of redundant surgical manipulators. Sensors. 2021. pp. 7362. https://doi.org/10.3390/s21217362
[14] Alwardat M.Y., Al-Araji H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Geometric Derivation of the Jacobian for a Six-Degree-of-Freedom Manipulator with a Prismatic Link. Robotics and Technical Cybernetics. 2024. No. 4. pp. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403.
[15] Liang, Z., Quan, P., Di, S., & Huang, Z. Inverse kinematics optimization for redundant manipulators using motion-level factor. Mathematics. 2025. pp. 624. https://doi.org/10.3390/math13040624.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.

УДК 621.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-126

А. Ассад[1], С.А. Сериков[2]

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ «SOFTWARE-IN-THE-LOOP» ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ОРИЕНТАЦИИ (БПЛА)



[1]Ассад Аммар
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (906) 712-7237, E-mail: ammar.assad225@gmail.com



[2]Сериков Сергей Анатольевич
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911) 901-5478, E-mail: srkv@inbox.ru.

Аннотация

В данном исследовании была разработана и реализована платформа типа Software in the Loop (SITL) в среде Matlab Simulink для проверки валидации алгоритмов оценки ориентации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В качестве средства визуализации использовалось программное обеспечение FlightGear. В качестве модели объекта управления был применён квадрокоптер. SITL используется для валидации алгоритма повышения точности оценки ориентации БПЛА с применением метода роя частиц (Particle Swarm Optimization) и фильтра Калмана. Такое сочетание компонентов приближает условия тестирования к реальным. Итоговая платформа позволяет проводить валидацию и других алгоритмов, основанных на методах искусственного интеллекта, применяемых в задачах оценки ориентации БПЛА.

Ключевые слова: Software In The Loop, беспилотные летательные аппараты, FlightGear, оценка ориентации, искусственный интеллект.

Введение

Разработка и тестирование алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в области применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной задачей, поскольку испытания в реальном времени могут быть дорогостоящими и потенциально опасными для устройства при недостаточной надёжности алгоритма. Тестирование проводится с использованием моделирования, что позволяет получить определённую степень достоверности результатов, однако временные характеристики таких испытаний не соответствуют реальному времени. В связи с этим применяется другой тип тестирования — Software in the Loop (SITL). Для реализации данного вида испытаний необходимы: математическая модель БПЛА, программный код валидации алгоритма ИИ и средство визуализации в рамках единой среды моделирования. В данном случае средой моделирования является Matlab Simulink, а в качестве средства визуализации используется программное обеспечение FlightGear [1][2].

Авторы в [3] рассмотрели различные аспекты боевой эффективности авиации, подчеркнув ключевую роль завоевания превосходства в воздухе в условиях современных вооружённых конфликтов. Исследования сосредоточены на совершенствовании научных методов анализа и повышения эффективности боевого применения авиации с использованием инструментов моделирования и имитации. Особое внимание в работах уделено моделированию одиночных и групповых воздушных боёв, расчёту кинематических траекторий, принятию решений пилотами в сложных условиях боя, а также влиянию лётно-технических характеристик самолётов на успех выполнения боевых задач. Анализ более 100 источников позволил выявить общие подходы к построению моделей воздушных сражений, оценке боевой эффективности и применению современных технологий, включая методы искусственного интеллекта, для поддержки принятия тактических решений. При этом особый интерес представляют разработки, приближённые к реальным боевым условиям, с учётом координации действий нескольких летательных аппаратов. Новизна современных исследований заключается в формировании единых принципов моделирования и научных подходов к изучению воздушных боёв, что способствует дальнейшему развитию перспективных технологий и боевых стратегий. Полученные результаты могут быть полезны как инженерам и конструкторам авиационной техники, так и военным специалистам, занимающимся разработкой методов ведения воздушных боёв будущего

Методы

Тестируемый алгоритм использует метод роя частиц (Particle Swarm Optimization) для повышения точности оценки ориентации БПЛА. Полная

реализация данного метода представлена в [4]. Реализация была выполнена на основе данных, полученных из экспериментов в реальном времени, однако тестирование проводилось только в среде моделирования. Алгоритм тестировался в связке с математической моделью БПЛА. Входными данными для тестируемого алгоритма в симуляции являются измерения с гироскопов (Γ_a), акселерометров (A_a) и магнитометров (M_a), которые были получены из реальных экспериментов, а также эталонные параметры ориентации, представленные в виде углов Эйлера: крен (Roll), тангаж (Pitch) и рыскание (Yaw), обозначаемые как ($К, Т, Р$).

Входными параметрами математической модели являются углы Эйлера, полученные из реальных экспериментов ($К_c, Т_c, Р_c$) (или же эти параметры могут быть сгенерированы [6]) и используемые в качестве задаваемых значений. Управление математической моделью осуществляется с помощью ПИД-регулятора, который контролирует только высоту полёта БПЛА. Регулятор формирует четыре управляющих сигнала для квадрокоптера, которые поступают на вход математической модели. Выходными параметрами модели являются углы ориентации ($К_a, Т_a, Р_a$) и координаты (X, Y, Z; где Z — это высота).

Из углов ориентации ($К_a, Т_a, Р_a$) вычисляются значения гироскопов, обозначаемые как (Γ_c). Из координат (X, Y, Z) рассчитываются значения акселерометров, обозначаемые как (A_c). Измерения магнитометров формируются на основе параметров мирового магнитного поля в текущей позиции БПЛА с добавлением шума и обозначаются как (M_c). Таким образом, входными данными тестируемого алгоритма в SITL являются (Γ_c, A_c, M_c). Выходными данными алгоритма являются параметры ориентации ($К_o, Т_o, Р_o$), которые затем сравниваются с ($К_a, Т_a, Р_a$) и ($К_c, Т_c, Р_c$). Полная блок-схема этой платформы показана на следующем рисунке

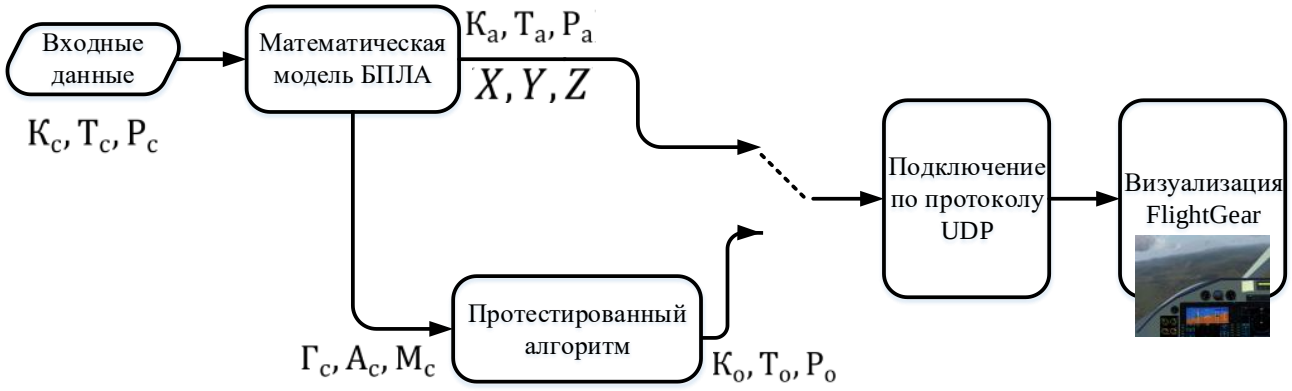


Рис. 1: Полная блок-схема платформы

Результаты

Полная платформа с программным обеспечением Flightgear представлена ниже: Блок FlightGear выделен зелёным цветом, входные данные пурпурным цветом, тестируемый алгоритм — оранжевым цветом, а математическая модель БПЛА — голубым цветом.

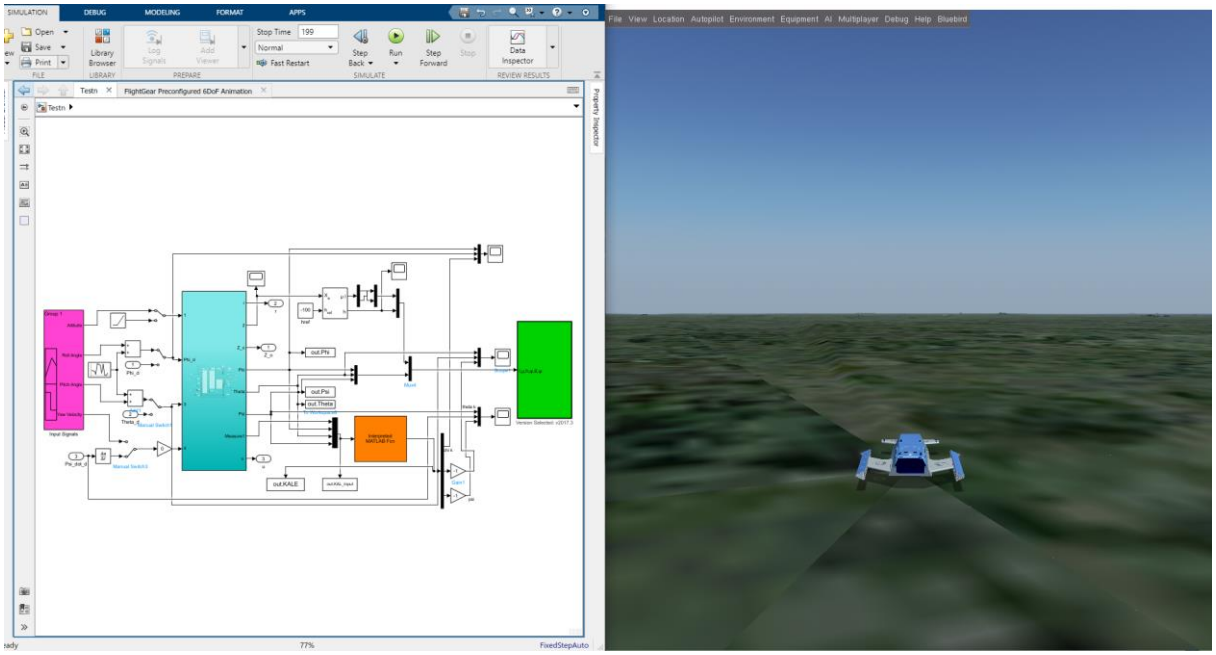


Рис. 2: Полная платформа

Разработанная математическая модель и ПИД-регулятор были подробно описаны в [5]. Валидация модели осуществлялась путём задания требуемой высоты полёта, а также желаемых углов крена и тангажа, при этом заданный угол рыскания равнялся нолю. Также были протестированы различные сценарии работы системы. Помимо этого, на данной платформе проводилось тестирование данных, полученных из реальных экспериментов. На следующих рисунках представлены все результаты. Также приведены данные гироскопов и акселерометров.

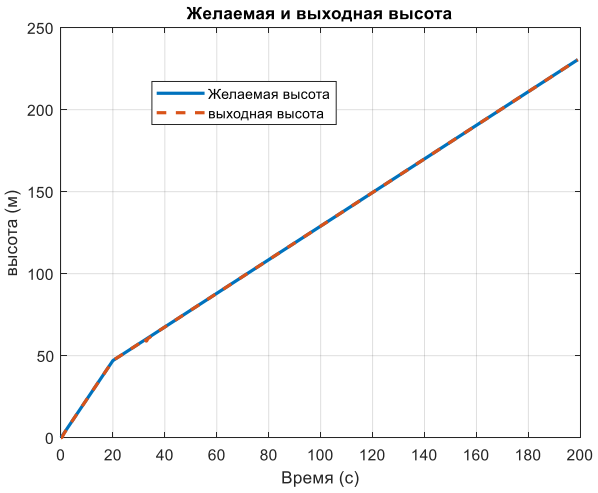


Рис. 3: Желаемая и выходная высота

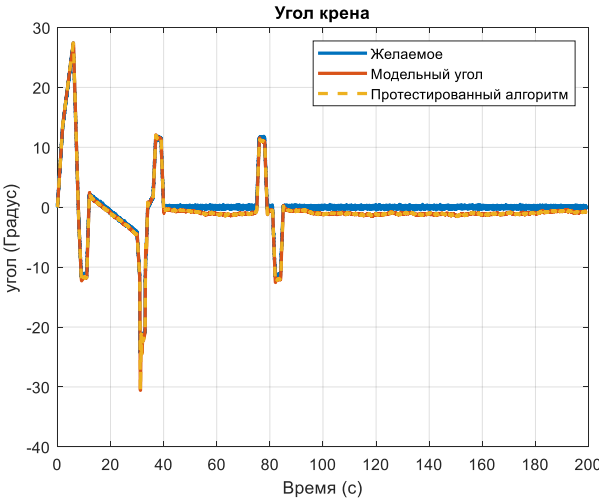


Рис. 4: Угол крена

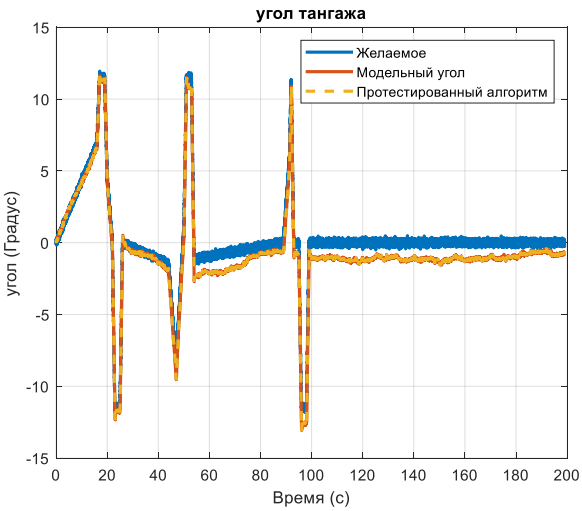


Рис. 5: Угол тангажа

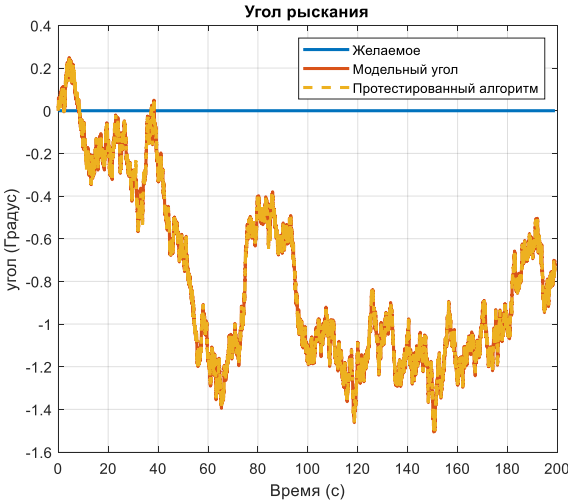


Рис. 6: Угол рыскания

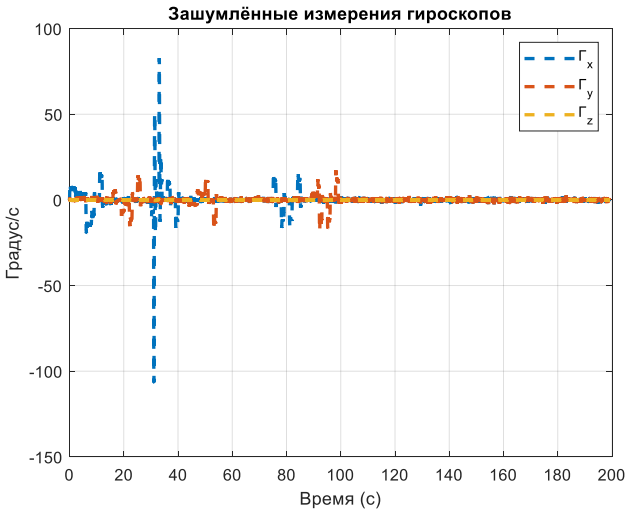


Рис. 7: Зашумлённые измерения гироскопов

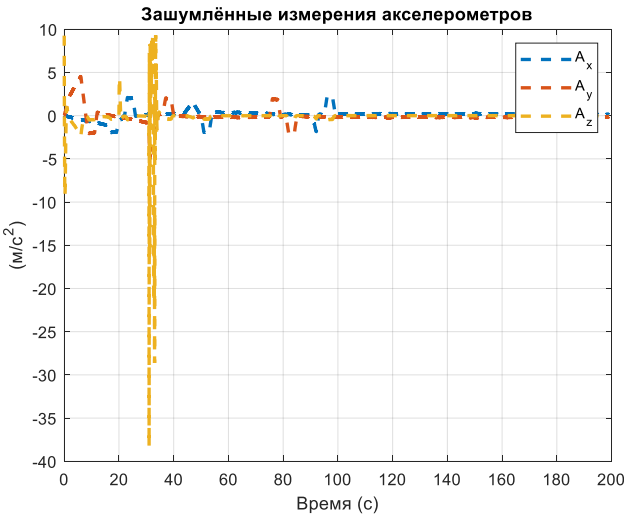


Рис. 8: Зашумлённые измерения акселерометров

Трехмерная траектория, показанная ниже

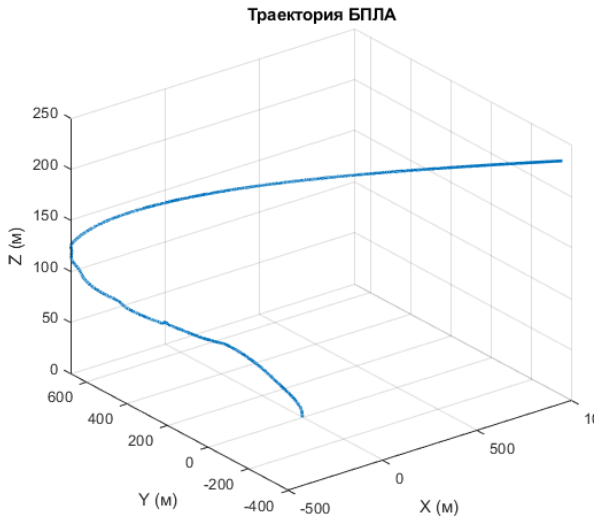


Рис. 9: Траектория БПЛА

Обсуждение

Разработанная платформа Software in the Loop (SITL) продемонстрировала высокую эффективность для тестирования алгоритмов оценки ориентации с применением различных методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности метода оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization) в рамках данного исследования. Основным преимуществом разработанной платформы является возможность приближения условий моделирования к реальным за счёт использования данных с датчиков, содержащих шум, а также интеграции модели в реальном времени в замкнутый контур. Это позволяет выявить устойчивость и точность алгоритмов, которые показывают высокие результаты в традиционных условиях численного моделирования, но требуют дополнительной валидации в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

Полученные результаты подтвердили надёжность сравнения эталонных или задаваемых параметров ориентации с выходными данными тестируемого алгоритма, что обеспечивает объективную оценку его точности и устойчивости. Таким образом, разработанная SITL-платформа может быть использована в качестве универсального инструмента для тестирования и сравнительного анализа различных алгоритмов оценки ориентации на основе методов искусственного интеллекта, включая нейронные сети, методы оптимизации и гибридные подходы. Платформа обеспечивает условия, максимально приближённые к реальным лётным испытаниям, при этом снижая риск повреждения оборудования и сокращая затраты на проведение экспериментов с реальными БПЛА.

Длительность тестируемого сценария составила 200 секунд. Алгоритм оценивания ориентации был протестирован отдельно, без использования данной платформы, и время выполнения теста составило около 2 минут, тогда как при использовании разработанной платформы продолжительность тестирования составила ровно 200 секунд.

Заключение

В заключение следует отметить, что разработанная платформа может быть использована для тестирования различных подходов на основе искусственного интеллекта, применяемых для оценки параметров ориентации. Кроме того, она может быть адаптирована для решения широкого спектра задач, связанных с применением БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Богославский Н. В. и др. Использование MATLAB для валидации и верификации встраиваемого программного обеспечения //ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. – 2019. – С. 50-64.

[2] Каримова Д., Хашимова Ч. С., Джураева Ш. Т. Имитационное моделирование объектов технических систем //Science and innovation. – 2023. – Т. 2. – №. Special Issue 3. – С. 685-690.

[3] Макаренко С. И., Афонин И. Е. Моделирование боевых действий авиации и оценки их эффективности–анализ работ, моделей, актуальных направлений исследований //Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – №. 3. – С. 78-125.

[4] Assad A., Serikov S. Improvement the Accuracy of Attitude Estimation of UAV using the Extended Kalman Filter based on Particle Swarm Optimization //International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 15-24.

[5] Ferry N. Quadcopter plant model and control system development with matlab/simulink implementation //Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, New York. – 2017.

[6] Ассад А., Сериков С. А. Моделирование датчиков беспилотного летательного аппарата для формирования набора данных имитационных экспериментов для оценки алгоритмов определения ориентации. – 2024.

A. Assad, S.A. Serikov

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE-IN-THE-LOOP PLATFORM FOR TESTING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO IMPROVE UAV ORIENTATION ESTIMATION

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

Abstract

In this research, a Software in the loop (SITL) platform was developed and implemented in Matlab Simulink environment to test the validation of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Orientation estimation. Flightgrear software was used as visualization tool. Quadcopter Plant Model was used as UAV. SITL is used for the validation of algorithm of increasing the accuracy of UAV orientation estimation using Particle swarm optimization method and Kalman filter. This connection of components makes the test closer to the real one. The final platform is able to validate other algorithms of using artificial intelligence algorithms in the field of UAV orientation estimation.

Key words: Software in The Loop, Unmanned Aerial Vehicles, FlightGear, Orientation Estimation, Artificial Intelligence.

REFERENCES

[1] Bogoslovsky N. V. and others. Using MATLAB for the validation and verification of embedded software //TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT AND DEBUGGING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS. – 2019. – pp. 50-64 (rus).

[2] Karimova D., Hashimova Ch.S., Dzhuraeva Sh.T. Simulation modeling of objects of technical systems //Science and innovation. – 2023. – Vol. 2. – no. Special Issue 3. – pp. 685-690 (rus).

[3] Makarenko S. I., Afonin I. E. Modeling of aviation combat operations and evaluating their effectiveness–analysis of works, models, and current research directions //Management, communication and security systems. – 2024. – No. 3. – pp. 78-125 (rus).

[4] Assad A., Serikov S. Improvement the Accuracy of Attitude Estimation of UAV using the Extended Kalman Filter based on Particle Swarm Optimization //International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – T. 13. – №. 3. – C. 15-24.

[5] Ferry N. Quadcopter plant model and control system development with matlab/simulink implementation //Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, New York. – 2017.

[6] Assad A., Serikov S. A. Modeling sensors of an unmanned aerial vehicle to generate a data set of simulation experiments to evaluate algorithms for determining orientation. – 2024 (rus).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 629.1.02
doi:10.18720/SPBPU/2/id-127

Д.В. Бордюгов[1], Е.С. Брискин[2], Н.Г. Шаронов[3]

О ФОРМИРОВАНИИ БАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ «КАПСУЛЬНОПОДОБНОГО» МОБИЛЬНОГО РОБОТА



[1]Бордюгов Денис Владимирович,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (999)625-0818, E-mail: denklopuk@gmail.com.



[2]Брискин Евгений Самуилович,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (844)224-8113, E-mail: dpm@vstu.ru.



[3]Шаронов Николай Геннадьевич,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (844)224-8113, E-mail: dpm@vstu.ru.

Аннотация

Рассмотрены вопросы управления движением «капсульноподобного» мобильного робота, оснащённого опорными стойками и внутренним телом, совершающим вращательное движение с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси. Разработана расчётная схема мобильного робота и математическая модель, описывающая динамику его движения. Получены алгоритмы управления опорными стойками, реализующие базовые траектории движения геометрического центра корпуса мобильного робота (боковое движение, разворот корпуса на 180°). Результаты показали, что за счёт согласованного управления опорными стойками робот способен перемещаться в любом направлении, а также имеет маневренность близкую к «идеальной». Особенность движения, в отличие от известных капсульных роботов, состоит в отсутствии проскальзывания.

Ключевые слова: мобильный робот, капсульные роботы, дискретное взаимодействие, голономные связи.

Введение

Разработка мобильных роботов различных классов и в различных конструктивных исполнениях представляет собой актуальную задачу в области робототехники. Такие устройства находят широкое применение: они используются для выполнения инспекционных операций в подводной среде, передвижения по специализированным поверхностям, а также для преодоления пересечённой и труднопроходимой местности.

Характер движения мобильных роботов определяется типом приводов и движителей, влияющих на их маневренность, устойчивость, скорость и проходимость. По типу движителей такие системы делятся на колесные, гусеничные, шагающие, плавающие, летающие и использующие нетрадиционные движители.

Особый интерес представляют шагающие и шагающеподобные роботы, как наиболее близкие по свойствам к «капсульноподобным». Они дискретно взаимодействуют с опорной поверхностью, что позволяет рассматривать их как системы с изменяемой структурой голономных связей [1-8].

Отдельного внимания заслуживает особый класс мобильных устройств — капсульные роботы. Эти системы относятся к вибрационно-локомоционным механизмам, функционирующим за счёт перемещения тел, находящихся внутри корпуса, чаще всего герметичного и не имеющего выступающих элементов [9-13]. В научных исследованиях [9, 10] движение капсульных роботов объясняется асимметричным перемещением внутреннего тела, вызывающим инерционные силы, воздействующие на корпус. Управление может осуществляться по скорости и ускорению внутреннего тела: в первом случае через изменение скорости движения внутреннего тела при фиксированных границах его перемещения; во втором – через варьирование длины перемещения и величины ускорения внутреннего тела. При этом перемещение корпуса робота происходит с проскальзыванием и возможно в том случае, когда инерционные силы превосходят по значению силы сопротивления среды (например, силы анизотропного трения). Способы управления движением внутренних тел для целенаправленного движения корпуса мобильного робота сложны в реализации. В этой связи перспективным с точки зрения законов и методов организации движения могут быть «капсульноподобные» роботы, в конструкции которых используются опорные элементы, дискретно взаимодействующие с поверхностью, а перемещение корпуса обеспечивается за счёт инерционных сил,

возникающих от стационарного движения внутренних масс. Такой подход позволяет обеспечивать маневренность близкую к «идеальной» [14] и исключить проскальзывание, поскольку в момент контакта опоры фиксируются жёстко.

Рассматривается математическая модель «капсульноподобного» мобильного робота с опорными стойками, управляемыми согласованно, и внутренним телом, совершающим стационарное вращательное движение вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. Решается задача определения алгоритмов движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками, обеспечивающего заданное перемещение из начальной точки в конечную.

Методы

Рассматривается мобильный робот, перемещающийся по плоской ровной поверхности за счет движения по окружности внутреннего тела вокруг неподвижной перпендикулярной опорной поверхности оси с постоянной угловой скоростью, и стоек, расположенных на корпусе робота, которые формируют голономную нестационарную структуру связей путем согласованного взаимодействия каждой из стоек с плоской опорной поверхностью.

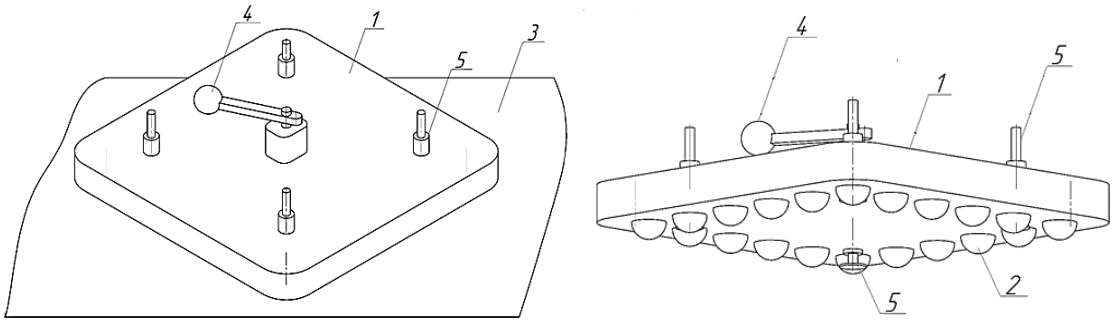


Рис. 1. Схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными элементами, дискретно взаимодействующими с поверхностью

На рис. 1 представлена конструктивная схема мобильного робота, включающего корпус 1, опирающийся на опорную поверхность 3 с помощью установленного по периметру набора из N шариковых опор 2. Внутреннее тело 4 размещено внутри корпуса на вертикальной оси, проходящей через его геометрический центр, и осуществляет вращательное движение относительно вертикальной оси. Кроме того, в заранее определённых точках на корпусе робота установлены выдвижные опоры 5 (опорные элементы следует располагать как можно ближе к центру масс корпуса робота, для обеспечения их устойчивости и жесткой фиксации), поочерёдно вступающие в контакт с поверхностью 3.

Для минимизации ударных нагрузок смена активных опор осуществляется в фазе, соответствующей нулевому значению угловой скорости корпуса мобильного робота. Управляемый переход опорной стойки из свободного состояния в режим силового взаимодействия с опорной поверхностью и наоборот обеспечивает реализацию различных по виду и характеру движений мобильного робота.

Рассматривается перемещение робота в одной из фаз движения. Расчетная схема движения мобильного робота представлена на рис. 2.

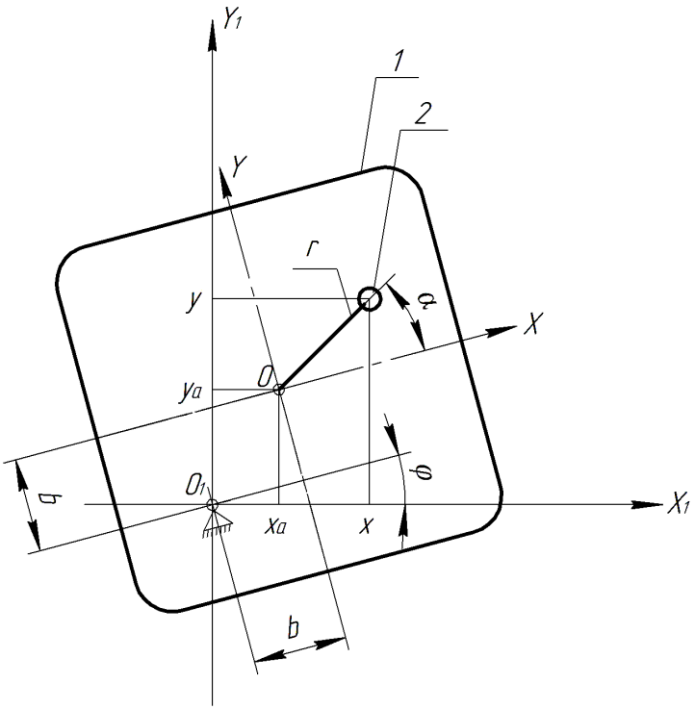


Рис 2. Расчетная схема мобильного робота с вращающимся внутренним телом при движении по горизонтальной плоскости: 1 – корпус мобильного робота; 2 – внутреннее тело

где: b – расстояние от центра корпуса мобильного робота до опоры O_1, находящейся во взаимодействии с поверхностью; x_a, y_a – координаты центра корпуса мобильного робота 1 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; x, y – координаты внутреннего тела 2 в проекции на оси O_1X_1 и O_1Y_1 соответственно; φ – угол поворота корпуса робота относительно горизонтальной оси X_1; α – угол поворота тела внутри корпуса относительно горизонтальной оси X; r – длинна стержня, на котором закреплен груз; φ – угол поворота корпуса.

Уравнение динамики движения мобильного робота с вращающимся внутренним телом и опорными стойками удобно получить с помощью уравнения Лагранжа:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

где: $\dot{\varphi}, \dot{\alpha}$ – угловая скорость корпуса робота и угловая скорость внутреннего тела соответственно; $T = T_1 + T_2$ – кинетическая энергия системы; $T_1 = \frac{1}{2} J_{1z} \dot{\varphi}^2$ – кинетическая энергия корпуса мобильного робота, J_{1z} – осевой момент инерции корпуса робота, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс; $T_2 = \frac{1}{2} m_2 v^2$ – кинетическая энергия вращающегося внутреннего тела, m_2 – масса внутреннего тела, v_2 – скорость внутреннего тела; Q_{φ}, Q_{α} – обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам φ и α.

Активные силы, совершающие работу при движении системы по горизонтальной поверхности, отсутствуют, соответственно $Q_{\varphi} = 0$, $Q_{\alpha} = 0$.

Учитывая, что рассматривается установившийся режим движения внутреннего тела: $\dot{\alpha} = \text{const}$; $\ddot{\alpha} = 0$; и из-за малых ускорений корпуса робота пренебрегаем действием сил инерции, решение системы (1) имеет вид:

$$\ddot{\varphi}\left(J_{1z} + m_2\left(2b^2 + r^2 + 2br \cdot \left(\cos(\alpha) + \sin(\alpha)\right)\right)\right) = m_2\left(\dot{\alpha}^2 br \cdot \left(\cos(\alpha) - \sin(\alpha)\right)\right) \quad (2)$$

Результаты

В [15] представлены траектории движения геометрического центра мобильного робота в зависимости от различных алгоритмов смены опорных стоек. Из полученных результатов определяется, что представленный «капсульноподобный» мобильный робот с одним вращающимся внутренним телом и опорными стойками способен перемещаться в любом направление. Важнейшим этапом исследования является получение базовых траекторий перемещения геометрического центра корпуса мобильного робота (боковое движение, движение по дуге окружности, разворот корпуса робота на 180 градусов и т.д.) для подтверждения близкой к «идеальной» маневренности мобильного робота.

Исследование модельной задачи движения мобильного робота с одной вращающейся с постоянной угловой скоростью внутренней массой (рисунок 2.4, а) как механической системы с параметрами $\alpha_0 = 1{,}0472$ рад; $\omega = 0{,}5$ рад/с; $b = 0{,}05$ м; $r = 0{,}2$ м; $J_a = 0{,}1365$ кг·м^3; $m = 1$ кг.

Рассматриваются две базовые траектории движения геометрического центра корпуса мобильного робота: боковое движение, разворот корпуса робота на 180 градусов.

Алгоритмы управления опорными стойками:

– Для бокового движения геометрического центра мобильного робота: I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора → Все опоры → I опора → Все опоры → III опора;

– Для разворота корпуса робота на 180 градусов I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → Все опоры → I опора → II опора → Все опоры → II опора;

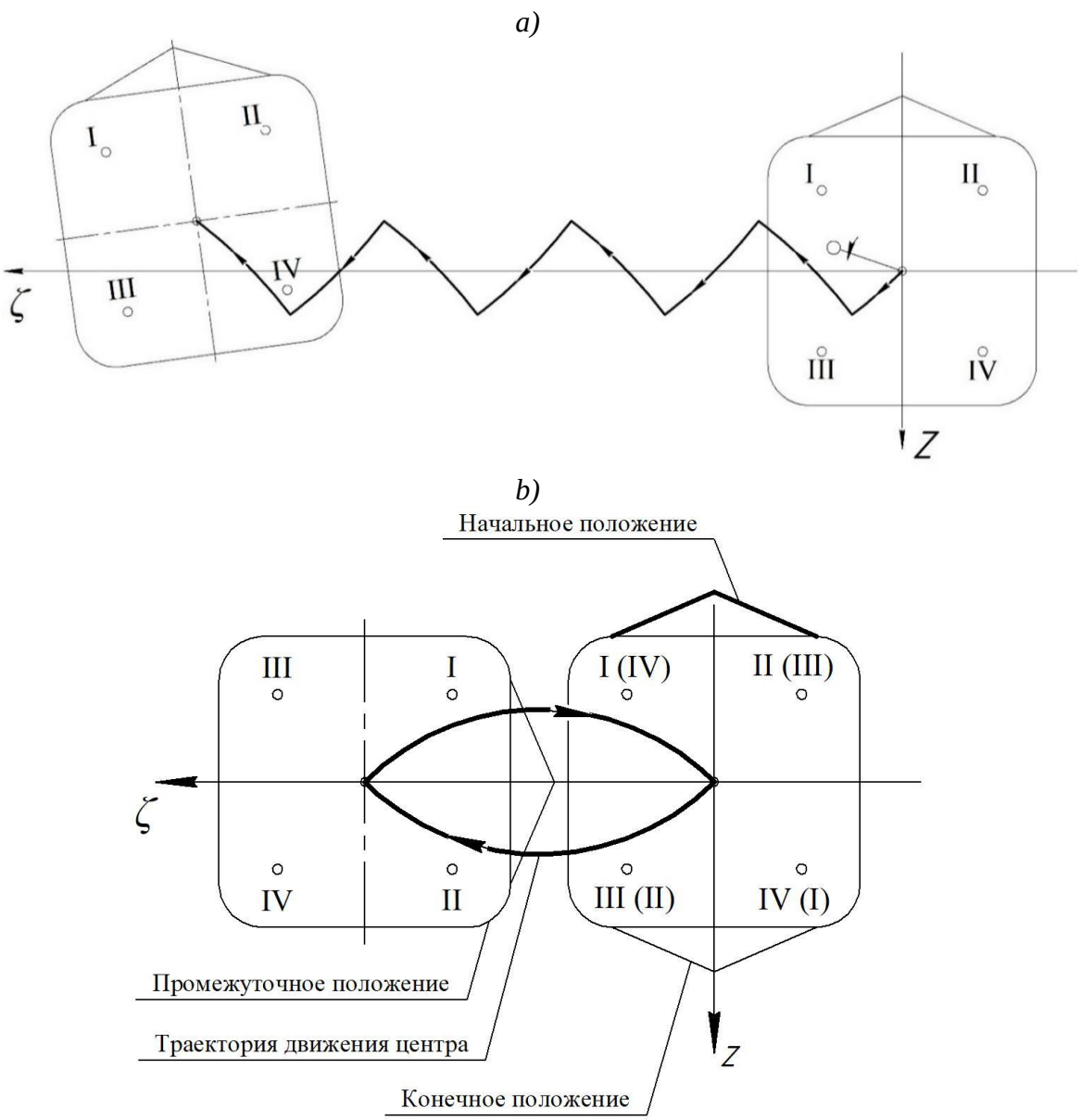


Рис. 4. Изменение положения геометрического центра корпуса мобильного: *a)* боковое движение; *b)* разворот на 180 градусов (в скобках указаны номера опор в конечном положении робота)

Заключение

Разработана расчетная схема «капсульноподоного» мобильного робота с опорными стойками и внутренним телом, совершающим вращательное движение, на основе которой сформулирована математическая модель, описывающая динамику движения робота.

Получены алгоритмы управления опорными элементами для нескольких базовых траекторий движения геометрического центра корпуса мобильного робота, без учета без учета рысканья корпуса в процессе перемещения, для подтверждения близкой к «идеальной» маневренности робота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, https://rscf.ru/project/24-21-00477/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
[2] Охоцимский Д.Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука. Физматлит, 1984. 312 с.
[3] Лапшин В.В. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов.. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 6. С. 319–335.
[4] Брискин Е.С. О формировании и точности реализации программных режимов движения мобильных роботов с шагающими движителями. Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, № 4. С. 195-200.
[5] Gradetsky, V.G., Knyazkov, M.M., Semenov, E.A., Sukhanov, A.N. Design and Control for Vacuum Contact Devices of Mobile Wall Climbing Robot Application in Complex Environment. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 261. pp. 143-155.
[6] Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В. Об управлении адаптацией ортогональных шагающих движителей к опорной поверхности. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 184-190.
[7] Parker, R. Robotics in forestry. New Zealand Journal of Forestry. 2016. № 60(4). pp. 8–14.
[8] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect. Interactive Collaborative Robotics. 9th

International Conference on Interactive Collaborative Robotics, ICR 2024. 2024. pp. 293-305.
[9] Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией. М.: Физматлит, 2022. С. 464.
[10] Черноусько Ф.Л. Динамика и оптимизация движений мобильных роботов. Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М.: Наука, 2015. С. 34-49.
[11] Болотник Н.Н., Нунупаров А.М., Чащухин В.Г. Капсульный вибрационный робот с электромагнитным приводом и возвратной пружиной: динамика и управление движением. Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. №6. С. 146-160.
[12] Liu Y., Islam S., Pavlouskaya E., Wiercigroch M. Optimization of the vibro-impact capsule system. J. Mech. Eng. 2016. V. 62. pp. 430-439.
[13] Song, L, Dai, Yu, Luyao, W, Zhang, W, Ji, Yi, Cao, Yu, Wei, J, Wang, F, Zhong, J, Yang, J, Feng, L. Motion Control of Capsule Robot Based on Adaptive Magnetic Levitation Using Electromagnetic Coil. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2022. pp. 1-12.
[14] Брискин Е. С. Специальные проблемы мобильной робототехники. Волгоградский государственный технический университет. Волгоград. 2020. 60 с.
[15] Бордюгов Д. В. Управление тормозными приводами опорных стоек робота с вращающимся внутренним твердым телом. XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. Москва. 2024. С. 1557-1561.

D.V. Bordyugov, E.S. Briskin, N.G. Sharonov

ABOUT FORMATION OF BASIC MOTION TRAJECTORIES OF A "CAPSULE-LIKE" MOBILE ROBOT

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

We considered the issues of motion control of a "capsule-like" mobile robot equipped with support struts and an internal body making rotational motion with constant angular velocity around a fixed axis perpendicular to the support surface. A computational scheme of the mobile robot and a mathematical model describing the dynamics of its motion are developed. Algorithms for controlling the support struts that realize the basic trajectories of motion of the geometric center of the mobile robot body (lateral motion, 180° turn of the body) have been obtained. The results show that due to the coordinated control of the support legs, the robot is able to move in any direction and has maneuverability close to "ideal". The peculiarity of the motion, unlike known capsule robots, is the absence of slippage.

Key words: mobile robot, capsule robots, discrete interaction, holonomic communications.

REFERENCES

[1] Artobolevsky, I.I. Theory of mechanisms and machines: Textbook for universities. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1988, P. 640.
[2] Okhotsimskiy, D.E. Mechanics and motion control of an automatic walking machine. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1984, P. 312.
[3] Lapshin, V.V. Theory of mechanisms and machines: Textbook for universities. Science and education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University. 2014, № 6, pp. 319-335.
[4] Briskin, E.S. On the formation and accuracy of the implementation of the program modes of movement of mobile robots with walking propulsion devices. Mechatronics, automation, control. 2024, 25, № 4. pp. 195-200.
[5] Gradetsky, V.G., Knyazkov, M.M., Semenov, E.A., Sukhanov, A.N. Design and Control for Vacuum Contact Devices of Mobile Wall Climbing Robot Application in Complex Environment. Studies in Systems, Decision and Control. 2020, Vol. 261, pp. 143-155.
[6] Briskin, E.S., Kalinin, Y.V., Maloletov, A.V. On controlling the adaptation of orthogonal walking movers to the supporting surface. Journal of

Computer and Systems Sciences International. 2017, Vol. 56, No. 3, pp. 519-526.
[7] Parker, R. Robotics in forestry. New Zealand Journal of Forestry. 2016, № 60(4), pp. 8–14.
[8] Bordyugov, D.V., Briskin, E.S., Sharonov, N.G. Mathematical Model and Design of the Mobile Robot with Propellers Which Working on the Periodic Jamming Effect. Interactive Collaborative Robotics. 9th International Conference on Interactive Collaborative Robotics, ICR 2024. 2024, pp. 293-305.
[9] Chernousko, F.L., Bolotnik, N.N. Dynamics of mobile systems with controlled configuration. Moscow: Fizmatlit. 2022, P. 464.
[10] Chernousko, F.L. Dynamics and motion optimization of mobile robots. Actual problems of mechanics. Moscow: Nauka, 2015, pp. 34-49.
[11] Bolotnik, N.N. Capsule-type vibration-driven robot with an electromagnetic actuator and an opposing spring: Dynamics and control of motion. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2016, Vol. 55, No. 6, pp. 986-1000.
[12] Liu Y., Islam S., Pavlouskaya E., Wiercigroch M. Optimization of the vibro-impact capsule system. J. Mech. Eng. 2016, V. 62, pp. 430-439.
[13] Song, L, Dai, Yu, Luyao, W, Zhang, W, Ji, Yi, Cao, Yu, Wei, J, Wang, F, Zhong, J, Yang, J, Feng, L. Motion Control of Capsule Robot Based on Adaptive Magnetic Levitation Using Electromagnetic Coil. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2022, pp. 1-12.
[14] Briskin, E.S. Special problems of mobile robotics. Volgograd State Technical University. Volgograd. 2020, P. 60.
[15] Bordyugov, D.V. Control of braking actuators of robot support legs with rotating internal solid body. XIV All-Russian meeting on control problems. Moscow, 2024, pp. 1557-1561.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 681.518
doi:10.18720/SPBPU/2/id-128

А.А. Евсиков[1], В.А. Коковин[2], А.П. Леонов[3], А.Н. Сытин[4]

ОБ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ И УНИВЕРСАЛЬНОСТИ СЕРВОПРИВОДОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ



[1]Александр Александрович Евсиков, к.т.н., доцент,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПиП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9 Тел.: (4967)31-01-95, E-mail: eaa@uni-protvino.ru.



[2]Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПиП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9.
Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.



[3]Анатолий Петрович Леонов, к.т.н., доцент Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра АТПиП, Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9.
Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: anatoli.leonov@googlemail.com



[4]Александр Николаевич Сытин, д.ф.-м.н.,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПиП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9, Тел.: (4967)31-0190, E-mail:
alexander.sytin@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы интеллектуализации и универсализации сервоприводов, которые являются ключевым элементом автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. Проанализированы технические решения, направленные на повышение качества управления движением, на оптимизацию взаимодействия сервопривода с другим оборудованием распределенной

автоматизированной системы. Рассмотрены проблемы кибербезопасности оборудования, методы сетевой защиты оборудования на неконтролируемых участках промышленной сети, физически доступных для злоумышленников.

Ключевые слова: сервопривод, векторное управление, система подчиненного управления, цифровой ПИД-регулятор, настройка на технический оптимум, кибербезопасность.

Введение

В настоящее время происходит обновление основных фондов в таком ключевом и перспективном направлении экономики как автоматизация технологических процессов и производств. Стремительное развитие цифровых технологий способствует внедрению автоматизированных процессов во все области производства [1].

Ключевым элементом автоматизированной системы управления технологическим процессом или производством, определяющим её функциональные возможности, исключающим влияние человеческого фактора на производительность и точность обработки изделий или на качество выполнения технологического процесса, является сервопривод переменного тока с векторным (частотным) управлением [2,3].

Интеллектуальность повышает качество управления движением, придает приводу большую гибкость, и за счет оптимизации взаимодействия сервопривода с другими элементами автоматизированной системы управления расширяет её функциональные возможности.

Универсализация является одним из ключевых моментов, который дает инженерам возможность применять сервопривод в широком спектре оборудования, включая научные исследования, промышленность, транспорт и другие сферы деятельности.

Интеллектуализация современных сервоприводов предполагает обеспечение киберзащиты при взаимодействии распределенных технологических подсистем и в системах контроля физического доступа.

Анализ работ по теме исследования

Сервопривод является неотъемлемой частью мехатронных устройств. Мехатронные компоненты (*mechatronic components- MCs*) можно определить как устройства, в которых сочетаются узлы точной механики с электронными вычислительными и управляющими компонентами, интерфейсными и силовыми модулями.

В работе [4] дано понятие *Intelligent Mechatronic Component* (*IMC*) и сформулированы условия использования таких компонентов в распределенных технологических системах, разработанных на основе

программного обеспечения стандарта *IEC* 61499 [5] с поддержкой данных и логики управления для реализации функций автоматизации.

Интеллектуализация сервоприводов предполагает использование интеллектуальных методов управления. В работе [6] предлагается интеллектуальный метод управления серводвигателем на основе обучения с подкреплением, который может обучить агента производить рабочий цикл в соответствии с ошибкой сервопривода между текущим состоянием и целевой скоростью или крутящим моментом. В работе [7] предлагается метод минимизации ошибки с помощью интеллектуальной схемы на основе ПИД-регулирования с использованием оптимизированных коэффициентов усиления. Описанный метод использует автоматический поиск правильных значений коэффициента усиления, в отличие от обычного ПИД-регулирования с фиксированным коэффициентом усиления.

В работах [16, 17] рассматриваются вопросы синхронизации работы сервоприводов в распределенных автоматизированных системах.

Универсальность сервоприводов обеспечивается включением таких дополнительных функциональных модулей как комбинированные вычислители на платформе микроконтроллеров и ПЛИС, и набор промышленных интерфейсов (как для локальных сетей, так и для *LAN*) [8].

Анализ современных отечественных сервоприводов

Проанализируем решения задач интеллектуализации и универсализации сервоприводов на примерах отечественных промышленных интегрированных сервоприводов типов СПС [9] на базе синхронного трехфазного двигателя и СПШ [10] на базе гибридного шагового электродвигателя.

Повышение качества управления движением указанных приводов осуществляется за счет использования *систем подчиненного управления* сервоприводами (рис. 1) с реализацией цифрового ПИД- или ПИ-алгоритма в каждом из 3-х контуров управления (момента, скорости, положения) [2, 11, 12].

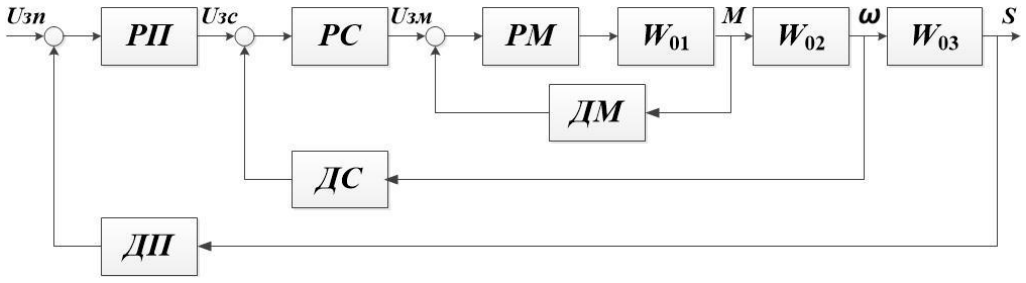


Рис. 1. Структура системы подчиненного управления

РП, РС, РМ – регуляторы позиции (координаты), скорости, момента соответственно; ДП, ДС, ДМ – датчики позиции, скорости, момента соответственно; $U_{ЗП}$, $U_{ЗС}$, $U_{ЗМ}$ – задающие сигналы для контуров позиции, скорости, момента соответственно; W_{01} – объединенная передаточная функция преобразователя частоты (ПЧ) и статорной обмотки двигателя; M – вращающий момент двигателя; W_{02} – передаточная функция двигателя по угловой скорости ω; W_{03} – передаточная функция кинематической передачи между валом двигателя и объектом управления; S – величина линейного перемещения).

Цифровой ПИД–регулятор [2] описывается следующим математическим выражением

$$Y_{i+1} = (K_p \cdot \varepsilon_i + K_Д \cdot \Delta\varepsilon_i/\Delta t_{изм} + K_И \cdot \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}) \cdot 100\% \quad (1)$$

где Y_{i+1} – цифровой код на выходе ПИД-регулятора в течение $(i+1)$-го интервала дискретизации; K_p – коэффициент при пропорциональной составляющей; ε_i – ошибка (рассогласование), разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины в момент времени t_i, дискрет; $K_Д$ – коэффициент при дифференциальной составляющей, с; $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$ – разность ошибок двух соседних измерений, дискрет; $\Delta t_{изм} = t_i - t_{i-1}$ – интервал дискретизации, время между соседними измерениями, с; $K_И$ – коэффициент при интегральной составляющей, с$^{-1}$; $\sum_{i=0}^{n} \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}$ – накопленная к i-му шагу сумма ошибок (интегральная сумма рассогласований), дискрет.

Методика настройки сервоприводов СПС и СПШ на разные режимы работы представлена авторами в литературе [2], где определение интервала дискретизации $\Delta t_{изм}$ и значений коэффициентов $K_P, K_Д$, $K_И$ осуществляется с использованием тестового режима и графического интерфейса, реализованных в системе управления приводом на базе пакета *Мотомастер*© [13].

При настройке возможна реализация двух режимов: технически оптимального по быстродействию переходного процесса или плавного разгона/торможения с заданным ускорением.

Технически оптимальным считается такой переходный процесс, при котором при подаче на вход настраиваемого контура ступенчатого входного воздействия $x(t) = 1(t)$ время t_1 изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании $\sigma = [\frac{h_{max} - h(\infty)}{h(\infty)}] \cdot 100\%$ не превышающим 4-10% (рис. 2).

Такой переходный процесс является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Параметрами, характеризующими качество управления, являются (рис. 2):

– *время переходного процесса* $T_{рег}$, с.; характеризует быстродействие системы и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее установившегося значения становится не более ±5%;

– *максимальное перерегулирование* σ определяет наибольший «выбег» выходной величины от установившегося значения в переходном процессе, вычисляется относительно установившегося значения в %

$$\sigma = [\frac{h_{max} - h(\infty)}{h(\infty)}] \cdot 100\%;$$

– *статическая ошибка* $\varepsilon_{уст}(t)$; определяет точность регулирования выходной величины

$$\varepsilon_{уст}(t) = h(t) - h(\infty) \ при \ t \geq T_{рег}$$

– время t_1 нарастания регулируемой величины до установившегося значения $h(\infty)$,

для ПИД – регулятора скорости определяет величину ускорения при разгоне;

– число перерегулирований N в интервале $0 \leq t \leq T_{рег}$, определяется как число выбросов, при которых кривая $h(t)$ располагается ниже значения $h(\infty)$, при настройке ПИД-регулятора на технический оптимум величина $N = 1$.

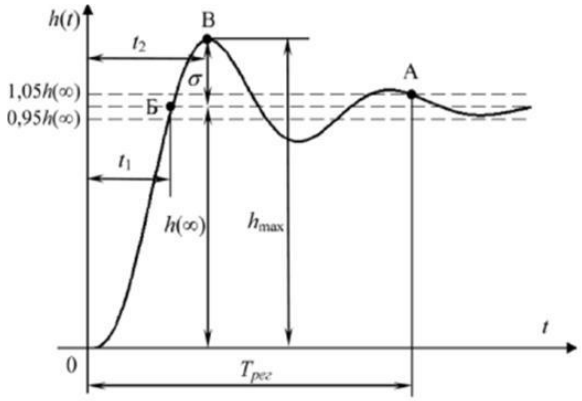


Рис. 2. К настройке переходного процесса на технический оптимум

Если разгон с максимальным ускорением недопустим, то при настройке используем «Режим плавного разгона/торможения» с ограничением ускорения и анализом указанных выше показателей качества регулирования.

Практическую реализацию достаточно сложных алгоритмов управления движением без использования контроллера верхнего уровня позволяют реализовывать входящие в состав сервоприводов сервоусилители (преобразователи частоты ПЧ) [14, 15].

Бóльшую гибкость приводу и расширение его функциональных возможностей за счет оптимизации взаимодействия сервопривода с другими элементами автоматизируемого технологического комплекса обеспечивают: встроенный в систему управления приводом программируемый логический контроллер (ПЛК); *CAN*-интерфейс; цифровые порты ввода/вывода с оптической развязкой, обладающие возможностью сетевого взаимодействия, управления по сети удаленными приводами; технологический интерфейс *USB*, с помощью которого можно выполнять настройку параметров привода, анализировать его работу и управлять в ручном режиме; интерфейс *Step/Dir* для задания позиции вала двигателя; аналоговый интерфейс ±10В для задания скорости двигателя.

ПЛК предназначен для выполнения прикладных программ, разработанных пользователем для управления движением в конкретном автоматизируемом технологическом процессе без использования контроллера верхнего уровня. Разработка программ для встроенного ПЛК осуществляется на языке *SML (Servo Motor Language)*, специально разработанном компанией ЗАО «Сервотехника» для рассматриваемых сервоприводов [13]. Разработка и отладка прикладных программ выполняется в текстовом редакторе программы *Мотомастер©,* установленной в системе управления сервоприводом.

CAN-интерфейс предоставляет полный доступ ко всем ресурсам привода и позволяет управлять любым из параметров. Предназначен для реализации протокола управления удаленными сервоприводами по шине *CAN* в режиме реального времени [16], обеспечения скорости передачи данных от 20 кб/с до 1 Мб/с, синхронизации работы большой группы СПС (до 128 приводов). Встроенный интерпретатор *G*-кодов позволяет нескольким приводам выполнять контурное движение по сложной траектории без системы управления верхнего уровня. При этом программа хранится в энергонезависимой памяти системы управления приводом и может запускаться при включении автоматически. Пульт ручного управления со штурвалом может подключаться и управлять непосредственно системой приводов по шине *CAN*.

Последняя генерация сервопривода СПС-25 может оснащаться современным интерфейсом *EtherCAT*, который обязателен при создании высокотехнологичного оборудования. Использование технологии *EtherCAT* даёт возможность добиться производительности недостижимой для устройств, использующих классические шинные системы. Преимущества *EtherCAT* это высокая пропускная способность - процесс обмена данными с 1000 распределенных цифровых входов / выходов занимает около 30 мкс. Данные для и от 1000 сервосетей могут обновляться со скоростью до 10 кГц. *EtherCAT* может быть использован

так же с медленным временем цикла, если нагрузка слишком высока на вашем компьютере.

Для отображения в реальном времени всех динамически изменяемых параметров привода (токов, напряжений, скорости, позиции и т. д.) в программе *Мотомастер*© реализован *графический интерфейс*, который эффективно используется при исследованиях и адаптации сервопривода к конкретному автоматизируемому процессу, при настройке и анализе прикладных программ.

Используемая структура сервоприводов СПС и СПШ позволяет реализовать следующие функциональные возможности (режимы работы):

- управление позицией рабочего органа с функцией плавного разгона и торможения;
- управление скоростью рабочего органа с функцией плавного разгона и торможения;
- управление моментом двигателя;
- отработку программ управления движением, разработанных пользователем без применения внешних контроллеров (с использованием ПЛК):

– управление режимами движения привода с изменением скорости и ускорения;

– выход в нулевую позицию;

– аварийный останов привода в случае выхода из рабочей зоны;

– включение/выключение внешнего оборудования по определенным событиям (по аналогии с обработкой прерываний);

– синхронизацию работы группы приводов, объединенных в локальную сеть с целью совместного позиционирования [17], в том числе, с помощью шины *CAN*;

- функцию электронного редуктора;
- тестовый режим, с помощью которого можно установить стандартные функции задания для привода (ступенька, синус) и проанализировать качество переходных процессов (качество управления), то есть в этом режиме осуществляется настройка привода на использование в конкретном оборудовании, обеспечивается его универсальность.

Сервопривод СПС обеспечивает высокую плавность хода на малых оборотах двигателя (5% на 3 об/мин), обладает широким диапазоном регулирования скорости (от 1:1000 до 1:12000 в зависимости от разрешения энкодера) и имеет высокие динамические характеристики (частота обсчета контура скорости до 5 кГц).

Использование в сервоприводе СПШ бесшагового (векторного) управление на основе адаптированного специально для шаговых

двигателей алгоритма позволяет исключить такой серьезный недостаток шаговых приводов, как пропуск шагов.

Универсальность анализируемых приводов определяется их техническими возможностями (наличие различных интерфейсов, тестового режима, графического интерфейса; встроенного ПЛК, программируемого на языке *SML* и др.), которые позволяют осуществить их настройку на любой из рассмотренных выше режимов работы.

Методика настройки сервоприводов СПС и СПШ на разные режимы работы представлена авторами в литературе [2]. Результат настройки по данной методике цифрового ПИД-регулятора контура скорости сервопривода СПС 25 представлен на рис. 3 при заданных значениях частоты вращения $n = 500 \frac{об}{мин}$ и максимальном ускорении, равном 100 об/с^2. Обеспечено перерегулирование $\sigma = 6.8\%$, время переходного процесса $t_{пп} < 30$ мс, статическая ошибка $\varepsilon_{уст} \leq 2\%$, число перерегулирований $N=1$.

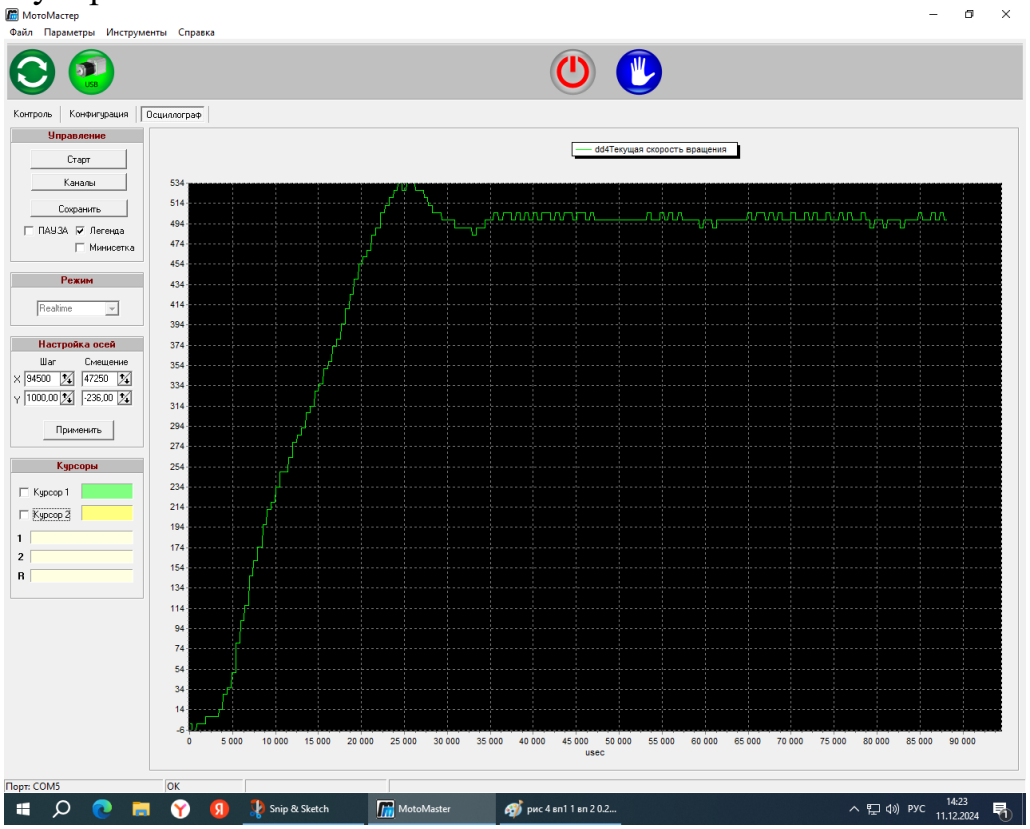


Рис. 3. К настройке переходного процесса в контуре скорости сервопривода СПС 25

Кибербезопасность работы распределенных сервоприводов

При организации киберзащиты систем контроля физического доступа к производственному оборудованию основное внимание уделяется проблеме предоставления или блокировке доступа. Чаще всего для

удаленной аутентификации персонала используется коммуникационный интерфейс *RS*-485, а для удаленной конфигурации и контроля параметров сервоприводов используется *CAN*-интерфейс. Данный выбор интерфейсов в первую очередь связан с небольшими затратами на реализацию системы контроля доступа и конфигурирования. Кроме того, возможность интерфейсов объединять различное оборудование в единый сегмент, позволяет использовать один управляющий контроллер. Но есть и отрицательные стороны данного решения. При большой протяженности коммуникационной сети с распределенным оборудованием (свыше 1200 метров, если используются несколько сегментов *RS*-485) всегда может возникнуть вероятность появления отдельных неконтролируемых участков физически доступных для злоумышленников. В этом случае приходится решать задачу контроля доступа методом усложнения программ, что не всегда реализуемо с учетом корпоративного программного обеспечения для промышленного оборудования.

В работе [18] предложена концепция защиты данных, передаваемых по отдельным, неконтролируемым участкам промышленной сети, физически доступных для злоумышленников. Основная идея заключается в замене специально выделенных сегментов сети, имеющих неконтролируемый доступ (открытый для злоумышленника), на сегменты PNS (Protected Network Segment), которые защищены аппаратными средствами на платформе FPGA. Универсальность таких сегментов заключается в возможности встраивания их в сеть на основе различных интерфейсов. Важная особенность таких решений заключается в том, что работа алгоритма и всего сегмента не зависит от протокола передачи данных. Предложенный алгоритм шифрования в PNS каждого бита передаваемого байта данных позволяет получить большую защиту, чем при блочном шифровании.

На основании результатов работы [18], была сформулирована и проработана структура HSM (Hardware Security Module) модуля. HSM модули работают, как правило, в достаточно жестких промышленных условиях. Это определяет выбор стандарта как на уровне электрических сигналов, так и при кодировании передачи данных на сигнальном уровне. Основным стандартом, определяющим идеологию HSM, является IEEE Standard 1355 [19]. Для увеличения надежности передаваемых данных используется две дифференциальных пары (в отличие от RS-485): D – линия для передачи данных и S – линия для передачи строба. D и S линии образуют DS-link. Дополнительная линия стробирования данных позволяет организовать самосинхронизацию данных и дает возможность произвольно менять скорость передачи, даже в пределах одного сообщения. Это дает дополнительное преимущество при защите передаваемых данных.

В статье [18] предлагаются результаты исследования разработанного HSM модуля на платформе FPGA (рис.4). Основой вычислительного ядра модуля является FPGA семейства Cyclone 10 LP фирмы INTEL, интегрированная в мини-плату TEI0003-03 [20]. Там же расположены 8 MByte SDRAM, 8 MByte Flash, USB port. Для испытаний модуля HSM_DNS была разработана печатная плата, для которой определены следующие требования:

- Печатная плата разработана в form factor PC/104, что позволит при необходимости подключить модуль к дополнительному контроллеру по шине PC/104.
- Для соединения мини-платы TEI0003-03 с “материнской” предусмотрены два ряда разъемов с цанговыми контактами.

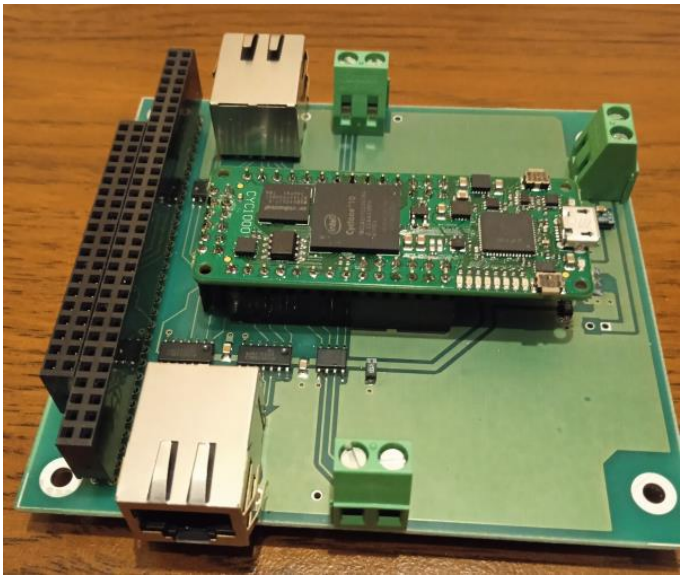


Рис. 4. HSM модуль для защиты неконтролируемых сегментов сети

Применение устройства может быть эффективно при сетевом взаимодействии промышленного оборудования, в частности сервоприводных устройств, и защите неконтролируемых участков коммуникационной сети для системы контроля доступа.

Обсуждение и выводы

Проведенный анализ показывает, что структура отечественных сервоприводов СПШ и СПС соответствует принципам интеллектуальности и универсальности, определяющим развитие современных приводных систем. Причем повышение интеллектуальности сервоприводов повышает возможности их универсализации. Каждый из указанных сервоприводов представляет собой комплект синхронного двигателя и сервоусилителя,

обеспечивающего подчиненное регулирование по току, скорости и позиции с использованием ПИ- и ПИД- регуляторов и реализацию алгоритма *векторного управления* двигателем. Такой подход позволяет реализовать управление с высокими показателями качества: диапазон регулирования скорости более 10000 при настраиваемой величине перерегулирования $\sigma \le 10\%$, широкая полоса пропускания, определяемая наибольшей частотой дискретизации $f_{\text{диск}} = 5\,кГц$. Наличие встроенного ПЛК значительно расширяет функциональные возможности сервопривода.

Для использования сервоприводов в распределенных системах управления в их структуру введен *CAN*-интерфейс, обеспечивающий синхронизацию работы большой группы СПС-приводов (до 128 приводов на базе промышленной шины *CAN*); реализован режим работы «*master-slave*»;

Также предусмотрена возможность обработки внешних событий с использованием интерфейса цифрового входа/выхода с оптической развязкой. Сервоприводы с такой структурой используются, например, в гибких производственных модулях, робото-технологических комплексах в машиностроении [20].

Универсализация рассматриваемых сервоприводов (их адаптация к конкретному автоматизируемому объекту) достигается: возможностью использования различных механических модулей перемещения; совершенными средствами настройки с использованием графического интерфейса, реализуемого в программе *Мотомастер*©; встроенным ПЛК, программируемым на языке *SML* с разработкой и отладкой программ в текстовом редакторе *Мотомастер*©.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Яровой Е.А. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) // Перспективы науки, 2021, №3. – С. 170-172.

[2] Евсиков А.А., В.А. Коковин, А.П. Леонов. Об особенностях структуры и настройки отечественных сервоприводов с векторным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №3 (341), 2020. – С. 122-130.

[3] Азизов А.А., Байбиков И.Ф., В.Н. Козловский В.Н., Стариков А.В. Дискретная математическая модель системы векторного управления электродвигателем переменного тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 12, 2024. – С. 648 – 653.

[4] C. Pang, V. Vyatkin, "IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component", *8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010)*, pp. 1124-1129.

[5] International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 245 p.
[6] Gao D, Wang S, Yang Y, Zhang H, Chen H, Mei X, Chen S, Qiu J. An Intelligent Control Method for Servo Motor Based on Reinforcement Learning. *Algorithms*. 2024; 17(1):14. https://doi.org/10.3390/a17010014.
[7] M. Y. Coskun and M. Itik, "Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system", ISA Transactions,V. 139, 2023, pp. 484-498, doi: 10.1016/j.isatra.2023.04.005.
[8] V. A. Kokovin, V. I. Diagilev, S. U. Uvaysov and S. S. Uvaysova, "Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications," *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED.2019.8798455.
[9] Сервоприводы отечественного производства СПС. Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=11 (дата обращения: 31.03.2025).
[10] Сервоприводы отечественного производства СПШ. Электрон. дан. – режим доступа: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=10 (дата обращения: 31.03.2025).
[11] Байбиков И.Ф., Стариков А.В. Повышение быстродействия следящих электроприводов прецизионных станков с синхронными исполнительными двигателями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 2, 2025. – С. 51 – 59.
[12] Туркин И.И., Мин Хеин. Совершенствование систем управление электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2016, №3. – С. 86-92.
[13] Интегрированный сервопривод СПШ10. Язык программирования, версия 4.2. – ЗАО «Сервотехника». Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf (дата обращения: 31.03.2025).
[14] Сулейманов А.А. Методика расчета преобразователя частоты на базе синхронного электродвигателя // Будущее науки – 2021. Сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции. – Курск: Юго-западный государственный университет, 2021. – Том 6, С.148-152.
[15] Стельмащук С.В. Комбинированное управление следящего электропривода с компенсацией ошибки по ускорению // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Т. 17, 2024, №7. – С. 75-82.

[16] Ахмад З., Мартинов Г.М. Управление серводвигателями типа СПШ на базе микроконтроллера ARDUINO и с использованием протокола CAN // Материалы XVI Всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ-2023)». – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2023. – С. 33-41.
[17] Ибатуллин А.А., Гебель Е.С., Гудинов В.Н. К вопросу управления серводвигателями автоматической сварочной установки, предназначенной для сварки крупногабаритных ёмкостей ракет-носителей // Омский научный вестник, 2019. – №3, С. 38-45.
[18] V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," *2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED63331.2024.10741050.
[19] "IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)", *IEEE Standard 1355 – 1995 IEEE*, June 1996.
[20] TEI0003-03-QFCR4A Trenz Electronic FPGA module with Intel Cyclone 10 LP FPGA. Электрон. дан. – Режим доступа: https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TEI0003+Resources (дата обращения: 31.03.2025).

A.A. Evsikov, V.A. Kokovin, A.P. Leonov, A.N. Sytin

ON THE INTELLECTUALITY AND VERSATILITY OF SERVO DRIVES FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT CONTROL SYSTEMS

State University "Dubna", Branch "Protvino", Russia

Abstract

The article considers the issues of intellectualization and universalization of servo drives, which are a key element of automated control systems for technological processes and production. Technical solutions aimed at improving the quality of motion control, optimizing the interaction of the servo drive with other equipment of the distributed automated system are analyzed. The problems of equipment cybersecurity, methods of network protection of equipment in uncontrolled areas of the industrial network, physically accessible to intruders are considered.

Key words: servo drive, vector control, slave control system, digital PID controller, tuning to technical optimum, cybersecurity.

REFERENCES

[1] YArovoj E.A. Avtomatizaciya i upravlenie tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami (po otraslyam) // Perspektivy nauki, 2021, №3. – pp. 170-172. (rus.)

[2] Evsikov A.A., V.A. Kokovin, A.P. Leonov. Ob osobennostyah struktury i nastrojki otechestvennyh servoprivodov s vektornym upravleniem // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, №3 (341), 2020. – pp. 122-130. (rus.)

[3] Azizov A.A., Bajbikov I.F., V.N. Kozlovskij V.N., Starikov A.V. Diskretnaya matematicheskaya model' sistemy vektornogo upravleniya elektrodvigatelem peremennogo toka // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, Vyp. 12, 2024. – pp. 648 – 653. (rus.)

[4] C. Pang, V. Vyatkin, "IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component", *8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010)*, pp. 1124-1129.

[5] International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 245 p.

[6] Gao D, Wang S, Yang Y, Zhang H, Chen H, Mei X, Chen S, Qiu J. An Intelligent Control Method for Servo Motor Based on Reinforcement Learning. *Algorithms*. 2024; 17(1):14. https://doi.org/10.3390/a17010014.

[7] M. Y. Coskun and M. Itik, "Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system", ISA Transactions,V. 139, 2023, pp. 484-498, doi: 10.1016/j.isatra.2023.04.005.

[8] V. A. Kokovin, V. I. Diagilev, S. U. Uvaysov and S. S. Uvaysova, "Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications," *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED.2019.8798455.

[9] Servoprivody otechestvennogo proizvodstva SPS. Elektron. dan. – Rezhim dostupa: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=11 (data obrashcheniya: 31.03.2025).

[10] Servoprivody otechestvennogo proizvodstva SPSH. Elektron. dan. – rezhim dostupa: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=10 (data obrashcheniya: 31.03.2025).

[11] Bajbikov I.F., Starikov A.V. Povyshenie bystrodejstviya sledyashchih elektroprivodov precizionnyh stankov s sinhronnymi ispolnitel'nymi dvigatelyami // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, Vyp. 2, 2025. – pp. 51 – 59.

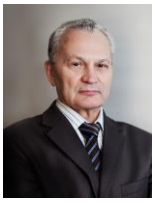
[12] Turkin I.I., Min Hein. Sovershenstvovanie sistem upravlenie elektroprivodami na osnove principov podchinennogo regulirovaniya i samoorganizacii // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2016, №3. – pp. 86-92.
[13] Integrirovannyj servoprivod SPSH10. YAzyk programmirovaniya, versiya 4.2. – ZAO «Servotekhnika». Elektron. dan. – Rezhim dostupa: https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf (data obrashcheniya: 31.03.2025).
[14] Sulejmanov A.A. Metodika rascheta preobrazovatelya chastoty na baze sinhronnogo elektrodvigatelya // Budushchee nauki – 2021. Sbornik nauchnyh statej 9-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. – Kursk: YUgo-zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2021. – Tom 6, pp.148-152.
[15] Stel'mashchuk S.V. Kombinirovannoe upravlenie sledyashchego elektroprivoda s kompensaciej oshibki po uskoreniyu // Izvestiya SPbGETU «LETI», T. 17, 2024, №7. – pp. 75-82.
[16] Ahmad Z., Martinov G.M. Upravlenie servodvigatelyami tipa SPSH na baze mikrokontrollera ARDUINO i s ispol'zovaniem protokola CAN // Materialy XVI Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Mashinostroenie: tradicii i innovacii (MTI-2023)». – M.: FGBOU VO «MGTU «STANKIN», 2023. – pp. 33-41.
[17] Ibatullin A.A., Gebel' E.S., Gudinov V.N. K voprosu upravleniya servodvigatelyami avtomaticheskoj svarochnoj ustanovki, prednaznachennoj dlya svarki krupnogabaritnyh yomkostej raket-nositelej // Omskij nauchnyj vestnik, 2019. – №3, pp. 38-45.
[18] V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," *2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED63331.2024.10741050.
[19] "IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)", *IEEE Standard 1355 – 1995 IEEE*, June 1996.
[20] TEI0003-03-QFCR4A Trenz Electronic FPGA module with Intel Cyclone 10 LP FPGA. Электрон. дан. – Режим доступа: https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TEI0003+Resources (дата обращения: 31.03.2025).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 612.766:004.942
doi:10.18720/SPBPU/2/id-129

В.М. Мусалимов[1], Е.Б. Седакова[2], М.А. Ерофеев[3], А.О. Кузнецов[4]

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПРИ УДАРНО-ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТОПЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ



[1]Виктор Михайлович Мусалимов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-921-421-79-17, E-mail: musvm@yandex.ru.



[2]Елена Борисовна Седакова,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-911-271-11-03, E-mail: elenasedakova2006@yandex.ru.



[3]Михаил Александрович Ерофеев,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-960-250-89-07, E-mail: mr.mikhail-erofeev@yandex.ru.



[4]Артем Олегович Кузнецов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8-953-357-64-08, E-mail: artem.o.kuznetcov@yandex.ru.

Аннотация

Исследованы подходы к получению реакций стопы при ходьбе, проведен анализ данных, полученных на стандартной динамометрической платформе и данных, полученных с использованием инерциальных датчиков. Обнаружено, что во втором случае регистрируются трехточечные импульсы, в отличие от двухточечных в первом случае. В ходе дальнейших исследований модели импульсов были представлены в базисе обобщенных функция Эрмита. Результаты работы рекомендуется использовать при

моделировании динамики двуногой ходьбы, при проектировании опорных элементов ортезов голеностопных суставов и двуногих роботов.

Ключевые слова: опорно-двигательный аппарат, функции Эрмита, моделирование, инерциальные измерительные устройства.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8).

Введение

В настоящем исследовании авторы сосредоточились на экспериментально-теоретическом исследовании реакций стопы при её ударно-фрикционным взаимодействии с опорной поверхностью. Понимание механики ударно-фрикционного взаимодействия полезно не только для моделирования ходьбы, но, например, и для решения задач реабилитационных процедур с использованием ортезов [1,2]. В качестве экспериментальной базы исследований использовались данные инерциальных измерительных устройств для получения протоколов по кинематике ходьбы. Параллельно в синхронизированном режиме выполнялись измерения на динамометрической платформе, В экспериментах [3] принимали участие женщины и мужчины без явных нарушений здоровья, без каких-ли травм и хирургических болезней в их историях болезней.

Известен ряд работ, посвященный динамике двуногой ходьбы [4,5]. Однако в них не учтены особенности локализации фаз взаимодействия стопы с опорной поверхностью. Не обнаружено также работ, где моделируются локальные импульсы реактивных касательных сил в фазах ударного касания пятки и носка ступни. Одна из целей наших работ определялась этим направлением.

Нами была использована платформа Kistler 9286a. Эта силовая платформа разработана специально для использования при анализе походки и равновесия, для задач реабилитации и исследований в биомеханике. Она имеет встроенный усилитель заряда, совместимый со всеми распространенными системами анализа движения. Пьезоэлектрические 3-компонентные датчики силы имеют очень низкие значения перекрестных помех и в сочетании с особым принципом конструкции обеспечивают требуемую точность нахождения центра давления.

Авторами был разработан измерительный комплекс, оснащенный акселерометром. Работа комплекса строилась в соответствии со следующей последовательностью обработки данных [6].

На рисунке 1 показано, как были установлены инерциальные датчики: на область крепления Ахиллова сухожилия и пяточной кости, а также на тыльную поверхность в область предплюсно - плюсневого сустава.

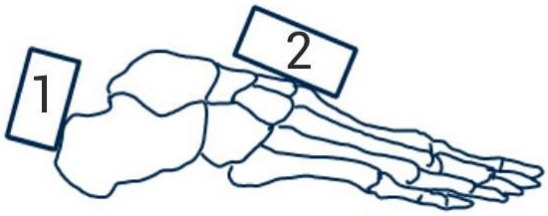


Рис. 1. Крепление инерциальных датчиков: 1-пяточная кость;2-тыльная поверхность стопы

В отличие от данных платформы, позволяющей осуществлять замеры как касательных так и нормальных усилий, здесь фиксировались ударные нормальные нагрузки с данными по ускорениям. Известно, что программное обеспечение платформы традиционно настроено на условия статических испытаний, когда распределения главных векторов усилий выстраиваются вдоль соответствующих осей. Инерциальные устройства оценивают данные в условиях динамического состояния. Имеются ли расхождения между данными? И на что ориентироваться при постановке задач динамики двуногой ходьбы и решении прикладных задач, связанных с конструированием ортезов голеностопного сустава? Работа имеет целью дать ответы и на эти вопросы.

Анализ экспериментальных данных

На рисунке 2 представлены графики нормальных реакций стоп левой и правой ног. Верхняя часть – это обработка данных платформы. где силы измеряются в процентах веса, а время в процентах цикла шага. Нижняя – обработка данных системы инерциальных датчиков, где по оси ординат отложены значения доли ускорений относительно ускорения свободного падения, а ось абсцисс – те же проценты цикла шага. При весе человека, равного 70 кг, предельные значения на верхних графиках 110% составляют 770 н. А предельные значения 20g на нижних графиках – это 20% доля ускорения свободного падения g .Откуда следует, что это составляет значение 840 н. То есть оценка вертикальных реакций в условиях динамического состояния превышает максимальные значения реакций статического состояния. Но порядок величин один!

Качественно же графики существенно различаются. Первое отличие состоит в том, что на нижних графиках отображены локальные ударные импульсы ускорений, что естественно описывается обобщенными функциями Эрмита. Второе отличие состоит в том, что инерциальная система регистрирует три импульса (Рис.2).

При моделировании динамики ходьбы вертикальные реакции стопы многими авторами использовались образы двугорбых кривых в

сагиттальной плоскости. Боле того, даже сопроводительное программное обеспечение при экспериментах на динамометрических платформах ориентировано на построение главных векторов вертикальных сил реакций в этой плоскости.

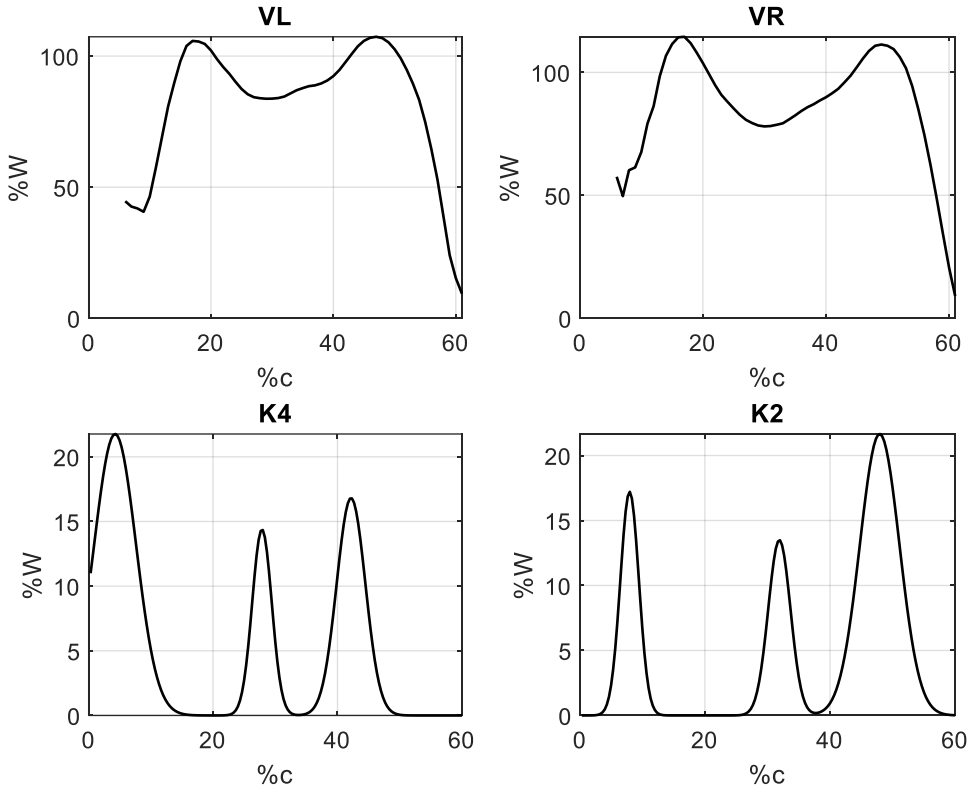


Рис. 2. VL,VR-данные динамометрической платформы-нормальные реакции для ступни левой и правой ног;K4,K2-данные инерциальных датчиков в условиях динамического состояния-для ступни левой и правой ног

Указанные допущения принимались в рамках традиционных постановок задач динамики твердого тела, когда внимание сосредотачивается на движении центра тяжести системы (точке). В целях успешного решения задачи реакции моделировались гладкими функциями, а контакт по умолчанию принимался точечным.

Опыт же показывает, что взаимодействие стопы с опорной поверхностью состоит из нескольких фаз: ударно-фрикционных и упруго-фрикционных. А использованные в экспериментах инерциальные датчики регистрирует три ударных импульса вместо двух на динамометрической платформе, что отражено в формуле:

$$F = a_1 exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) + a_3 exp\left(-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2\right)\text{-}$$

численные значения параметров для K4(FL), K2(FR) в таком представлении приведены в таблице 1.

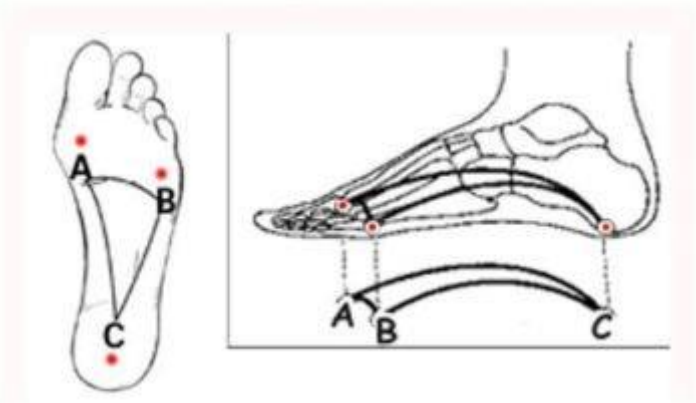


Рис. 3. F,B-точки реактивных ударных импульсов-плюсны большого пальца и мизинца; C-пяточная кость. Слева парасагиттальная плоскость, справа сагитальная плоскость.

Упруго-фрикционное взаимодействие стопы с опорной поверхностью при двуногой ходьбе

Есть ряд принципиальных соображений, чтобы делать акцент именного на парном анализе ходьбы. Во-первых, дважды в течении 20% от цикла ходьбы пятка одной ноги и носок другой одновременно импульсно контактируют с опорной поверхностью (двухопорный период цикла) с распределением энергию взаимодействия между обеими ногами. Во-вторых, опять же дважды в течении других 20% циклов от ходьбы подошва одной ноги в фазе упруго-фрикционного переката и ступня другой в фазе свободного переноса (одноопорный период) также перераспределяют энергию между обеими ногами.

Доля полной опоры в цикле шага составляет 60% процентов цикла шага. При этом по 20% приходится на 3 фазы :

- в первой фазе пятка одной ноги и носок другой ноги одновременно находятся в контакте с опорной поверхностью;
- во второй фазе ступня одной ноги осуществляет винтовой перекат, а ступня второй ноги в колебательном режиме бесконтактно переносится к точке пяточного контакта;
- третья фаза с точностью до инверсии аналогична первой фазе.

На рис.4 представлены фазы взаимодействия ступни с опорной поверхностью при двуногой ходьбе. Здесь отражены только касательные взаимодействия в продольном и поперечном направлениях, формирующие процессы трения продольного скольжения и трения верчения. При этом, в опорных фазах выделяют передний и задний толчки-ударные импульсы продольных и поперечных касательных сил.

Таблица 1. Численные значения для K4(FL), K2(FR)

	Параметры функций Эрмита		
	a	b	c
FL	a_1 =16.82	b_1 =42.18	c_1 =3.25
	a_2 =14.39	b_2 =27.87	c_2 =2.22
	a_3 =21.77	b_3 =4.27	c_3 =4.76
FR	a_1 =21.66	b_1 =47.93	c_1 =4.48
	a_2 =13.51	b_2 =31.91	c_2 =2.52
	a_3 =17.21	b_3 =7.97	c_3 =2.09

Эти импульсы сил локализованы, что позволило использовать при их моделировании функции Эрмита [7]:

$$E_1(t) = \frac{h_1(t-m)}{\sigma} exp\left(\frac{-(t-m)^2}{D}\right)$$

для поперечных касательных сил и

$$E_0(t) = h_0 exp\left(\frac{-(t-m)^2}{D}\right)$$

для продольных касательных сил.

Здесь обозначено: m — координаты точки контакта пятки и ступни вдоль сагитальной оси (сагитальная плоскость на рис. 3), D - дисперсия распределения, σ стандартное отклонение, h_0 и h_1 -корректирующие коэффициенты.

Остановимся на верхней части рис. 4, на котором показано распределение касательных сил в поперечном направлении с учетом двуногой ходьбы. В фазах 1 и 3 отображены моменты одновременного ударного контакта носка и пятки. При этом согласно экспериментам и их модельного описания в базисе обобщенных функций Эрмита распределения для пятки и носка являются зеркальными. В силу этого достаточно рассмотреть только один из фрагментов касательного удара. Отметим ещё один момент. Ось абсцисс согласно установившемся традициям [7] используется для обозначения цикла шага , который измеряется в процентах Полный цикл-это 100% , а на долю полной опоры стопы приходится 60%. Переход ко временной шкалам осуществляется при задании длины шага L, скорости движения V, длины ступни l. Принято, что длина ступни равна отрезку: пяточный бугор – плюсно-фаланговый сустав, а длины отрезков пяточный бугор-периферия пяточной подошвы и дистальной фаланги равны и обозначаются U_1. Обозначим TL =L/V период цикла шага и зададим переменные t:TL /100:TL согласованные со шкалой цикла.

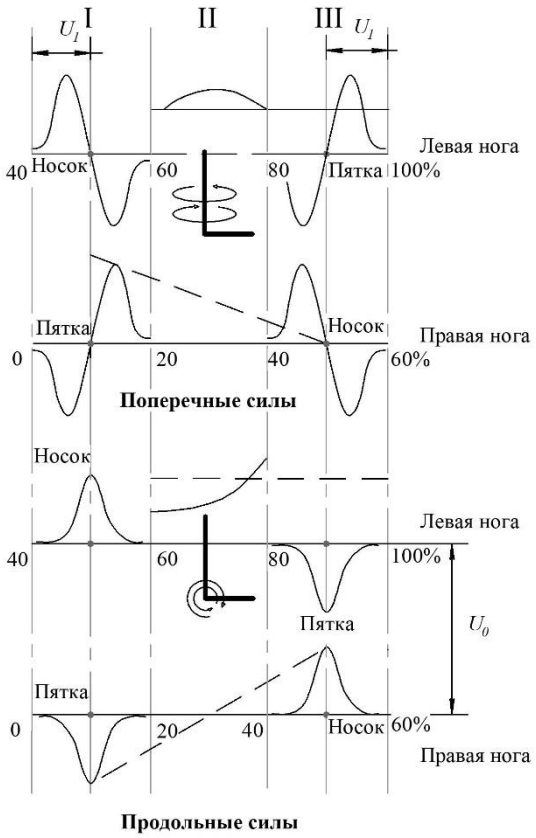


Рис. 4. Фазы локального упруго-фрикционного взаимодействия

В каждом отдельном случае сегменты процентов, которые являются нормой для не проблемной ходьбы, пересчитываются на временные сегменты. В одном из экспериментов получено TL =0.44 сек. Тогда значение 10% по шкале циклов соответствует значению 0.044 сек по шкале времени. Оба фрагмента представлено на Рис.2 для h0 =200 и h1=12·103 . Для вычисления импульсов сил определимся с пределами интегрирования обобщенных функция Эрмита. Эти пределы интегрирования выбраны таким образом, чтобы были охвачены 99 % площади под кривой функции распределения. Здесь оказалось полезным использование правила 3-х сигм из теории вероятностей [7], что дало σ=0.007 с и D=σ2 =4,9·10-5 .

Обсуждение результатов

Использование динамометрической платформы для исследования опорно-двигательной системы имеет свою историю. Она была разработана специально для использования при анализе походки, для задач реабилитации и исследований в биомеханике. При всех значимых характеристиках разработчики, с нашей точки зрения, не учли возникновения собственных колебаний в металлической пластине платформы при ударах пяткой и носком. И заметим, что платформа – это стационарная система. Датчики встроены в неё. С системой инерциальных

датчиков все по-другому: датчики прикрепляются непосредственно к пяточным костям опорно-двигательной системы.

В работе были использованы не все возможности системы, позволившие при использовании акселерометров оценить ускорения при ударном взаимодействии стопы с опорной поверхностью. На самом деле основу таких систем составляют и акселерометры, и гироскопы, и магнитометры, которые обеспечивают сбор данных о движении и положении тела в реальном времени [8,9,10]. На рис.5 представлена схема работы такой системы.

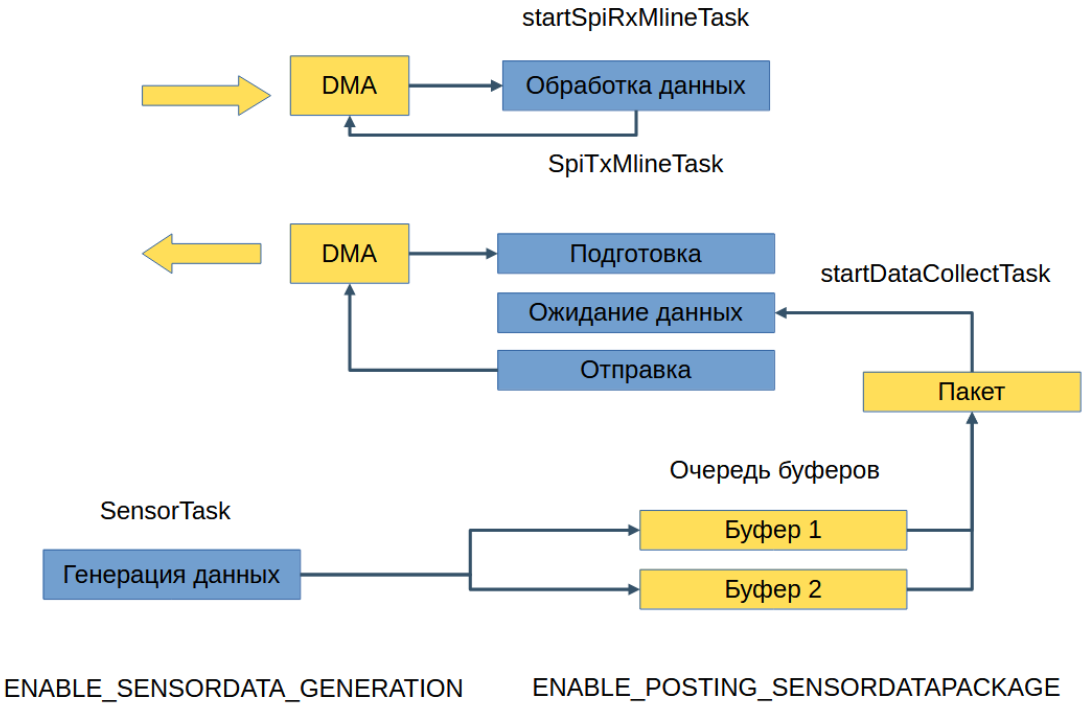


Рис. 5. Структурная схема работы программно-аппаратной инерциальной системы

Процесс начинался с запуском подпрограммы SensorTask которая собирала данные с датчиков — акселерометра, Следующий этап — работа подпрограммы startDataCollectTask. Она брала на себя предварительную обработку и фильтрацию данных, За процесс отправки данных отвечала подпрограмма SpiTxMlineTask. Завершада цикл подпрограмма startSpiRxMlineTask. Она принимала команды от подключенных устройств, позволяя настраивать параметры работы комплекса — от тонкой регулировки датчиков до изменения скорости передачи данных.

Отметим, что такие системы имеют положительные пользовательские особенности[11]:

- обеспечивают высокую точность измерений[12]: современные датчики способны фиксировать даже минимальные изменения в движениях.
- обладают низкой стоимостью по сравнению с традиционными системами мониторинга.
- они мобильны: компактность и возможность интеграции в носимые устройства [13,14,15] делают их удобными для повседневного использования.
- осуществляют удаленный мониторинг: данные могут передаваться в реальном времени на устройства специалистов или в облачные системы для дальнейшего анализа.

В условиях развития медицинского оборудования инерциальные измерительные устройства (ИИУ) становятся важным инструментом в создании ортезов — специализированных устройств, предназначенных для поддержки, коррекции или компенсации функций опорно-двигательного аппарата.

Мы полагаем, что постановка проблемы конструирования ортезов должна опираться на парадигму: биомехатронная система стопа-ортез. Такая проектно-исследовательская программа включает в себя набор компетенций: биомеханика стопы с учетом ее упруго-ударно-фрикционного взаимодействия с опорной поверхностью; клинический анализ походки; дизайн мехатронного ортеза; синтез систем дистанционного контроля за состоянием системы.

Заключение

Установлены закономерности упруго-фрикционного взаимодействия ступни с опорной поверхностью в их ударных фазах для двуногой ходьбы. Показано, что поперечные и продольные локализованные импульсы сил формируют действия, согласованные (синхронизированные) для обеих ног.

Апробировано инерциальное измерительное устройство, позволяющее количественно оценивать доли нормальных ускорений при ударном взаимодействии стопы с опорной поверхностью с помощью акселерометров.

Разработана модель, основанная на функциях Эрмита, которая продемонстрировала возможность интерпретации кинематики походки и может служить основой для дальнейших исследований. Обнаружено, что во втором случае регистрируются трехточечные импульсы в отличие от двухточечных в первом случае.

Проведённое исследование демонстрирует потенциал использования акселерометров как эффективного инструмента для анализа походки, вносит вклад в развитие биомеханических исследований и создаёт

предпосылки для практического применения полученных данных в решении прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Donatelli R.A. Normal biomechanics of the foot and ankle // J. Orthop. Sports Phys. Ther. – 1985. – Vol. 7, № 3. – P. 91–95. – DOI: 10.2519/jospt.1985.7.3.91.

[2] Даминов В.Д., Зимина Е.Ю., Рыбалко Н.В., Кузнецов А.Н. Роботизированные технологии восстановления функции ходьбы в нейрореабилитации. – М. : РАЕН, 2010. – 128 с.

[3] Мусалимов В.М., Паасуке М., Гапеева Е., Ерелине Я., Ерофеев М.А. Моделирование динамики опорно-двигательной системы // Науч.-техн. вестн. информац. технол., механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 6. – С. 1159–1166.

[4] Белецкий В.В. Двуногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. – М. : Наука, 1984. – 288 с.

[5] Вукобратович М., Франк А., Джурич Д. Об устойчивости при передвижении на двух ногах // Механика. – 1972. – № 1 (131).

[6] Wilson S., Eberle H., Hayashi Y., Madgwick S.O.H., McGregor A., Jing X., Vaidyanathan R. Formulation of a new gradient descent MARG orientation algorithm: Case study on robot teleoperation // Mech. Syst. Signal Process. – 2019. – Vol. 130. – P. 183–200. – ISSN: 0888-3270.

[7] Мусалимов В.М., Ерофеев М.А., Монахов Ю.С., Малов М.С. Моделирование ударно-фрикционного взаимодействия стопы с опорной поверхностью с использованием базиса обобщенных функций Эрмита // Изв. вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 8. – С. 652–659. – DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-652-659.

[8] Jang S., Park S., Moon S., Kim J., Lee S. Comparison of Camera-based and Inertial Measurement Unit-based Motion Analysis // Proc. 7th Int. Conf. on Sensor Networks (SENSORNETS 2018). – 2018. – P. 161–167. – DOI: 10.5220/0006716601610167. – URL: https://pdfs.semanticscholar.org/cfaf/ea1e554e9640345160334c64a5ed14a5dbcd.pdf

[9] Xie X., Geng R., Ma J., Zhou B. AKF-LIO: LiDAR-Inertial Odometry with Gaussian Map by Adaptive Kalman Filter. – 2025. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.06891

[10] Rao B., Kazemi E., Ding Y., Shila D.M., Tucker F.M., Wang L. CTIN: Robust Contextual Transformer Network for Inertial Navigation. – 2021. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.02143

[11] Попков А.В., Бахшиев А.В. Разработка системы распознавания динамических жестов для устройств, содержащих инерциальный модуль (IMU) // Современное машиностроение: наука и образование:

материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.Н. Евграфова, А.А. Поповича. – СПб. : ПОЛИТЕХ_ПРЕСС, 2021. – С. 373–388. – ISSN 2223-0807. – УДК 004.05А.
[12] García-de-Villa S., Casillas-Pérez D., Jiménez-Martín A., García-Domínguez J.J. Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Comprehensive Review // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2023. – Vol. 72. – URL: https://arxiv.org/abs/2401.12919
[13] Martini E., Boldo M., Aldegheri S., Valè N., Filippetti M., Smania N., Bertucco M., Picelli A., Bombieri N. Enabling Gait Analysis in the Telemedicine Practice through Portable and Accurate 3D Human Pose Estimation // Comput. Methods Programs Biomed. – 2022. – Vol. 225. – 107016. – ISSN 0169-2607. – DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.107016.
[14] Scheiterer E.S., Heinrich S., Liphardt A.-M., Leyendecker S. Marker position uncertainty in joint angle analysis for normal human gait — A new error-modelling approach // Biomed. Signal Process. Control. – 2024. – Vol. 95, Part B. – 106474. – ISSN 1746-8094. – DOI: 10.1016/j.bspc.2024.106474.
[15] Yan J., Xiong W., Jin L., Jiang J., Yang Z., Hu S., Zhang Q. Spatial and temporal attention embedded spatial temporal graph convolutional networks for skeleton based gait recognition with multiple IMUs // iScience. – 2024. – Vol. 27, № 9. – 110646. – ISSN 2589-0042. – DOI: 10.1016/j.isci.2024.110646.

V.M. Musalimov, E.B.Sedakova, M.A. Erofeev, A.O. Kuznetsov

MODELING REACTIONS DURING IMPACT-FRICTION INTERACTION OF THE FOOT WITH THE SUPPORTING SURFACE

Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Science, Russia

Abstract

The article considers variants of experimental data obtained on a standard dynamometric platform and data obtained using inertial sensors. It was found that in the second case, three-point impulses are recorded, in contrast to two-point ones in the first case. In the course of further studies, the impulse models were presented in the basis of generalized Hermite functions. The results of the work are recommended for use in modeling the dynamics of bipedal walking, in designing support elements of ankle orthoses and bipedal robots.

Key words: musculoskeletal system, Hermite functions, modeling, inertial measurement units

REFERENCES

[1] Donatelli R.A. Normal biomechanics of the foot and ankle // J. Orthop. Sports Phys. Ther. – 1985. – Vol. 7, № 3. – P. 91–95. – DOI: 10.2519/jospt.1985.7.3.91.

[2] Daminov V.D., Zimina E.Yu., Rybalko N.V., Kuznetsov A.N. Robotizirovannye tekhnologii vosstanovleniya funktsii khod'by v neiroreabilitatsii. – M. : RAEN, 2010. – 128 s.

[3] Musalimov V.M., Paasuke M., Gapeeva E., Yereline Ya., Erofeev M.A. Modelirovanie dinamiki oporno-dvigatel'noi sistemy // Nauch.-tekhn. vestn. informats. tekhnol., mekhaniki i optiki. – 2017. – T. 17, № 6. – S. 1159–1166.

[4] Beletskii V.V. Dvunogaya khod'ba: model'nye zadachi dinamiki i upravleniya. – M. : Nauka, 1984. – 288 s.

[5] Vukobratovich M., Frank A., Dzhurich D. Ob ustoĭchivosti pri peredvizhenii na dvukh nogakh // Mekhanika. – 1972. – № 1 (131).

[6] Wilson S., Eberle H., Hayashi Y., Madgwick S.O.H., McGregor A., Jing X., Vaidyanathan R. Formulation of a new gradient descent MARG orientation algorithm: Case study on robot teleoperation // Mech. Syst. Signal Process. – 2019. – Vol. 130. – P. 183–200. – ISSN: 0888-3270.

[7] Musalimov V.M., Erofeev M.A., Monakhov Yu.S., Malov M.S. Modelirovanie udarno-friktsionnogo vzaimodeistviya stopy s opornoi poverkhnost'yu s ispol'zovaniem bazisa obobshchennykh funktsii Ermita // Izv. vuzov. Priborostroenie. – 2023. – T. 66, № 8. – S. 652–659. – DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-652-659.

[8] Jang S., Park S., Moon S., Kim J., Lee S. Comparison of Camera-based and Inertial Measurement Unit-based Motion Analysis // Proc. 7th Int. Conf. on Sensor Networks (SENSORNETS 2018). – 2018. – P. 161–167. – DOI: 10.5220/0006716601610167. – URL: https://pdfs.semanticscholar.org/cfaf/ea1e554e9640345160334c64a5ed14a5dbcd.pdf

[9] Xie X., Geng R., Ma J., Zhou B. AKF-LIO: LiDAR-Inertial Odometry with Gaussian Map by Adaptive Kalman Filter. – 2025. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.06891

[10] Rao B., Kazemi E., Ding Y., Shila D.M., Tucker F.M., Wang L. CTIN: Robust Contextual Transformer Network for Inertial Navigation. – 2021. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.02143

[11] Popkov A.V., Bakhshiev A.V. Razrabotka sistemy raspoznavaniya dinamicheskikh zhestov dlya ustroistv, soderzhashchikh inertsial'nyi modul' (IMU) // Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie: materialy 10-i Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / pod red. A.N. Evgrafova, A.A. Popovicha. – SPb. : POLITEKH_PRESS, 2021. – S. 373–388. – ISSN 2223-0807. – UDK 004.05A.

[12] García-de-Villa S., Casillas-Pérez D., Jiménez-Martín A., García-Domínguez J.J. Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Comprehensive Review // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2023. – Vol. 72. – URL: https://arxiv.org/abs/2401.12919
[13] Martini E., Boldo M., Aldegheri S., Valè N., Filippetti M., Smania N., Bertucco M., Picelli A., Bombieri N. Enabling Gait Analysis in the Telemedicine Practice through Portable and Accurate 3D Human Pose Estimation // Comput. Methods Programs Biomed. – 2022. – Vol. 225. – 107016. – ISSN 0169-2607. – DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.107016.
[14] Scheiterer E.S., Heinrich S., Liphardt A.-M., Leyendecker S. Marker position uncertainty in joint angle analysis for normal human gait — A new error-modelling approach // Biomed. Signal Process. Control. – 2024. – Vol. 95, Part B. – 106474. – ISSN 1746-8094. – DOI: 10.1016/j.bspc.2024.106474.
[15] Yan J., Xiong W., Jin L., Jiang J., Yang Z., Hu S., Zhang Q. Spatial and temporal attention embedded spatial temporal graph convolutional networks for skeleton based gait recognition with multiple IMUs // iScience. – 2024. – Vol. 27, № 9. – 110646. – ISSN 2589-0042. – DOI: 10.1016/j.isci.2024.110646.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.865.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id-130

А.В. Нелюбова[1], В.В. Жога[2]

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ



[1]Анна Васильевна Нелюбова,
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: (937)708-0948, E-mail: mqdschen@yandex.ru.



[2]Виктор Викторович Жога,
Волгоградский государственный технический университет Россия, Волгоград
Тел.: (8442)24-81-13, E-mail: viczhoga@gmail.com.

Аннотация

В работе рассматривается кинематическая схема манипулятора-трипода с дополнительной связью в виде полой трубы, которая позволяет разгрузить исполнительные приводы от изгибающих моментов в процессе нагрузки рабочего органа и реализовать подачу энергии или рабочей смеси к рабочему органу манипулятора. Работа посвящена синтезу движений исполнительных механизмов манипулятора-трипода с дополнительной связью. В результате работы определены движущие силы в приводах при движении рабочего органа манипулятора из исходной точки в заданную конечную точку

Ключевые слова: манипулятор-трипод, пассивное звено, кинематический анализ, динамический анализ.

Введение

Особенности управления роботом-манипулятором состоят в необходимости реализации многомерного движения за счет непрерывного

управления системой приводов его исполнительных звеньев [1]. Манипуляторы используются для выполнения разнообразных технологических операций в области автомобилестроения, судостроения, машиностроения, медицины, сельского хозяйства и пищевой промышленности. Примерами технологических операций, реализуемых манипулятором, могут быть сверление отверстий, перемещение и ориентирование деталей, фрезерование заготовок, сварка, захват и перенос объектов, покраска и распыление жидкости.

Исследование гибридных манипуляторов является актуальным научным направлением среди российских и зарубежных ученых. Широкое применение гибридных манипуляторов обусловлено их значительными преимуществами по сравнению с механизмами последовательной и параллельной структуры. Манипуляторы гибридной структуры объединяют в себе динамическую точность позиционирования рабочего органа из-за высокой жёсткости конструкции, большие скорости перемещения исполнительных звеньев и увеличенное рабочее пространство. Гибридные манипуляторы находят свое применение в сфере машиностроения для задач фрезерования, сварки, сборки. Примеры манипуляторов гибридной структуры представлены в работах [2-6], что характеризует широкое применение данных кинематических схем. Манипуляторы гибридной структуры не так широко изучены, как манипуляторы на основе открытой и замкнутой кинематической цепи [7], поэтому исследования новых подходов в управлении движением гибридных манипуляторов [8-9] являются актуальной задачей.

Объект исследования

Рассматривается манипулятор-трипод с дополнительной пассивной связью [10]. Движение выходного звена манипулятора осуществляется за счет работы трех приводов, регулирующих расстояние между заданными точками крепления линейных звеньев 1, 2, 3 на треугольном основании *ABC* и выходного звена 6. Четыре степени подвижности обеспечиваются путем перемещений линейных исполнительных звеньев 1, 2, 3, 4, реализующих заданные законы движения. Кинематическая схема манипулятора приведена на рисунке 1. Параллельная часть конструкции манипулятора представлена в виде трипода. Длина каждого звена регулируется электрическим приводом. В конструкцию манипулятора (рисунок 2) включено дополнительное пассивное звено 5 в виде полой металлической трубы, которое одним концом крепится на шарнире 7, а другим концом соединено с выходным звеном 6. Дополнительное звено компенсирует изгибы в приводах, что позволяет звеньям работать только на растяжение и сжатие. За счет изменения длины четвертого линейного привода 4

обеспечивается поворот поворотного основания *ABC* вокруг оси *Ox* на угол φ, что увеличивает маневренность робота. На выходном звене 6 устанавливают рабочий орган.

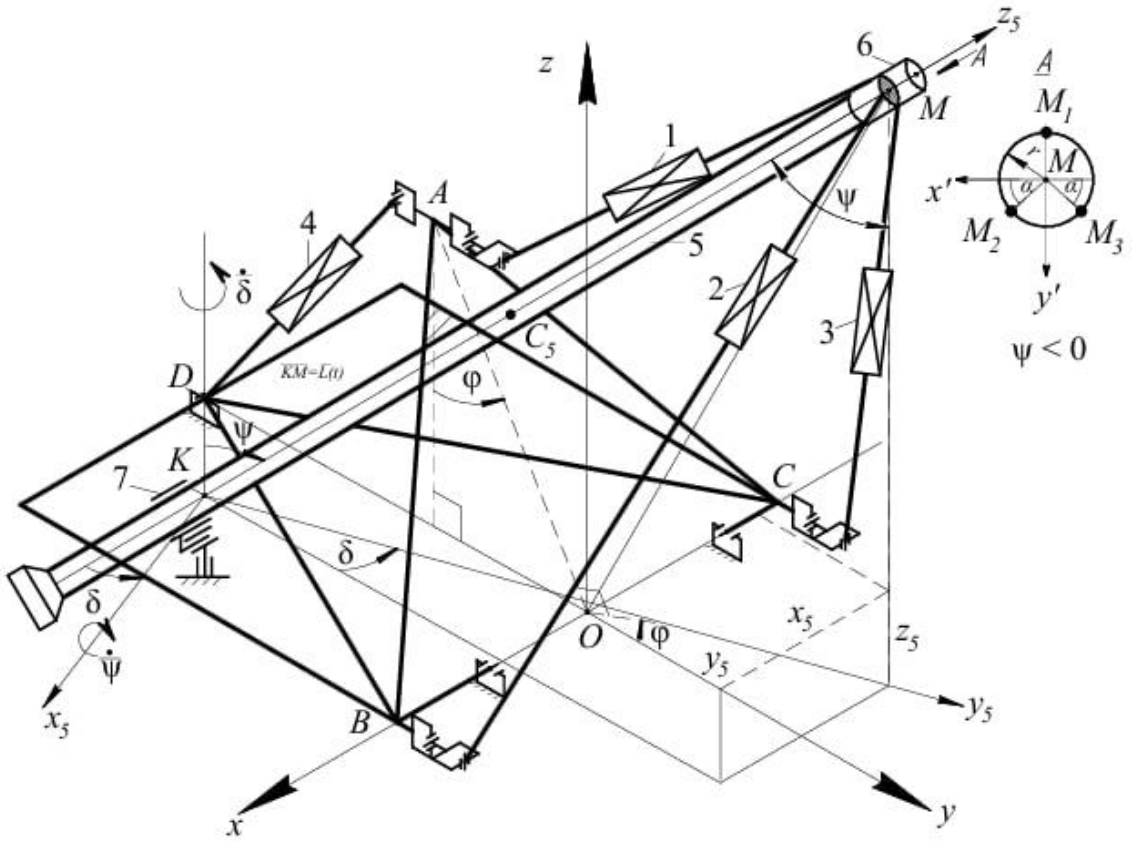


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора-трипод с дополнительной пассивной связью



Рис. 2. Манипулятор-трипод с дополнительной пассивной связью

Положение манипулятора в пространстве описывается обобщенными координатами [11]: длиной отрезка трубы переменной длины $q_1 = L$, углами $q_2 = \psi$, $q_3 = \delta$ и углом наклона поворотного основания манипулятора $q_4 = \varphi$.

Границы изменения угла поворота поворотного основания:

$$-32° \le \varphi \le 80°.$$

Кинематический анализ манипулятора

Задача структурного синтеза гибридных манипуляторов заключается в выборе и обосновании их основных конструктивных параметров: структуры, расположения шарниров на основании и выходном звене, длин и рабочего хода звеньев. Совокупность указанных параметров должна обеспечить обслуживание заданной рабочей зоны с заданной ориентацией выходного звена. В основе синтеза лежат решения прямой и обратной задач о положениях выходного звена [11].

Прямая задача заключается в определении положения в пространстве выходного звена робота по заданным значениям его обобщенных координат. Устанавливается связь обобщенных координат $L(t)$, $\psi(t)$, $\delta(t)$, $\varphi(t)$ с декартовыми координатами $x_M(t)$, $y_M(t)$, $z_M(t)$:

$$\begin{cases} x_M = L\sin\psi_5 \sin\delta_5, \\ y_M = -OD - L\sin\psi_5 \cos\delta_5, \\ z_M = -DK + L\cos\psi_5. \end{cases} \qquad (1)$$

Декартовым координатам x_M, y_M, z_M точки M выходного звена соответствуют разные углы φ.

Обратная задача сводится к нахождению значений обобщенных координат манипулятора для заданного положения в пространстве его выходного звена:

$$\begin{cases} L = \dfrac{z_M + DK}{\cos\psi_5}, \\ tg\delta_5 = -\dfrac{x_M}{y_M + OD}, \\ tg\psi_5 = -\dfrac{\sqrt{x_M^2 + (y_M + OD)^2}}{(z_M + DK)}. \end{cases} \qquad (2)$$

Для заданной технологической операции оптимальный угол поворота поворотного основания φ определяется решением задачи позиционирования.

Для гибридных манипуляторов решение обратной задачи кинематики часто зависит от геометрической структуры манипулятора [12].

Задача позиционирования выходного звена манипулятора сводится к решению оптимизационной задачи в связи с ненулевой маневренностью манипулятора. Число обобщенных координат равно 4, а координат точки выходного звена манипулятора 3. Для решения задачи позиционирования рассматриваемой конструкции манипулятора ставится дополнительное условие минимума энергозатрат на перемещения исполнительных звеньев манипулятора:

$$\Phi(\varphi) = C_1\left[l_{1k}(\varphi) - l_{10}\right]^2 + C_4\left[l_{4k}(\varphi) - l_{40}\right]^2, \qquad (3)$$

с конструктивными ограничениями на угол поворота поворотного основания

$$\varphi_{\min} \le \varphi^* \le \varphi_{\max}$$

где C_1, C_4 – весовые коэффициенты; $\varphi_{\min}$, $\varphi_{\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения угла поворота основания манипулятора – трипода; φ^* – оптимальное значение угла поворота.

Позиционирования выходного звена манипулятора состоит в перемещении его из начального состояния в заданное конечное положение.

Динамический анализ манипулятора

Механическая система манипулятора рассматривается как совокупность механизмов с жесткими звеньями. Четверное звено – электроцилиндр *AD* состоит из двух твердых тел, цилиндра и штока. Цилиндр вращается вокруг неподвижной оси, параллельной оси *Ox*, шток совершает сложное движение. Поворотное основание *ABC* рассматривается как твердое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси *Ox* с моментом инерции относительно оси вращения I_{OA}. Звено *L* рассматривается как отрезок переменной длины полой трубы, совершает пространственное движение: скользит вдоль направляющих и поворачивается в пространстве. С целью упрощения решения дифференциальных уравнений целесообразно реальный механизм заменить динамически эквивалентным. Массово-геометрические параметры манипулятора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры манипулятора

	Масса, кг	Момент инерции, кг·м^2	Координаты центра масс, м
Поворотное основание *ABC*	m_{BC} = 2,03	I_{OA} = 0,1 относительно оси *Ox*	x_C = 0 y_C = 0 z_C = 0,18
Корпус (электроцилиндр *AD*)	m_{41} = 3,68	I_{41} = 0,08 относительно оси *Ox*	
Шток (электроцилиндр *AD*)	m_{42} = 1,11	I_{42} = 0,02 относительно оси *Ox*	x_C = 0 y_C = 0 z_{C04} = 0,23
Полая труба *L*	m_5 = 6,28	$I_5 = I_{x5} = I_{y5}$ = 2.06 I_{z5} = 0	z_{C05}=1

Кинетическая энергия манипулятора имеет вид [13]:

$$T = \frac{1}{2}\left(0.17 - \frac{0.14}{\pi}\varphi\right)\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}\left[I_5 + m_5(L - L_0)^2\right](\dot{\delta}_5^2 \sin^2\psi_5 + \dot{\psi}_5^2) + \frac{1}{2}m_5\dot{L}^2. \quad (4)$$

Потенциальная энергия манипулятора [13]:

$$\Pi = \left[m_{41}l_{c1} + m_{42}(l_4 - l_{40})\right]g\cos\beta + m_5 g(L - L_0)\cos\psi + \frac{2}{3}m_{BC}gOA\cos\varphi, \quad (5)$$

где $\beta = \arcsin\dfrac{OD - OA\sin\varphi}{l_4}$.

Дифференциальные уравнения Лагранжа для обобщенных координат L, ψ, δ, φ запишем с учетом (4) и (5) в матричной форме:

$$A(q)\ddot{q} + B(q,\dot{q})\dot{q} + C(q) = D(q)F(t), \quad (6)$$

где $A(q)$, $B(q,\dot{q})$, $C(q)$, $D(t)$ – матрицы, зависящие от параметров механизма манипулятора, обобщенных координат и обобщенных скоростей, $F(t)$ – вектор сил, развиваемых приводами в степенях подвижности манипулятора.

Инерционная матрица $A(q)$ является диагональной и имеет вид:

$$A(q) = \begin{vmatrix} I_{пр}(\varphi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{5K} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{5K}\sin^2\psi_5 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где $I_{пр}(\varphi) = 0{,}17 - \dfrac{0{,}14}{\pi}\varphi$ – приведенный момент инерции [13], m_5 – масса полой трубы, $I_{5K} = \left[m_5(L - L_0)^2 + I_5\right]$ – момент инерции относительно точки *K*.

Матрица $B(q,q)$ параметров механизма, зависящая от обобщенный координат и обобщенных скоростей имеет вид:

$$B(q,\dot{q})=\begin{vmatrix} -\frac{0,07}{\pi}\dot{\varphi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_5(L-L_0)\dot{\psi}_5 & -m_5(L-L_0)\sin^2\psi_5\dot{\delta}_5 \\ 0 & m_5(L-L_0)\dot{\psi}_5 & m_5(L-L_0)\dot{L} & -I_{5K}\sin\psi_5\cos\psi_5\dot{\delta}_5 \\ 0 & m_5(L-L_0)\sin^2\psi_5\dot{\delta}_5 & I_{5K}\dot{\delta}_5\sin\psi_5\cos\psi_5 & m_5(L-L_0)\sin^2\psi_5\dot{L}+I_{5K}\dot{\psi}_5\sin\psi_5\cos\psi_5 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Матрица $C(q)$ учитывает потенциальные силы:

$$C(q)=\begin{vmatrix} -m_{42}g\dfrac{OAOD\cos\varphi\sqrt{l_4^2-\left(OD-OA\sin\varphi\right)^2}}{l_4^2}-\dfrac{1}{3}m_{BC}gOA\sin\varphi+ \\ +\left[m_{41}l_{c1}+m_{42}(l_4-l_{40})\right]\cdot\dfrac{\left(OD-OA\sin\varphi\right)OA\cos\varphi}{l_4\sqrt{l_4^2-\left(OD-OA\sin\varphi\right)^2}}g \\ m_5g\cos\psi \\ -m_5g(L-L_0)\sin\psi \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Матрица коэффициентов движущих сил $D(q)$:

$$D(q)=\begin{vmatrix} d_{11} & 0 & 0 & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 \end{vmatrix}, \quad (10)$$

элементы матрицы подробно рассмотрены в работе [12].

Проведем расчет движущих силы исполнительных звеньев манипулятора для обеспечения перемещения выходного звена из начальной точки $M_н$ в конечную точку $M_к$ ($x_{Mк}$ = 100 мм, $y_{Mк}$ = 700 мм, $z_{Mк}$ = 500 мм). Решением задачи позиционирования (2) находим обобщенные координаты L, ψ, δ через декартовы координаты x_M, y_M, z_M. Таким образом, начальной точке $M_н$ соответствуют значения обобщенных координат $\varphi_н$ = 0,22, $L_н$ = 1145 мм, $\psi_н$ = –1,01, $\delta_н$ = 0. Конечной точке $M_к$ соответствуют значения обобщенных координат $\varphi_к$ = –0,11, $L_к$= 1372 мм, $\psi_к$ = –1,1, $\delta_к$ = –0,16.

Полиноминальный закон выбирается в качестве закона изменения обобщенных координат (L, ψ, δ, φ):

$$q_s(t)=q_{sн}+(q_{sк}-q_{sн})\cdot\left(10-15\frac{t}{\tau}+6\frac{t^2}{\tau^2}\right)\frac{t^3}{\tau^3}, \quad (11)$$

где s – номер обобщенной координаты (1, 2, 3, 4); τ – конечное время перемещения выходного звена манипулятора. Конечное время перемещения равно 10 с.

Графики (рисунок 3) изменения движущих сил манипулятора в процессе перемещения выходного звена из начальной точки $M_н$ в конечную $M_к$ при решении уравнения (6) при подстановке коэффициентов (7)–(10).

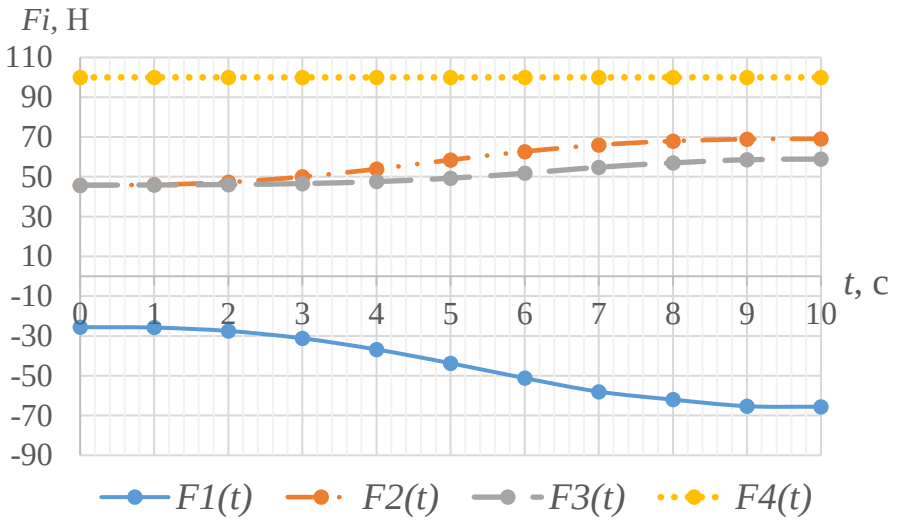


Рис. 3. График изменения движущих сил F_1, F_2, F_3, F_4 при перемещении выходного звена из начальной точки в конечную за конечное время τ

Исходя из рисунка 3 самым нагруженным является электроцилиндр *AD* (звено 4), максимальные значения движущих сил F_4 не превышают 100 Н. Решением прямой задачи динамики определены усилий в приводах 1,2,3,4, необходимые для обеспечения перемещения выходного звена манипулятора из одной точки в другую. Расчетные значения движущих сил приводов являются основой при подборе двигателей и зависят от вида выполняемых манипулятором технологических операции [14], внешних нагрузок и ограничений на быстродействие [15].

Заключение

Представленная кинематическая и динамическая модель манипулятора-трипода с дополнительной связью позволяют получить адекватное математическое описание манипулятора. В статье получены значения движущих сил для манипулятора-трипода с дополнительной связью, что позволит обоснованно использовать методы аналитического программирования входных управляющих сигналов приводных двигателей.

Исследование выполнено за счет средств программы развития ВолгГТУ «Приоритет 2030», в рамках научного проекта №25/639-24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пономаренко М. В., Андреев Ю.С. Автоматизированные системы управления производством с точки зрения гибких производственных систем. Современное машиностроение. Наука и образование. 2023. С. 314-323.

[2] Petko, M., Gac, K., Gora, G., Karpiel, G., Ochonski, J., Kobus, K. (2016). CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling. Mechatronics, No. 37, pp. 89-99.

[3] Lai, Y., Liao, C., Chao, Z. Inverse kinematics for a novel hybrid parallel–serial five-axis machine tool. 2018. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. pp. 63-79.

[4] Xu, Y., Yang, F., Mei, Y. Kinematic, Workspace and Force Analysis of A Five-DOF Hybrid Manipulator R(2RPR)R/SP+RR. 2022. Chinese Journal of Mechanical Engineering. pp. 122-134.

[5] Wang, L. Fang, Y., Zhang, D. Design of 4-DOF hybrid parallel robots with an integrated three-fingered robot end effector. Mechanism and Machine Theory. 2023. pp. 1-21.

[6] Zhao, Y., Mei, J., Jin, Y., Niu, W. A new hierarchical approach for the optimal design of a 5-dof hybrid serial-parallel kinematic machine. Mechanism and Machine Theory. 2021. No.156, pp.104-116.

[7] Носова Н.Ю., Глазунов В.А., Палочкин С.В., Терехова А.Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. С. 34-40.

[8] Chen, Y., Zhang, Xi., Huang, Y.,Wu Y., Ota J. Kinematics optimization of a novel 7-DOF redundant manipulator. Robotics and Autonomous Systems (2023). pp. 1-16.

[9] Caccavale, F., Siciliano, B., Villani, L. The Tricept robot: dynamics and impedance control .Transactions on Mechatronics. 2013. pp. 263-268.

[10] Жога В.В., Нелюбова А.В., Шаронов Н.Г., Чернышев В.В. П. м. 218886 Российская Федерация, МПК B66C 23/00 Манипулятор-трипод. ФГБОУ ВО ВолгГТУ. 2023.

[11] Жога В.В., Нелюбова А.В. Кинематический синтез аналитических законов перемещений исполнительных приводов манипулятора параллельно-последовательной структуры с дополнительной связью. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. С. 29-36.

[12] Воробьева Н.С., Жога В.В., Несмиянов И.А. Отслеживание приводами манипулятора параллельно-последовательной структуры программных перемещений рабочего органа. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 2. С. 154–165.

[13] Нелюбова А.В., Вершинина И.П. Динамика управляемого движения манипулятора-трипода с дополнительной связью. Известия ВолгГТУ. 2025. С. 61-66.
[14] Воробьева Н.С., Дяшкин А.В., Дяшкин-Титов В.В. Методы кинематического синтеза алгоритмов управления манипулятором-триподом. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2(58). С.384–396.
[15] Smirnov A.S., Bulov S.A., Smolnikov B.A. Numerical Simulation of Nonlinear Oscillation Modes of a Three-Link Manipulator. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 45-57.

A.V. Nelyubova, V.V. Zhoga

ANALYSIS OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF A MANIPULATOR-TRIPOD WITH PASSIVE LINK

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

The article considers the kinematic scheme of a manipulator-tripod with an additional passive link in the form of a tube, which allows the actuators to be unloaded from bending moments during the loading of the working body and to supply energy or a working mixture to the working body of the manipulator. The work is devoted to the synthesis of movements of the executive mechanisms of a tripod manipulator with an additional passive link. As a result of the work, the driving forces of the manipulator were determined when moving the output link from point to point.

Key words: manipulator-tripod, passive link, kinematic analysis, dynamic analysis.

The research was carried out at the expense of the funds of the development program of VSTU ″Priority 2030″, within the framework of scientific project No. 25/639-24.

REFERENCES

[1] Ponomarenko M.V., Andreev Yu.S. Automated production management systems from the point of view of flexible production systems. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2023. pp. 314-323. (rus.)

[2] Petko, M., Gac, K., Gora, G., Karpiel, G., Ochonski, J., Kobus, K. (2016). CNC system of the 5-axis hybrid robot for milling. Mechatronics, No. 37, pp. 89-99.
[3] Lai, Y., Liao, C., Chao, Z. Inverse kinematics for a novel hybrid parallel–serial five-axis machine tool. 2018. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. pp. 63-79.
[4] Xu, Y., Yang, F., Mei, Y. Kinematic, Workspace and Force Analysis of A Five-DOF Hybrid Manipulator R(2RPR)R/SP+RR. 2022. Chinese Journal of Mechanical Engineering. pp.122-134.
[5] Wang, L. Fang, Y., Zhang, D. Design of 4-DOF hybrid parallel robots with an integrated three-fingered robot end effector. Mechanism and Machine Theory, 2023, pp. 1-21.
[6] Zhao, Y., Mei, J., Jin, Y., Niu, W. A new hierarchical approach for the optimal design of a 5-dof hybrid serial-parallel kinematic machine. Mechanism and Machine Theory. 2021.156, pp.104-116.
[7] Nosova N.Y., Glazunov V.A., Palochkin S.V., Terekhova A.N. Synthesis of mechanisms of parallel structure with kinematic interchange. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2014. Vol. 43, No. 5. pp. 378-383.
[8] Chen, Y., Zhang, Xi., Huang, Y.,Wu Y., Ota J. Kinematics optimization of a novel 7-DOF redundant manipulator. Robotics and Autonomous Systems (2023). pp. 1-16.
[9] Caccavale, F., Siciliano, B., Villani, L. The Tricept robot: dynamics and impedance control .Transactions on Mechatronics. 2013. pp. 263-268.
[10] Zhoga V.V., Nelyubova A.V., Sharonov N.G., Chernyshev V.V. Manipulator tripod. U. M. 218886 Russian Federation. Volgograd State Technical University. 2023.
[11] Zhoga V.V., Nelyubova A.V. Kinematic synthesis of analytical laws of the actuator displacement of a manipulator with the parallel-sequential structure and additional coupling. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2024. No. 9. pp. 29-36.
[12] Vorob'eva, N.S., Nesmiyanov I.A., Zhoga V.V. Program Displacement Tracing of Executive Devices by the Manipulator Drives of Parallel-Sequential Structures. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. Vol. 58, No. 2. pp. 305-316.
[13] Nelyubova A.V., Vershinina I.P. Dynamics controlled movement of the manipulator-tripod with additional link. Izvestia VSTU. 2025. pp. 61-66.
[14] Vorob'eva N.S., Djashkin A.V., Djashkin-Titov V.V., Ivanov A.G., Fomin S.D. Methods of kinematic synthesis of manipulator-tripod control algorithms. Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education. 2020. No. 2(58). pp. 384–396.
[15] Smirnov A.S., Bulov S.A., Smolnikov B.A. Numerical Simulation of Nonlinear Oscillation Modes of a Three-Link Manipulator. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 45-57.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.1.051
doi:10.18720/SPBPU/2/id-131

А.Н. Попов[1], М.Н. Полищук[2], Д.В. Решетов[3], В.В. Закатов[4]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ УДАРНОЙ МАШИНЫ С МАЯТНИКОВЫМ ИНЕРЦИОННЫМ БЛОКОМ



[1]Аркадий Николаевич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)947-3582, E-mail: porka.n@mail.ru



[2]Михаил Нусимович Полищук,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)242-2526, E-mail: polishchuck@mail.ru



[3]Дмитрий Валентинович Решетов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)876-95-81, E-mail: pvclol@yandex.ru



[4]Владимир Владиславович Закатов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (952)646-81-30, E-mail: leo021201@mail

Аннотация

Построена математическая модель горизонтального ударного стенда с маятниковым инерционным блоком. Представлены результаты моделирования «траекторий» движения каретки и инерционного блока стенда. Подобраны параметры основных элементов подвески, демпферов и пневмопружин, снижающие динамические нагрузки на цеховое оборудование и обеспечивающие апериодический переходный процесс затухания колебаний инерционного блока после воспроизведения удара.

Предложена последовательность настройки стенда для реализации требуемых параметров ударного импульса (пикового значения и длительности). В основу настройки положено задание требуемого начального давления воздуха в ресивере (давления накачки) и подбор формирователя импульсов по критерию жесткости из комплекта поставки.

Адекватность разработанной математической модели подтверждена соответствием полученных с ее помощью результатов и данных экспериментов, проведенных на стенде СОУГ2000.

Ключевые слова: ударные испытания, горизонтальный стенд, маятниковый инерционный блок, математическая модель.

Введение

Значительные приводные усилия и большие ударные нагрузки в горизонтальных ударных машинах большой грузоподъемности вызывают реактивные силы, которые воспринимаются несущей конструкцией стенда и передаются на фундамент, цеховой пол и здание [1-4]. Вместе с тем, в технических характеристиках, которые приводят производители стендов, реактивные силы, как правило, не указываются, а требования к монтажным поверхностям не приводятся. Важно, что монтаж ударного стенда на цеховый пол без учета динамической нагрузки, возникающей при его работе, может привести к негативному воздействию не только на окружающее оборудование, но и на все здание [4, 5]. Потребители стендов для уменьшения такого воздействия используют массивные фундаменты, а в строительных нормах и правилах (СНиП) в РФ есть рекомендации по требованиям к фундаментам машин с динамическими нагрузками [6, 7]. При этом одним из основных требований к основаниям стендов является предельная амплитуда их колебаний, которая, в зависимости от типа оборудования, не должна превышать 0,05…0,3 мм. Уменьшение динамического воздействия стендов на здания и цеховое оборудование достигается за счет различных схемных решений горизонтальных машин [8].

Одним из успешных подходов, с точки зрения уменьшения динамического воздействия на здания и находящееся в нем оборудование, считается реализация маятниковой схемы. В работе маятниковая схема анализируется применительно к подвеске инерционного блока ударного стенда. Предварительные оценки, выполненные на этапе разработки конструкции стенда, дали положительный результат. Окончательную оценку целесообразности маятниковой схемы можно дать только по результатам исследования математической модели ударной машины с учетом фактических конструктивных параметров и результатов натурных экспериментов.

В работе представлена математическая модель горизонтального испытательного стенда двунаправленного удара типа СОУГ2000 и выполнен ее анализ [9].

Методы

Компоновочная схема ударной машины стенда СОУГ2000 показана на рис. 1. Расчетная схема ударной машины, выполненная на основе анализа конструкции и компоновочной схемы, представлена на рис. 2.

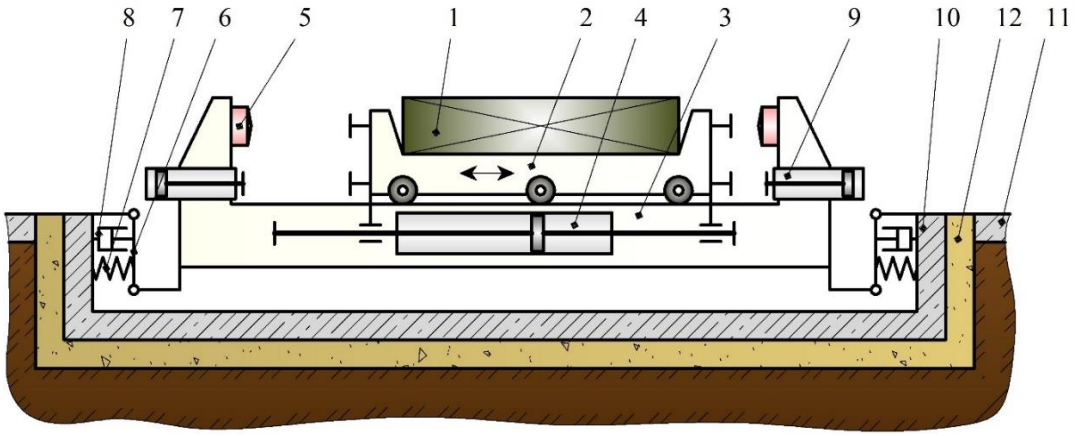


Рис. 1. Компоновочная схема ударной машины стенда СОУГ2000: 1 – объект испытаний; 2 – каретка; 3 – инерционный блок; 4 – разгонный пневмоцилиндр; 5 – формирователь импульса; 6 – серьга параллелограммного механизма; 7 – пневмопружина; 8 – пневмогидравлический демпфер; 9 – пневмоцилиндр позиционирования каретки; 10 – фундамент; 11 – цеховый пол; 12 – песчаная засыпка

Математическая модель ударной машины с компоновкой инерционного блока в виде маятника имеет две степени свободы. В качестве независимых обобщенных координат в ней используются угол ψ качания инерционного блока и линейное перемещение *x* каретки относительно инерционного блока.

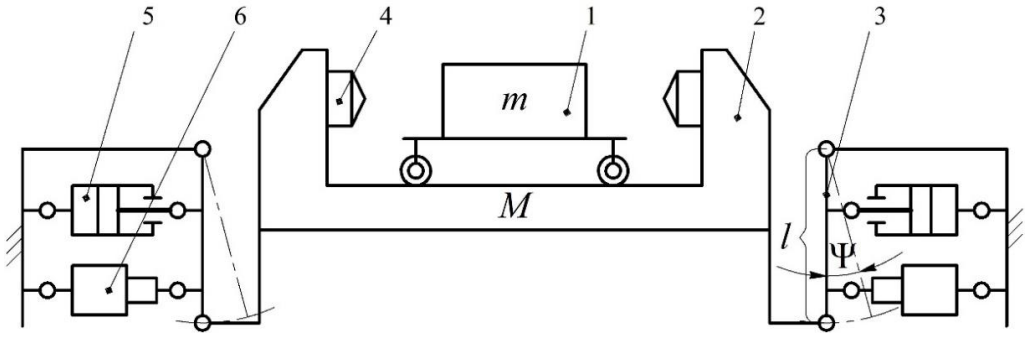


Рис. 2. Расчетная схема горизонтального стенда с маятниковым инерционным блоком: 1 – каретка с изделием; 2 – инерционный блок; 3 – серьга механизма параллелограмма; 4 – формирователь импульса; 5 – пневмопружина; 6 – демпфер

Уравнения динамики системы в форме уравнений Лагранжа 2-го рода имеют вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \dfrac{\partial T}{\partial x} = -\dfrac{\partial \Pi}{\partial x} - \dfrac{\partial R}{\partial \dot{x}} + Q_x \\ \dfrac{d}{dt}\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} - \dfrac{\partial T}{\partial \psi} = -\dfrac{\partial \Pi}{\partial \psi} - \dfrac{\partial R}{\partial \dot{\psi}} + Q_\psi \end{cases}, \tag{1}$$

где T – кинетическая энергия системы; П – потенциальная энергия системы; R – диссипативная функция; Q_x, Q_ψ – обобщенные силы по соответствующим координатам.

Выражение для кинетической энергии системы

$$T = \frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}\left(m + M\right) l^2 \dot{\psi}^2 - ml\dot{x}\dot{\psi}\cos\psi, \tag{2}$$

где m – масса каретки с изделием; M – масса инерционного блока, l – длина серьги подвески.

Потенциальная энергия системы зависит от перемещения инерционного блока по вертикали и деформации формирователя

$$\Pi = \frac{1}{2} c\left(x - x_f\right)^2 + \left(m + M\right) gl\left(1 - \cos\psi\right), \tag{3}$$

где c – жесткость гиперупругого формирователя; x_f – расстояние между кареткой и формирователем в начальном положении (до начала разгона каретки); g – ускорение свободного падения.

Сила упругости формирователя действует только на этапе соударения каретки и инерционного блока, поэтому первое слагаемое в (3) «присутствует» только при условии, что $x > x_f$.

Диссипативная функция имеет две составляющие, одна из которых соответствует этапу сжатия демпферов подвески, а вторая – этапу отбоя [10, 11]

$$R = \frac{1}{2} n_a \left(\beta_1 + \beta_2\right)\left(l\dot{\psi}\cos\psi\right)^2, \tag{4}$$

где n_a – количество демпферов с каждой стороны стенда; β_1 – коэффициент сопротивления демпфера для режима сжатия, а β_2 – для режима отбоя.

Обобщенные силы определяются на основе выражения для вариации работы непотенциальных сил, как коэффициенты при вариациях обобщенных координат

$$\begin{aligned} \delta A &= \left(F_r - F_t - F_b\right)\delta x - \left(F_s + F_{ts}\right) l\cos\psi\,\delta\psi, \\ Q_x &= F_r - F_t - F_b, \quad Q_\psi = -\left(F_s + F_{ts}\right) l\cos\psi, \end{aligned} \tag{5}$$

где F_r – усилие разгона каретки; F_t – сила трения качения каретки по направляющей; F_b – сила сопротивления от тормозов; F_s – сила сопротивления пневмопружин подвески; F_{ts} – сила трения в цилиндрах пневмопружин.

Сила трения качения каретки $F_t = f_t mg \cdot \mathrm{sign}(\dot{x})$, где f_t – коэффициент трения качения. Сила трения в цилиндрах пневмопружин $F_{ts} = f_{ts} \cdot \mathrm{sign}(\dot{\psi}) n_s$, где f_{ts} – коэффициент трения скольжения, n_s – число пневмопружин [12]. Тормоза каретки включаются при отскоке, после изменения знака скорости перемещения каретки, поэтому сила сопротивления от тормозов

$$F_b = \begin{cases} 2n_b f_f N_b, & x > x_b;\ \dot{x} < 0 \\ 0, & \dot{x} > 0 \quad \text{или} \quad x < x_b \end{cases}, \tag{6}$$

где n_b – число пар тормозных колодок; f_f – коэффициент трения пары «стальная лента – материал тормозных колодок»; N_b – усилие прижима тормозной колодки; x_b – расстояние от начального положения каретки до места расположения тормозов.

При определении реакции пневмопружин считаем, что в начальном положении поршни пневмоцилиндров каждой пружины находятся в среднем положении, полости цилиндров замкнуты и давление в них равно атмосферному. При движении инерционного блока давление p_{s1} в одной из полостей каждого цилиндра увеличивается из-за уменьшения ее объема и сжатия воздуха, а давление p_{s2} в другой полости уменьшается, поэтому усилие сопротивления одной пневмопружины составляет

$$F_{s1} = (p_{s1} - p_{s2}) S_s, \tag{7}$$

где S_s – площадь поршня пневмоцилиндра подвески за вычетом площади штока.

Значения p_{s1}, p_{s2} получим в предположении об адиабатическом характере процесса [13, 14]

$$p_{s1} = p_a \left(\frac{L/2}{L/2 - l\sin\psi} \right)^{\gamma}, \quad p_{s2} = p_a \left(\frac{L/2}{L/2 + l\sin\psi} \right)^{\gamma}, \tag{8}$$

где p_a – атмосферное давление; L – ход поршня, γ – показатель адиабаты.

Тогда общая сила сопротивления от всех пневмопружин при их количестве n_s составит

$$F_s = p_a \left(\left[1 / \left(1 - \frac{2l\sin\psi}{L} \right) \right]^{\gamma} - \left[1 / \left(1 + \frac{2l\sin\psi}{L} \right) \right]^{\gamma} \right) S_s n_s. \tag{9}$$

Усилие разгона каретки зависит от того, какую скорость она должна приобрести в момент соударения с формирователем ударного импульса [15, 16]. Скорость соударения определяется давлением в ресивере. Сила F_r зависит от положения каретки. В начальный момент каретка жестко связана со штоками цилиндров разгона и поэтому перемещается вместе с ними. При достижении упора ($x = x_{r1}$) эта связь разрывается, далее каретка движется по инерции до столкновения с формирователем импульса ($x = x_{r2}$):

$$F_r = \begin{cases} (p_{r1} - p_{r2}) S_r n_r, & 0 \le x \le x_{r1} \\ 0, & x_{r1} < x \le x_{r2} \end{cases}, \qquad (10)$$

где p_{r1}, p_{r2} – давление воздуха в поршневой и штоковой полостях цилиндра разгона; $S_r = \pi(D_r^2 - d_r^2)/4$ – площадь поршня одного цилиндра; D_r – диаметр поршня пневмоцилиндра разгона; d_r – диаметр штока; n_r – количество цилиндров разгона.

Давление p_{r1} в поршневой полости обусловливается сжатым воздухом, поступающим из ресивера.

Ресивер через быстродействующий клапан нагнетает воздух в рукава, с которыми соединены цилиндры разгона. При этом давление p_{r1} зависит от массового расхода G_1 воздуха, поступающего через рукав в цилиндр [17-20]

$$\dot{p}_{r1} = \begin{cases} \dfrac{\gamma}{x}\left(\dfrac{G_1 RT}{S_r} - p_{r1}\dot{x}\right), & x \le x_{r1} \\ 0, & x > x_{r1} \end{cases}, \qquad (11)$$

где R – газовая постоянная воздуха; T – температура воздуха.

Массовый расход G_1 определяется выражением [8]

$$G_1 = \begin{cases} \mu f_c p \sqrt{\dfrac{0,469}{RT}}, & p_{r1}/p < 0,528, \\ \mu f_c p \sqrt{\dfrac{2\gamma}{(\gamma-1)RT}\left((p_{r1}/p)^{\frac{2}{\gamma}} - (p_{r1}/p)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}, & 0,528 < p_{r1}/p < 1, \\ 0, & p_{r1}/p \ge 1 \end{cases} \qquad (12)$$

где μ – приведенный коэффициент расхода; $f_c = \pi d_c^2/4$ – площадь проходного сечения отверстия, через которое поступает воздух из рукава в цилиндр; d_c – диаметр впускного отверстия пневмоцилиндра разгона; p – давление в рукаве.

Чтобы определить значение G_1, нужно знать давление p в рукаве (для обоих цилиндров считаем, что оно одинаковое), которое зависит еще и от массового расхода G воздуха из ресивера

$$G = \begin{cases} \dfrac{1}{2}\mu f_k P \sqrt{\dfrac{0,469}{RT}}, & p/P < 0,528, \\ \dfrac{1}{2}\mu f_k P \sqrt{\dfrac{2\gamma}{(\gamma-1)RT}\left((p/P)^{\frac{2}{\gamma}} - (p/P)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}, & 0,528 < p/P < 1, \\ 0, & p/P \ge 1 \end{cases} \qquad (13)$$

где P – давление в ресивере, $f_k = \pi d_k^2/4$ – площадь проходного сечения отверстия, через которое поступает воздух из ресивера в рукава; d_k – диаметр впускного отверстия.

Давление в ресивере зависит от удельного объема воздуха [11]

$$Pv_r^{\gamma} = \text{const}, \quad P = P_0\left(\frac{m_r}{m_{r0}}\right)^{\gamma}, \tag{14}$$

где $v_r = V_r/m_r$; $V_r = \pi\ d_r^2 L_r/4$ – объем ресивера; d_r – внутренний диаметр ресивера; L_r – длина ресивера; m_r – масса воздуха в ресивере при давлении P; m_{r0} – масса воздуха в ресивере при начальном давлении P_0.

Масса воздуха в ресивере

$$m_r = m_{r0} - \int_0^t G(t)dt, \quad m_{r0} = \rho V_r, \tag{15}$$

где ρ – плотность воздуха при давлении P_0.

Учитывая связь плотности газа с давлением [11], имеем

$$\frac{\rho}{\rho_a} = \frac{P_0}{p_a} \quad \Rightarrow \quad \rho = \rho_a \frac{P_0}{p_a}, \tag{16}$$

где ρ_a – плотность воздуха при нормальных условиях (атмосферном давлении p_a).

Следовательно,

$$m_{r0} = \rho_a V_r \frac{P_0}{p_a}, \quad m_r = m_{r0} - \int_0^t G(t)dt. \tag{17}$$

Окончательное выражение для текущего давления воздуха в ресивере

$$P = P_0\left(1 - \frac{\int_0^t G(t)dt}{m_{r0}}\right)^{\gamma}. \tag{18}$$

Зная выражения для массовых расходов G и G_1, можно определить давление p в рукаве. В начальный момент $p = p_a$. Далее воздух поступает в рукав из ресивера (объемный расход $+G$) и вытекает в цилиндры разгона (объемный расход $-2G_1$). Поэтому

$$p = p_a\left(\frac{m_s}{m_{s0}}\right)^{\gamma}, \quad m_s = m_{s0} + \int_0^t \big(G(t) - 2G_1(t)\big)dt, \tag{19}$$

где $m_{s0} = \rho_a V_s$ – масса воздуха в рукаве в начальный момент; $V_s = \pi d_s^2/4 \cdot L_s$ – объем рукава; d_s – диаметр рукава; L_s – длина рукава; m_s – масса воздуха в рукаве в момент t.

После завершения удара (на этапе отскока) клапан перекрывает доступ воздуха из ресивера в рукава, воздух из рукавов и из поршневых полостей цилиндров разгона сбрасывается в атмосферу.

Выражения (11)…(19) представляют собой систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, которые позволяют численно определить давление p_{r1} в полостях цилиндров, в которые подается воздух из рукавов при разгоне, по заданному начальному давлению (давлению накачки) ресивера P_0.

Другие полости цилиндров разгона соединены с атмосферой. Давления p_{r2} в этих полостях определяются по аналогии с (11), (12) [21]:

$$\dot{p}_{r2} = \begin{cases} \dfrac{\gamma}{L_c - x}\left(\dfrac{-G_2 RT}{S_r} + p_{r2}\dot{x}\right), & x \le x_{r1}, \\ 0, \quad x > x_{r1} \end{cases}$$

$$G_2 = \begin{cases} \mu f_c p_{r2}\sqrt{\dfrac{0,469}{RT}}, & p_a / p_{r2} < 0,528, \\ \mu f_c p_{r2}\sqrt{\dfrac{2\gamma}{(\gamma-1)RT}\left(\left(p_a / p_{r2}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(p_a / p_{r2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}, & 0,528 < p_a / p_{r2} < 1, \\ 0, \quad p_a / p_{r2} \ge 1 \end{cases} \qquad (20)$$

где L_c – ход поршня приводного цилиндра; G_2 – массовый расход воздуха, уходящего из каждой полости в атмосферу.

В результате уравнения движения каретки и инерционного блока принимают следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} - ml\ddot{\psi}\cos\psi + ml\dot{\psi}^2\sin\psi + f_t mg\cdot\operatorname{sign}(\dot{x}) = F_r + F_f + F_b \\ (m+M)l\ddot{\psi} - m\ddot{x}\cos\psi + (m+M)g\sin\psi + (\beta_1+\beta_2)n_a\dot{\psi}l\cos^2\psi = -F_s\cos\psi \end{cases}. \qquad (21)$$

Результаты

Система (21) нелинейная и может быть исследована с помощью программных средств *Simulink*. На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования «траекторий» движения каретки и инерционного блока для одного из режимов работы исследуемого стенда.

Ударный цикл начинается разгоном каретки с ускорением (этап 1 на рисунке 3). В момент времени t = 0 каретка находится в начальном положении x = 0,5 м. Этап разгона завершается при t = 0,55 с, x = 1,5 м, когда каретка отсоединяется от штоков пневмоцилиндров разгона. Далее каретка движется по инерции (этап 2) до столкновения с формирователем: t = 0,58 с, x = 1,9 м. После воспроизведения ударного импульса (этап 3,

0,58 < t < 0,62 с) происходит отскок с торможением (этап 4) до полной остановки каретки на инерционном блоке: t = 0,85 с, x = 1,58 м.

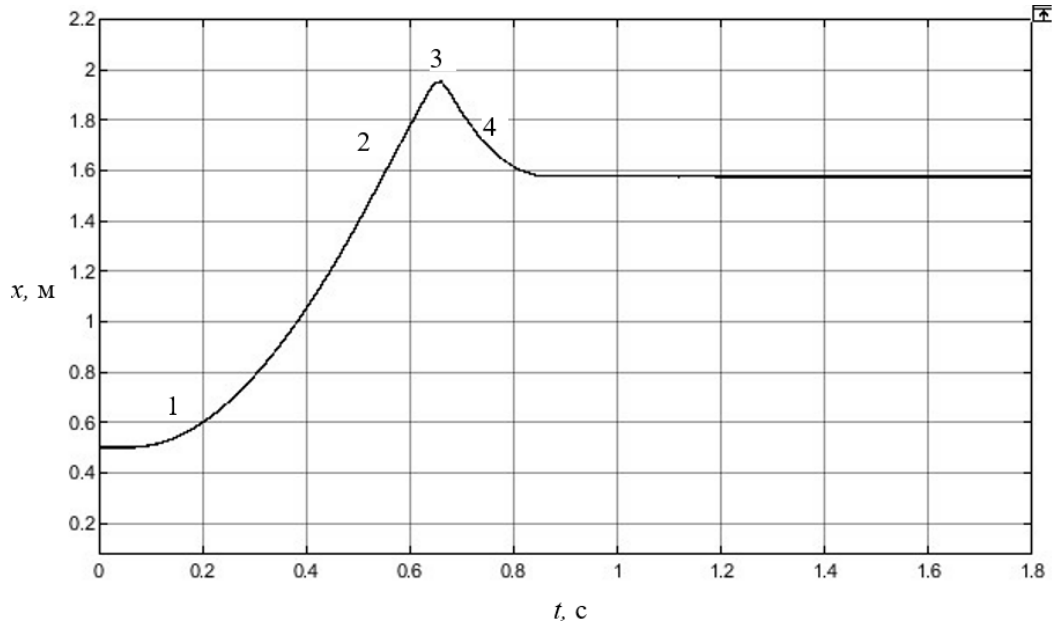


Рис. 3. «Траектория» движения каретки: 1 – разгон; 2 – движение по инерции; 3 – удар; 4 – отскок и торможение

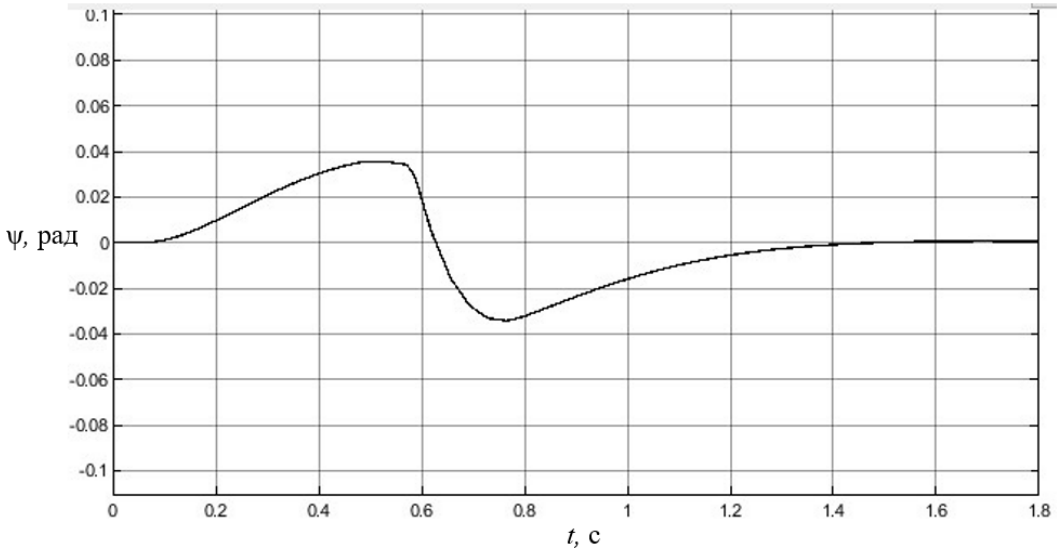


Рис. 4. «Траектория» движения инерционного блока

Инерционный блок в начале цикла также начинает перемещаться за счет реактивных сил, потом под действием сил упругости пневмопружин двигается в обратном направлении, тормозится и останавливается. На этом ударный цикл завершается. Качание инерционного блока происходит достаточно плавно, без острых пиков, что объясняется его правильно подобранной массой, демпфированием амортизаторов-демпферов и действием пневмопружин. Адекватный подбор характеристик демпферов и их количества обеспечивают минимальное количество качательных

движений, а пневмопружины реализуют плавный возврат инерционного блока в начальное положение. При этом общий угол ψ качания инерционного блока составляет 0,07 рад или 4 градуса. Относительно начального положения подъем инерционного блока по вертикали в этом режиме составляет 2,2 мм.

Адекватность полученной математической модели была подтверждена при экспериментальных исследованиях стенда СОУГ2000. На рис. 5, *а*) приведена осциллограмма ускорения каретки в режиме ударного импульса с пиковым значением $39g$ и длительности 19 мс, на рис. 5, *b*) – импульс, полученный при моделировании.

a) *b*)

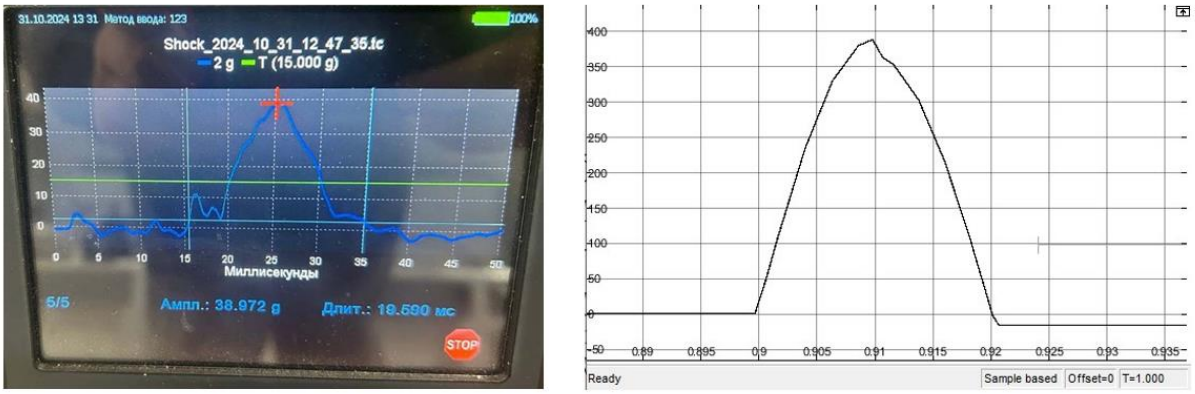


Рис. 5. Ударный импульс ускорения: *а*) эксперимент; *б*) модель

Обсуждение

Построенная математическая модель горизонтального ударного стенда с маятниковым инерционным блоком позволяет в дальнейшем решить ряд важных вопросов при эксплуатации стенда СОУГ2000:

– оценить скорость каретки перед ударом при заданном давлении накачки ресивера;

– определить давление накачки ресивера для получения требуемой скорости каретки в момент ее соударения с формирователем ударного импульса;

– промоделировать удар и отскок каретки и инерционного блока после удара;

– рассчитать давление в пневмоцилиндрах подвески инерционного блока;

– рассчитать необходимую силу прижима тормозных колодок каретки для ее остановки после удара;

– промоделировать деформацию формирователя импульсов.

Результаты подобных исследований дают возможность выбрать оптимальные режимы работы и параметры элементов стенда и определить

главные характеристики: воспроизводимые пиковые значения и длительности ударных импульсов, а также их форму.

Заключение

Построена математическая модель процесса воспроизведения ударного импульса на горизонтальном пневматическом ударном стенде с маятниковым инерционным блоком. Результатами экспериментальных исследований подтверждена адекватность модели. В результате появилась возможность использования модели для настройки стенда на различные технологические режимы испытаний с предварительной оценкой и рекомендациями для выбора основных параметров, реализующих данные режимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] А.Н. Попов, М.Н. Полищук, Н.Е. Пуленец, А.К. Васильев. Алгоритм наладки пневматических ударных стендов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2017. – № 6. – С. 503-514. DOI: 10.1872/MMF-2017-44.

[2] Основания и фундаменты при сложных силовых воздействиях (опыты) : монография для научных работников, аспирантов и магистрантов строительного профиля: в 3 т. / В.В. Леденёв. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ»,– 2017. – 400 с.

[3] СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. ФЦС. Москва, 2016. – 125 с.

[4] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.

[5] Donaldson B.K. Introduction to structural dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 576 p.

[6] СП 26.13330. Свод правил. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. ФЦС. Москва, 2012. – 66 с.

[7] СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками/ Госстрой СССЗ.– Москва: ЦИПТ Госстроя СССР, 1988. – 32 с.

[8] А.Н. Попов, М.Н. Полищук, Д.В. Решетов. Анализ компоновок горизонтальных ударных стендов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 410-421. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-111. – EDN TDIXLF.

[9] Официальный сайт компании «Дельтамэк» [Электронный ресурс]. URL: https://www.deltamec.ru/ (дата обращения: 15.03.2025).

[10] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, pp. 86-96, 2022.
[11] Polishchuck M.N, Popov A.N, Vasiliev A.K, Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, 2021, pp. 219-230.
[12] Bhushan B. Introduction to tribology. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2013. – 711 p. – DOI: 10.1002/9781118403259.
[13] Герц. Е.В., Крейнин Г.В. Библиотека Конструктора. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975 – 274 с.
[14] Герц Е.В. Пневматические приводы. Теория и расчет. М., «Машиностроение», 1969. – 359 с.
[15] Каразин В.И., Хлебосолов И.О., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Андриенко П.А., Терешин В.А., Хисамов А.В. Методы и средства лабораторного воспроизведения ускорения. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023 – 168 с.
[16] Елагина, А. К. Ударный стенд с повышенными энергетическими характеристиками / А. К. Елагина, И. О. Хлебосолов // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 70-72. – EDN ENGEGD.
[17] Елисеев, В. В. Спасательные линеметы: математическое моделирование и экспериментальные исследования / В. В. Елисеев, В. А. Пискунов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1-2. – С. 205-208. – EDN WLWYWD.
[18] Gustavo Koury Costa. Modelling Air Flow through Pneumatic Valves: A Brief Review with an Experimental Case Study, MDPI, Eng 2023, 4, 2601–2614. doi.org/10.3390/eng4040149.
[19] Barycki J., Ganczarek M., Kollek W., Mikulczynski T., Samsonowicz Z. Performances of high-speed pneumatic drive with self-acting impulse valve // Mechanism and Machine Theory. – 2004. – pp. 657–663. – DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00089-2.
[20] Daigle M. J., Goebel K. A model-based prognostics approach applied to pneumatic valves // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2011. – 16 p.
[21] Jiménez M., Kurmyshev E., Castañeda C. E. Experimental study of double-acting pneumatic cylinder // Experimental Techniques, 44, №3 – 2020.– pp. 355–367.

A.N. Popov, M.N. Polishchuck, D.V. Reshetov, V.V. Zakatov

MATHEMATICAL MODEL OF HORIZONTAL BUMP TESTING MACHINE WITH PENDULUM INERTIAL MASS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A mathematical model of a horizontal bump testing machine with a pendulum inertial mass has been developed. The simulation results of the "trajectories" of the carriage and the inertial mass of the machine are presented. The parameters of the main suspension elements of the machine (dampers and pneumatic springs) were selected to reduce dynamic loads on workshop equipment and ensure an aperiodic transient damping process of the inertial mass oscillations after a single bump reproduction.

A tuning sequence for the machine is proposed to achieve the required shock pulse parameters (peak value and duration). The tuning is based on setting the required initial air pressure in the receiver (precharge pressure) and selecting the shock programmers based on stiffness criteria from the supplied set.

The adequacy of the developed mathematical model is confirmed by the agreement between the simulation results and the experimental data obtained from the SOUG2000 testing.

Key words: bump testing, horizontal bump machine, pendulum inertial mass, mathematical model.

REFERENCES

[1] A.N. Popov, M.N. Polishchuck, N.E. Pulenec, A.K. Vasilev/ Adjustment logic for pneumatic shock mashines /. Modern mechanical engineering. Science and education. 2017. № 6. Pp. 503-514. DOI: 10.1872/MMF-2017-44.

[2] Foundations and Footings under Complex Loading Conditions (Experiments): Monograph for Research Workers, Postgraduates, and Master's Students in the Field of Construction: in 3 volumes / V.V. Ledenev. – Tambov: Publishing House of FGBU VO "TGTU", 2017. – 400 p.

[3] SP 20.13330.2016. Code of Rules. Loads and Impacts. FCS. Moscow, 2016. – 125 p.

[4] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.

[5] Donaldson B. K. Introduction to Structural Dynamics. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 576 p.

[6] SP 26.13330. Code of Rules. Foundations of Machines with Dynamic Loads. FCS. Moscow, 2012. – 66 p.

[7] SNIP 2.02.05-87. Foundations of Machines with Dynamic Loads / State

Construction Committee of the USSR. – Moscow: CIPT of the State Construction Committee of the USSR, 1988. – 32 p.
[8] A.N. Popov, M.N. Polishchuck, D.V. Reshetov. Analysis of Horizontal Impact Stand Configurations // Modern Mechanical Engineering. Science and Education. – 2024. – No. 13. – pp. 410-421. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-111. – EDN TDIXLF.
[9] Official Website of DeltaMek Company [Electronic Resource]. URL: https://www.deltamec.ru (accessed on: 15.03.2025).
[10] Polishchuk M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical Model of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, pp. 86-96, 2022.
[11] Polishchuk M.N., Popov A.N., Vasiliev A.K., Reshetov D.V. Research on Air Suspension of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, 2021, pp. 219-230.
[12] Bhushan B. Introduction to Tribology. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2013. – 711 p. – DOI: 10.1002/9781118403259.
[13] Hertz E.V., Kreinin G.V. Constructor's Library. Pneumatic Drive Calculation. Reference Manual. Moscow: Machine Engineering, 1975. – 274 p.
[14] Hertz E.V. Pneumatic Drives. Theory and Calculation. Moscow: "Machine Engineering," 1969. – 359 p.
[15] Karazin V.I., Khlebosolov I.O., Yevgrafov A.N., Kozlikin D.P., Andryenko P.A., Tereshin V.A., Khisamov A.V. Methods and Means of Laboratory Reproduction of Acceleration. St. Petersburg: Polytech-Press, 2023. – 168 p.
[16] Yelagina A.K. Shock Stand with Enhanced Energy Characteristics / A.K. Yelagina, I.O. Khlebosolov // Week of Science at SPbPU: Proceedings of the International Scientific Conference. In 2 parts, St. Petersburg, November 18-23, 2019. Volume Part 2. – St. Petersburg: Polytech-Press, 2020. – pp. 70-72. – EDN ENGEGD.
[17] Eliseev V.V., Piskunov V.A. Rescue Line Throwers: Mathematical Modeling and Experimental Research / V.V. Eliseev, V.A. Piskunov // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 18, No. 1-2. – pp. 205-208. – EDN WLWYWD.
[18] Gustavo Koury Costa. Modelling Air Flow through Pneumatic Valves: A Brief Review with an Experimental Case Study, MDPI, Eng 2023, 4, 2601–2614. doi.org/10.3390/eng4040149.
[19] Barycki J., Ganczarek M., Kollek W., Mikulczynski T., Samsonowicz Z. Performances of High-Speed Pneumatic Drive with Self-Acting Impulse Valve // Mechanism and Machine Theory. – 2004. – pp. 657–663. – DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00089-2.
[20] Daigle M.J., Goebel K. A Model-Based Prognostics Approach Applied to Pneumatic Valves // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2011. – 16 p.
[21] Jiménez M., Kurmyshev E., Castañeda C.E. Experimental Study of Double-Acting Pneumatic Cylinder // Experimental Techniques, 44, No. 3 – 2020. – pp. 355–367.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.1.051
doi:10.18720/SPBPU/2/id-132

А.Н. Попов[1], М.Н. Полищук[2], Д.В. Решетов[3]

АНАЛИЗ РАБОТЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДВУНАПРАВЛЕННОГО УДАРА С МАЯТНИКОВЫМ ИНЕРЦИОННЫМ БЛОКОМ



[1]Аркадий Николаевич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)947-3582, E-mail: porka.n@mail.ru



[2]Михаил Нусимович Полищук,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)242-2526, E-mail: polishchuck@mail.ru



[3]Дмитрий Валентинович Решетов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)876-95-81, E-mail: pvclol@yandex.ru

Аннотация

Дано описание принципа работы и приведены технические характеристики горизонтального ударного стенда с пневмоприводом для испытания изделий на одиночные ударные воздействия. Стенд имеет оригинальную компоновку с маятниковым инерционным блоком и обеспечивает двунаправленный удар. Маятниковая схема позволяет существенно уменьшить габаритные размеры ударной машины и снизить нагрузки на цеховое оборудование, двунаправленный удар – приложить вектор ударного ускорения в двух направлениях без переустановки объекта испытаний. Приведены оценки параметров, определяющих

возможности стенда по воспроизведению ударных импульсов с требуемым пиковым значением и длительностью.

Ключевые слова: ударные испытания, горизонтальный стенд, двунаправленный удар, маятниковая схема, технические характеристики.

Введение

Горизонтальные ударные стенды применяются при испытаниях изделий больших габаритных размеров или, когда вектор ударного ускорения, прикладываемого к изделию, должен быть направлен перпендикулярно действию силы тяжести. Типичным примером являются краш-тесты, выполняемые практически всеми автопроизводителями. Потребности в испытаниях на горизонтальных стендах привели к быстрому росту их разнообразия [1-3]. В настоящее время горизонтальные ударные стенды для испытания широкой гаммы изделий, включая автомобили и автомобильные компоненты, выпускаются целым рядом компаний, таких как *Seattle Safety*, *M/RAD Corporation* и *Lansmont* (США), *DONGLING Technologies*, CME Technology Co и *TMC Solutions* (КНР), *IndiaMART* (Индия), ООО «Вибросервистест», ООО «ВИС-В», ООО «Дельтамэк» (РФ) и др. [4-7].

В статье рассматриваются вопросы оценки и выбора технических решений, использованных при создании стенда СОУГ2000, который имеет компоновку с маятниковым инерционным блоком [8], что позволяет уменьшить габаритные размеры и воздействие на цеховое оборудование.

Методы

Структурная схема (рис. 1) *и технические характеристики стенда СОУГ2000.*

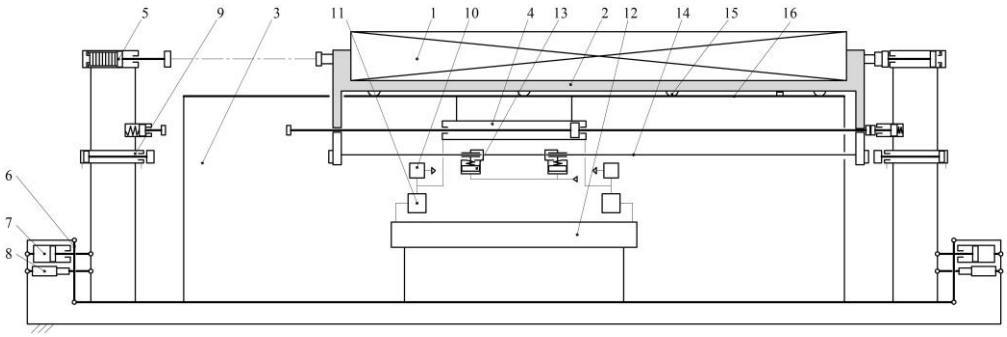


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ударной машины стенда СОУГ2000:
1 – объект испытаний; 2 – каретка; 3 – инерционный блок; 4 – цилиндр разгона; 5 – формирователь импульсов; 6 – серьга параллелограммного механизма; 7 – пневмопружина; 8 – демпфер; 9 – цилиндр позиционирования каретки; 10 – клапан быстрого выхлопа; 11 – клапан разгона; 12 – ресивер; 13 – цилиндр тормозов; 14 – тормозное ребро; 15 – катки каретки; 16 – направляющие каретки

Таблица. Технические характеристики стенда СОУГ2000

Параметр	Значение
Размер ударной каретки, длина × ширина × высота, мм	6270×1420×570
Масса объекта испытаний с оснасткой, кг, не более	2500
Пиковое ударное ускорение при прямом ударе, *g*	60
Пиковое ударное ускорение при обратном ударе, *g*	20
Длительность импульса при прямом и обратном ударах, мс	40
Форма ударного импульса при прямом и обратном ударах	полусинус, искаженный полусинус
Привод разгона каретки	пневматический
Размеры ударной машины: длина × ширина × высота, м	11,19×2,28×1,7
Масса ударной машины, т	34

Оценка требуемой скорости соударения каретки и формирователя. Для решения поставленной задачи используем математическую модель с упрощениями. Во-первых, рассматриваем только удар, не учитывая этапы разгона и торможения. Во-вторых, учитываем малость угла качания ψ инерционного блока, который ограничен из конструктивных соображений. В результате математическая модель на этапе удара примет следующий вид:

$$\begin{cases} m\Delta\ddot{x} - ml\ddot{\psi} + c\Delta x = 0 \\ -m\Delta\ddot{x} + (m+M)l\ddot{\psi} + \beta_a l\dot{\psi} + \left((m+M)g + F_s\right)\psi = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где Δx – деформация формирователя; ψ – угол поворота серьги; m, M – массы каретки и инерционного блока; c – жесткость формирователя; l – длина серьги подвески; β_a – суммарный коэффициент демпфирования амортизаторов-демпферов; F_s – сила сопротивления пневмопружин.

Система (1) должна решаться при начальных условиях

$$\dot{x}(0) = v, \quad x(0) = 0, \quad \dot{\psi}(0) = \dot{\psi}_0, \quad \psi(0) = \psi_0, \quad (2)$$

где v – скорость каретки в момент соударения с формирователем; $\dot{\psi}_0$, ψ_0 – скорость и положение инерционного блока в момент соударения каретки и формирователя.

Считаем, что удар начинается при $t = 0$ и имеет малую длительность. Систему (2) решаем с помощью преобразования Лапласа. Процедура решения практически не отличается от той, что описана в [9] при исследовании стенда с последовательной компоновкой, т. к. процесс разгона каретки практически идентичен для обоих случаев.

По требуемой длительности τ ударного импульса можно определить жесткость формирователя, который должен быть использован в испытаниях

$$c = \frac{mM}{m+M}\left(\frac{\pi - 2\arcsin(0{,}1)}{\tau}\right)^2, \qquad (3)$$

а требуемое пиковое значение ускорения A ударного импульса обеспечивается надлежащей скоростью соударения каретки с инерционным блоком

$$v = A\sqrt{\frac{m(m+M)}{cM}} = \frac{m+M}{M}\cdot\frac{A\tau}{\pi - 2\arcsin(0.1)}. \qquad (4)$$

По заданию на испытание (A, τ) и массе изделия можно выбрать формирователь с нужной жесткостью и разгонять каретку до требуемой скорости. Далее нужно подобрать начальное давление в ресивере, чтобы эту скорость получить.

На рис. 2 приведены зависимости требуемой скорости соударения каретки с формирователем для реализации нужного режима испытаний.

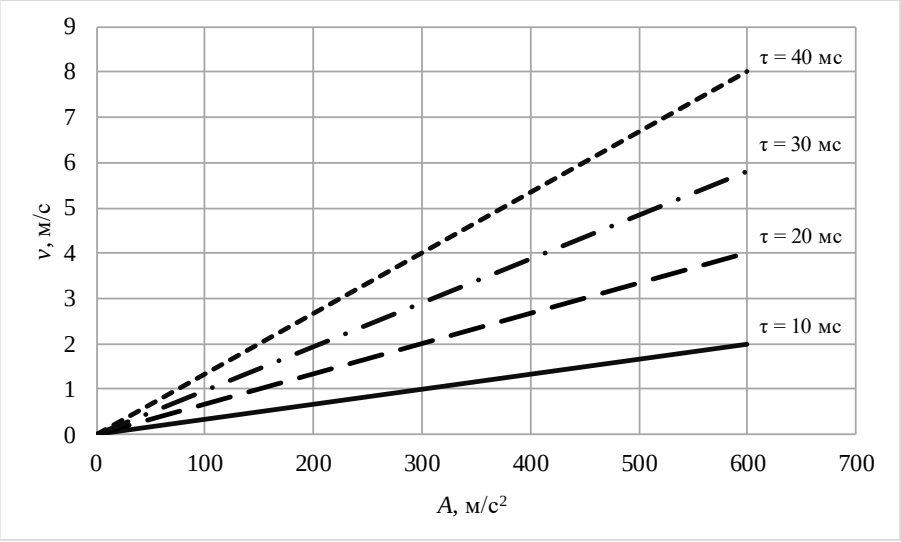


Рис. 2. Оценка требуемой скорости соударения каретки с формирователем для различных режимов работы стенда СОУГ2000

Определение начального давления в ресивере. Одной из основных настроек стенда является выбор начального давления в ресивере. Его величина определяет характер разгона каретки [10], а значит скорость ее соударения с формирователем и пиковое значение ударного импульса ускорения.

Путем моделирования уравнений динамики стенда на этапе разгона была получена зависимость скорости соударения каретки и формирователя от давления накачки ресивера (рис. 3). Интерес также представляет и обратная зависимость: давления накачки от требуемой скорости соударения (рис. 4). Эту зависимость можно использовать для начальной установки давления в ресивере при воспроизведении ударного импульса с требуемыми параметрами.

Отметим, что полученные значения давления накачки ресивера следует рассматривать как оценочные. Их можно применять как начальные при настройке на конкретный режим воспроизведения ударного импульса с требуемыми параметрами. Погрешность оценки может быть связана с различными факторами, в частности [11, 12]:

– при расчетах использованы ориентировочные значения целого ряда характеристик, например коэффициента расхода и коэффициентов трения;

– принята упрощенная модель работы специального клапана разгона.

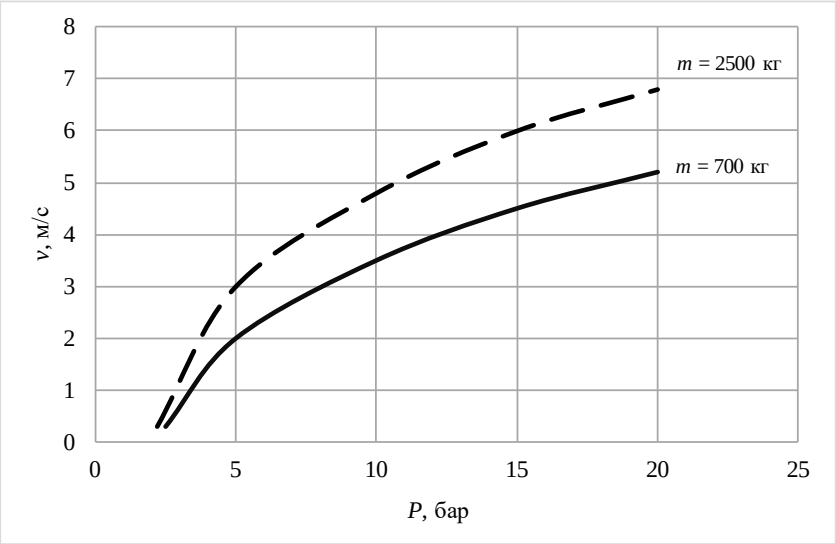


Рис. 3. Зависимость скорости соударения каретки и формирователя импульсов от давления накачки ресивера для объектов разной массы

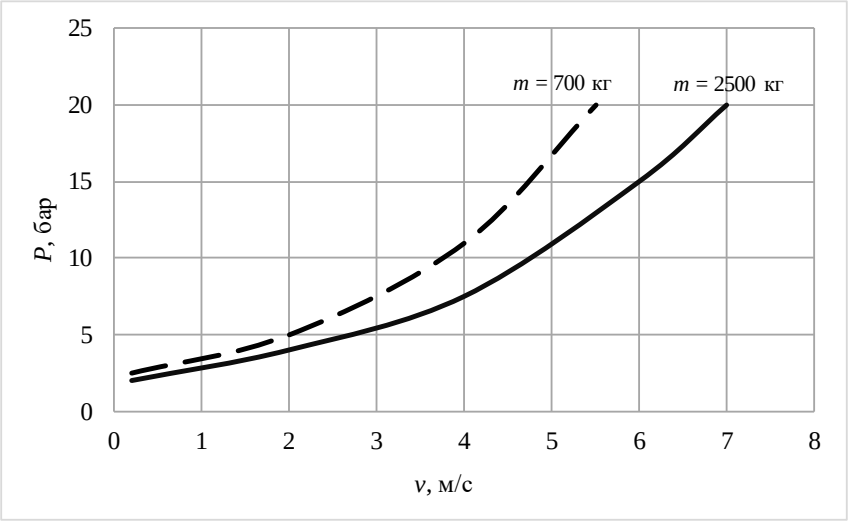


Рис. 4. Зависимость давления накачки ресивера от скорости соударения каретки и формирователя импульсов для объектов разной массы

Оценка работы элементов подвески инерционного блока. При разгоне каретки инерционный блок начинает движение в противоположную сторону. Его скорость сначала медленно нарастает, а затем начинает

убывать, но до момента соударения каретки с формирователем меняется незначительно. После столкновения инерционный блок приобретает заметную скорость, а с учетом его большой массы – и значительную кинетическую энергию.

Естественно, встает проблема «гашения» этой энергии, чтобы максимально ограничить вибрационное воздействие на соседнее цеховое оборудование и само производственное здание. Решение этой задачи осуществляется за счет пневмогидравлической подвески. Кинетическая энергия инерционного блока преобразуется в потенциальную энергию «пневмопружин», т. е. энергию сжатого воздуха в пневмоцилиндрах подвески и переходит в тепловую посредством дросселирования рабочей жидкости в демпферах [13, 14]. Таким образом ограничивается скорость и амплитуда качания инерционного блока, при этом пневмоподвеска и сила тяжести инерционного блока возвращают его в уравновешенное исходное нижнее положение.

Для выбора параметров подвески рассмотрим сначала процессы, протекающие в пневмоцилиндрах подвески. В исходном положении инерционного блока поршень каждого из пневмоцилиндров находится в середине хода. Затем в одной из полостей (в зависимости от направления движения инерционного блока) давление начинает нарастать, а в другой – уменьшаться из-за изменения их объемов. На рис. 5 приведен график изменения давления в полости пневмоцилиндра при воспроизведении удара с пиковым значением $A = 28g$, длительностью $\tau = 40$ мс.

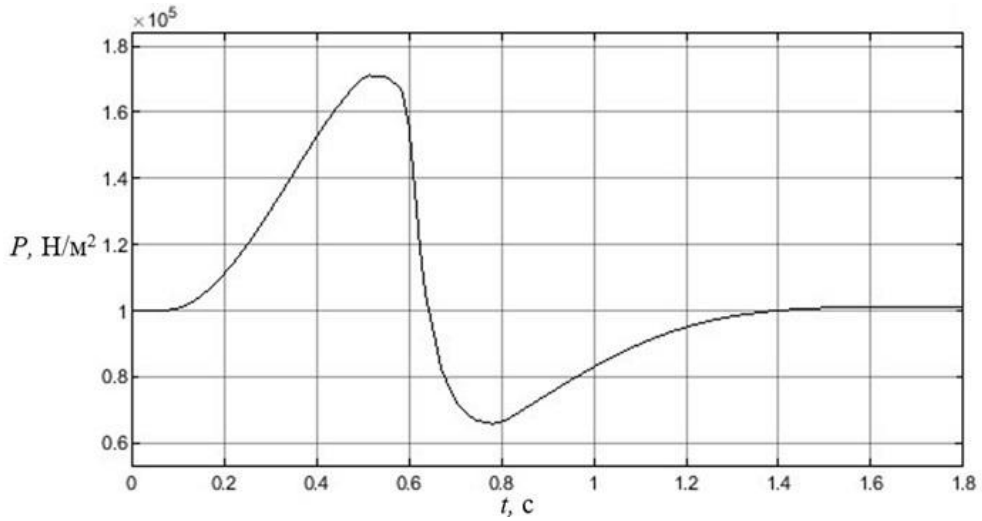


Рис. 5. Изменение давление в пневмоцилиндрах подвески при воспроизведении удара

Из рис. 5 следует, что давление возрастает меньше чем в 2 раза по сравнению с атмосферным. При реализации больших пиковых значений ударного ускорения потребуются большие скорости соударения каретки с формирователем. Соответственно возрастет реализуемая при этом

скорость инерционного блока и его перемещение. В результате из-за существенной нелинейности характеристики пневмопружины давление воздуха [15] в пневмоцилиндрах подвески для стандартных элементов пневмоавтоматики может достичь критического значения.

На рис. 6 приведен график изменения силы сопротивления пневмопружин для режима $A = 28g$, $\tau = 40$ мс, $M + m = 31600$ кг.

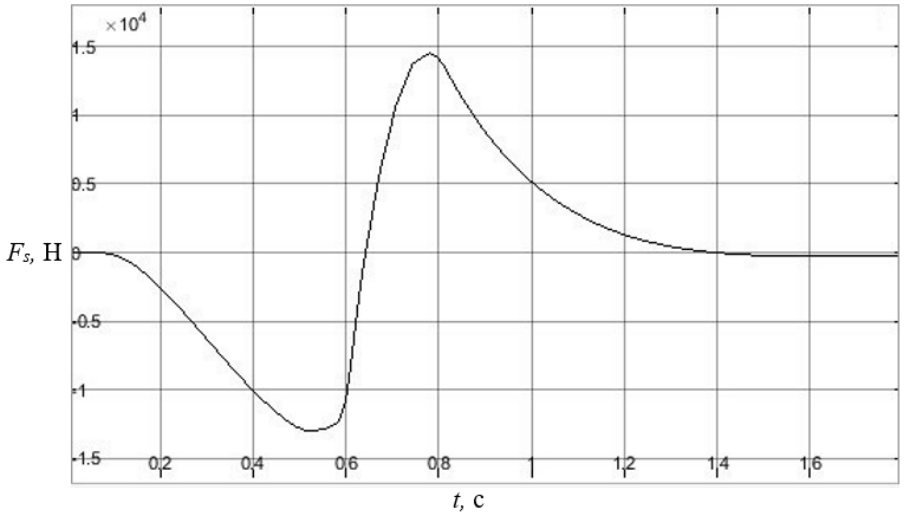


Рис. 6. Сила сопротивления пневмопружин при $A = 28g$, $\tau = 40$ мс, $M + m = 31600$ кг

Основной эффект от демпферов проявляется при высоких скоростях и больших перемещениях инерционного блока, а значит на этапе воспроизведения ударного импульса. На рис. 7 приведен график изменения силы сопротивления демпферов.

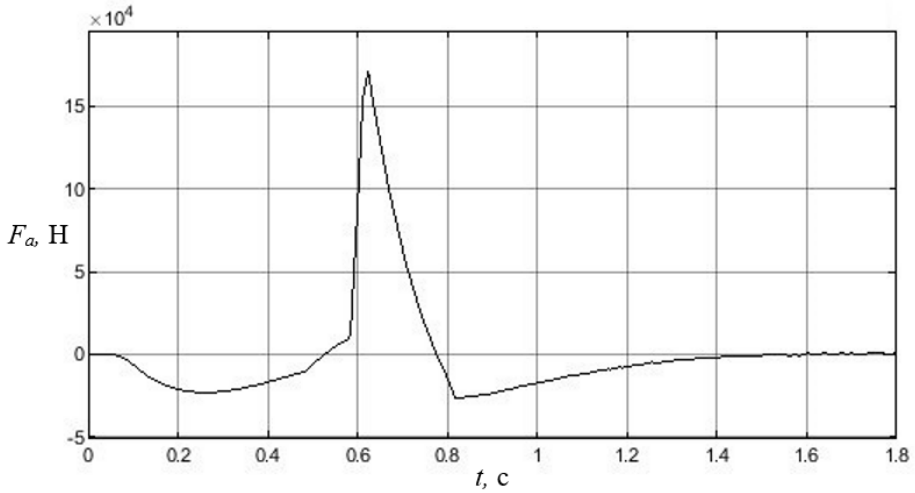


Рис. 7. Сила сопротивления демпферов

Важным вопросом при разработке стенда является определение оптимального количества пневмопружин и демпферов. Предварительную оценку можно получить на основе упрощенной модели, рассматривая

движение инерционного блока в горизонтальном направлении после удара как колебания «груза на пружине»:

$$m_0\ddot{z} + \beta_0\dot{z} + c_0 z = 0, \quad z(0) = 0, \quad \dot{z}(0) = v_0, \tag{5}$$

где z – перемещение «груза» (инерционного блока), $m_0 = M + m$ – его масса (масса инерционного блока и каретки с изделием), β_0 – коэффициент демпфирования, c_0 – жесткость «пружины», v_0 – начальная скорость инерционного блока на этапе отскока.

Введенные выше параметры, согласно произведенным выкладкам, имеют следующие значения:

$$\beta_0 = \beta_a, \quad c_0 = F_s / L, \quad v_0 = mA\tau / \pi M.$$

Значение жесткости в линеаризованной модели (5) справедливо при малом отношении z/L <<1 (перемещение инерционного блока к ходу поршней пневмопружин), но соблюдать такое соотношение на практике необходимо, чтобы не использовать пневмоэлементы повышенного давления. Начальная скорость инерционного блока зависит от реализуемого режима испытаний (пикового значения ударного импульса A).

Решение уравнения (5) имеет вид

$$z(t) = \frac{2m_0 v_0}{\sqrt{4c_0 m_0 - \beta_0^2}} e^{-\frac{\beta_0}{2m_0}t} \sin\left(\frac{\sqrt{4c_0 m_0 - \beta_0^2}}{2m_0}\right)t. \tag{6}$$

Прежде чем обсуждать оценки, которые следуют из упрощенной модели, следует обосновать возможность ее использования. Таким обоснованием может служить сопоставление траекторий движения платформы на этапе движения после завершения ударного импульса.

На рис. 8 для примера приведены графики для подвески с 10-ю демпферами и 2-мя пневмопружинами с каждой стороны платформы. Характер графиков схож, хотя и не идентичен. Расхождение объясняется тем, что в упрощенной модели отсутствует влияние каретки на движение платформы, а параметры и начальные условия для платформы взяты приближенно.

Будем считать сравнительную близость графиков достаточным основанием возможности использования оценок, следующих из упрощенной модели.

Из упрощенной модели следует, логарифмический коэффициент затухания колебаний инерционного блока равен $\beta_0 / 2m_0 = \beta / (M+m)$, т. е. пропорционален количеству демпферов. Их требуемое число можно найти из условия ограничения скорости движения инерционного блока в течение заданного времени с учетом характера его движения.

В результате моделирования в среде *MATLAB Simulink* получены графики перемещения инерционного блока $x(t)$ для различных значений

количества амортизаторов и пневмопружин при $A = 28g$, $\tau = 40$ мс, $M + m = 31600$ кг, показанные на рис. 9.

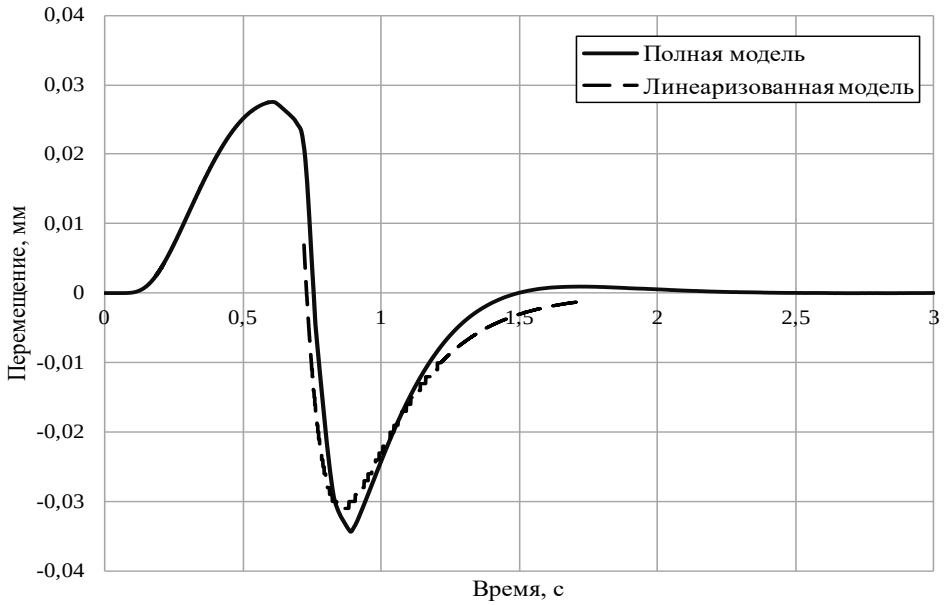


Рис. 8. – «Траектория» движения платформы в полной (сплошная линия) и упрощенной (штриховая линия) моделях

На характер движения инерционного блока влияет и количество пневмопружин. При малом числе демпферов количество пневмопружин нужно увеличивать, чтобы ограничить амплитуду колебаний инерционного блока. При большом количестве демпферов количество пневмопружин мало влияет на характер движения инерционного блока. В подвеске стенда СОУГ2000 на основе полученных оценок и конструктивных соображений было установлено 10 демпферов и 2 пневмопружины с каждой стороны.

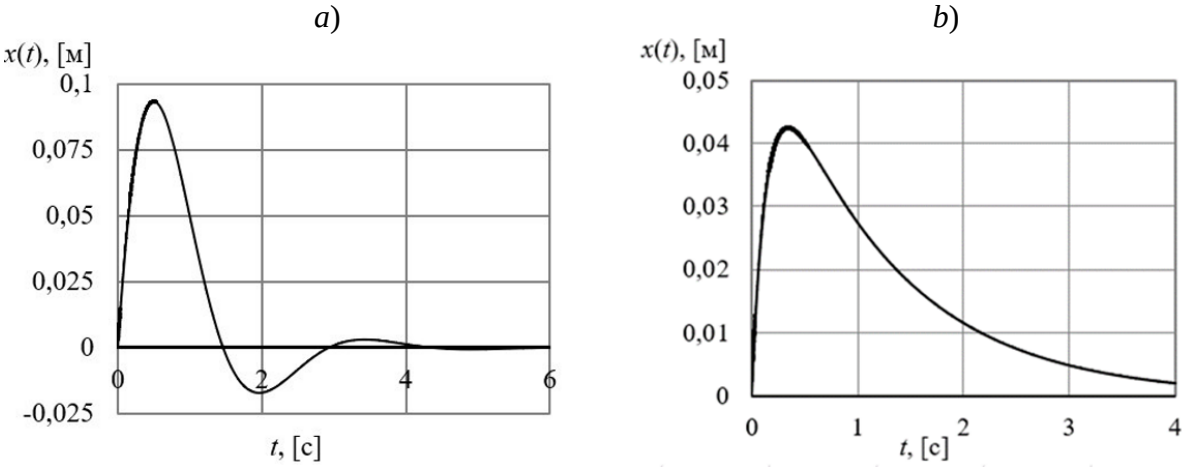


Рис. 9. Перемещение инерционного блока: *a*) – 4 пневмопружины и 5 демпферов; *b*) – 4 пневмопружины и 20 демпферов

Оценка параметров устройства торможения каретки. Торможение каретки после удара осуществляется за счет прижима тормозных колодок к стальной ленте. Получим приближенную аналитическую оценку необходимой силы прижима колодок, учитывая, что речь идет не о точном позиционировании каретки после отскока, а лишь о ее торможении в безопасной зоне.

Алгоритм включения тормозов может быть разным. В стенде СОУГ2000 тормоза включаются по окончании действия ударного импульса. В этот момент каретка находится в положении $x = x_{r2}$, а ее скорость $\dot{x} = -v$, где v – скорость соударения каретки с формирователем, определяемая формулой (4).

При включении тормозов каретка начинает двигаться с отрицательным ускорением, зависящим от силы сопротивления тормозов

$$a_t = -\frac{F_b}{m} = -\frac{2n_b N_b f_f}{m}. \tag{7}$$

Определим время торможения t_t и тормозной путь x_t

$$\begin{aligned} t_t &= -v / a_t = \frac{(M+m)m}{2Mn_b N_b f_f} \cdot \frac{A\tau}{\pi}, \\ x_t &= vt_t + \frac{a_t t_t^2}{2} = -\frac{v^2}{2a_t} = \left(\frac{A\tau}{2\pi} \cdot \frac{M+m}{M}\right)^2 \cdot \frac{m}{n_b N_b f_f}. \end{aligned} \tag{8}$$

Из условия остановки каретки в требуемой зоне $x_t \le \overline{x_t}$ получим

$$N_b \ge \frac{m}{n_b f_f \overline{x_t}} \cdot \left(\frac{A\tau}{2\pi} \cdot \frac{M+m}{M}\right)^2. \tag{9}$$

В частности, при M = 26650 кг, m = 2900 кг, A = 280 м/с^2, τ = 0,04 с, n_b = 8, f_f = 0,7, $\overline{x_t}$ = – 0,4 м расчетное усилие, которое должна обеспечить каждая из 4-х пар колодок тормозов каретки, составляет $N_{b1} \ge 5050$ Н. Чтобы создать такую силу при диаметре цилиндров 100 мм, нужно обеспечить давление сжатого воздуха 6,5 бар.

На основе формулы (9) построен график (рис. 10) оценки требуемого усилия прижима тормозных колодок в зависимости от реализуемого ударного импульса.

Сравним полученные аналитические оценки усилий прижима тормозных колодок с результатами компьютерного моделирования. На рис. 11 приведен график изменения скорости каретки для режима воспроизведения ударного импульса с параметрами $A = 28g$, τ = 40 мс, массе каретки с изделием m = 2900 кг при усилии каждой тормозной колодки каретки 5050 Н и 4-х парах колодок.

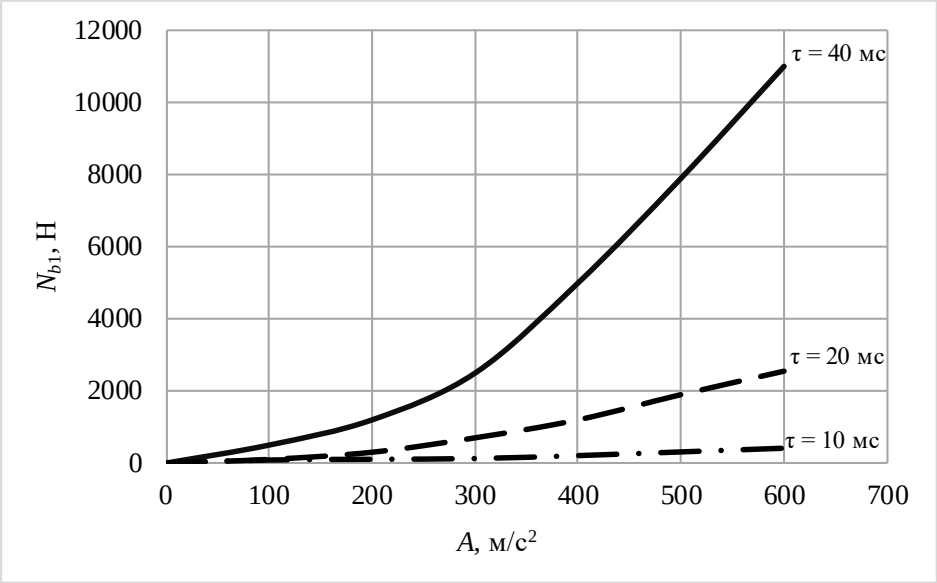


Рис. 10. Требуемое усилие прижима тормозных колодок каретки

Тормозной путь каретки составляет 0,25 м, время торможения – 0,6 с. Можно отметить достаточно хорошее соответствие аналитической оценки и результата моделирования.

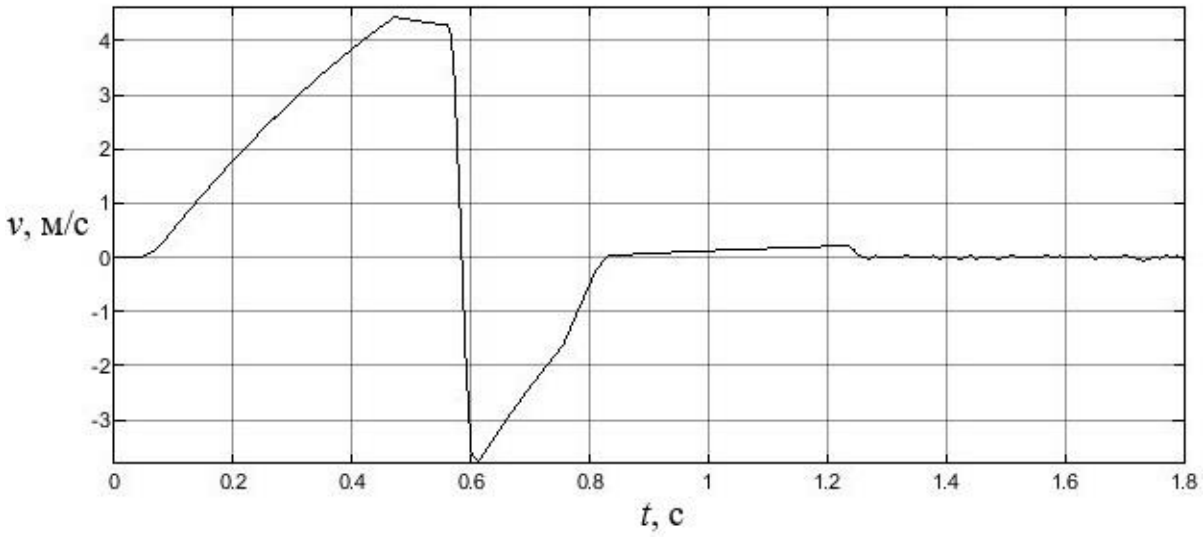


Рис. 11. Изменение скорости каретки при торможении

Оценка параметров формирователя импульсов. Формирователь импульсов играет важнейшую роль в создании ударного импульса, от него зависит форма, длительность и пиковое ударное ускорение [16-19]. Математическая модель и все приведенные выше исследования проводились для формирователя с линейной характеристикой силы упругости и условными параметрами, обеспечивающими нужную полусинусоидальную форму и требуемую длительность импульса.

На рис. 12 приведен график зависимости необходимой жесткости формирователя от требуемой длительности ударного импульса.

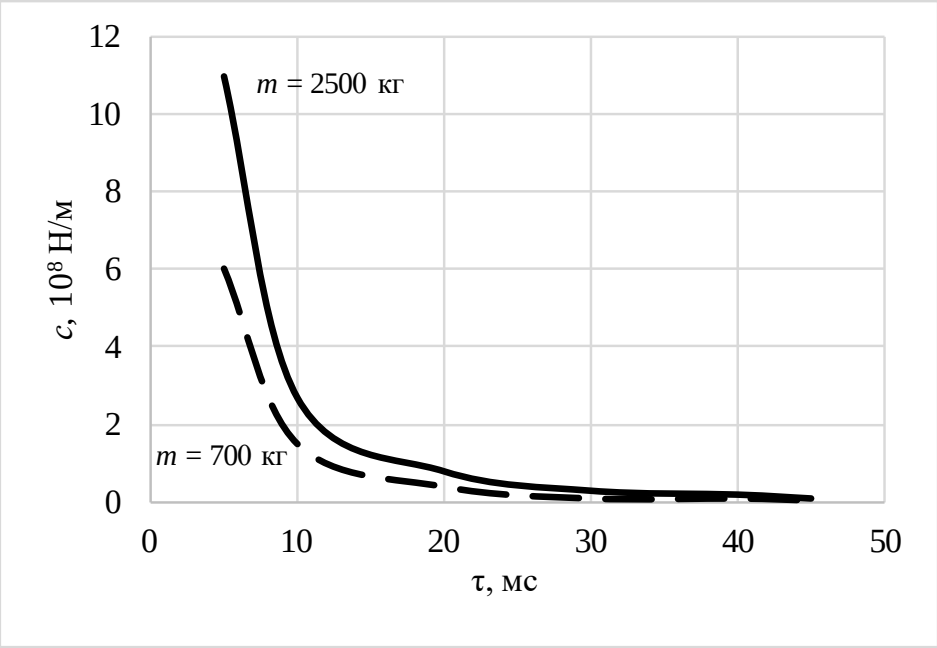


Рис. 12. Зависимость требуемой жесткости упругого формирователя от длительности ударного импульса

Так, для воспроизведения полусинусоидального ударного импульса длительностью 40 мс требуется обеспечить эквивалентную жесткость условного формирователя $c \approx 1{,}42 \cdot 10^7$ Н/м.

В простейшем варианте жесткость формирователя цилиндрической формы может быть выражена формулой [20]

$$c = \frac{ES_f}{h_f}, \tag{10}$$

где S_f – площадь поперечного сечения формирователя; h_f – высота формирователя; E – модуль Юнга материала, из которого изготовлен формирователь.

Модуль Юнга для эластомеров разных видов значительно различается по величине. По предварительным оценкам полиуретан, из которого изготовлены формирователи, используемые в стенде СОУГ2000, имеет модуль Юнга порядка $2{,}5 \cdot 10^7$ Н/м^2.

В рассматриваемом стенде формирователи устанавливаются в специальные контейнеры в форме гильз по несколько штук в каждом. При использовании нескольких гильз «эквивалентная» жесткость формирователя увеличивается пропорционально их количеству и уменьшается пропорционально количеству отдельных элементов, входящих в набор.

Если использовать k_f наборов с высотой отдельных элементов h_f и диаметром d_f, необходимое количество n_f элементов в каждом наборе можно найти следующим образом

$$n_f = \frac{E\pi d_f^2 k_f}{4ch_f}. \quad (11)$$

К примеру, для воспроизведения ударного импульса с параметрами: пиковое значение A = 28g, длительность $\tau = 40$ мс, масса каретки с объектом m = 2900 кг кинетическая энергия $W = 9{,}2 \cdot 10^3$ Дж при k_f = 3, h_f = 10 мм, d_f = 180 мм получаем n_f = 14.

Результаты

Решены задачи определения начального давления в ресивере и жесткости формирователя, позволяющие производить преднастройку стенда для воспроизведения ударных импульсов с требуемыми характеристиками. Найдены требования к элементам пневмоподвески инерционного блока и тормозному устройству каретки.

Обсуждение

Получены оценки для рационального выбора структуры и параметров конструктивных элементов стенда. Проведенные эксперименты на реальном стенде в цеховых условиях подтвердили их адекватность и возможность использовать для вновь проектируемого оборудования.

Заключение

Выполнен анализ работы пневматического ударного стенда СОУГ2000 с маятниковым инерционным блоком. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили правомерность технических решений, использованных при его разработке и опытной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.
[2] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
[3] Каразин В.И., Хлебосолов И.О., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Андриенко П.А., Терешин В.А., Хисамов А.В. Методы и средства лабораторного воспроизведения ускорения. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023 – 168 с.

[4] Официальный сайт компании Seattle Safety [Электронный ресурс]. URL: https://seattlesafety.com/ (дата обращения: 08.03.2025).
[5] Официальный сайт компании CME Technology Co [Электронный ресурс]. URL: https://www.cmetechnology.com/ (дата обращения: 07.03.2025).
[6] Официальный сайт компании ООО «Вибросервистест» [Электронный ресурс]. URL: https://vstest.ru/ (дата обращения: 07.03.2025).
[7] Официальный сайт компании ООО «Дельтамэк» [Электронный ресурс]. URL: https://www.deltamec.ru/ (дата обращения: 07.03.2025).
[8] А.Н. Попов, М.Н. Полищук, Д.В. Решетов. Анализ компоновок горизонтальных ударных стендов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 410-421. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-111. – EDN TDIXLF.
[9] A.N. Popov, M N. Polishchuk, D.V. Reshetov. Horizontal Bump Machine / // Advances in Mechanical Engineering: Selected Contributions from the Conference “Modern Mechanical Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, 01–30 июня 2023 года. – Zug, 2024. – P. 133-145. – DOI 10.1007/978-3-031-48851-1_13. – EDN KILRPF.
[10] Елисеев, В.В. Спасательные линеметы: математическое моделирование и экспериментальные исследования / В. В. Елисеев, В. А. Пискунов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 1-2. – С. 205-208. – EDN WLWYWD.
[11] Герц. Е.В., Крейнин Г.В. Библиотека Конструктора. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975 – 274 с.
[12] Герц Е.В. Пневматические приводы. Теория и расчет. М., «Машиностроение», 1969. – 359 с.
[13] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, pp. 86-96, 2022.
[14] Polishchuck M.N, Popov A.N, Vasiliev A.K, Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, 2021, pp. 219-230.
[15] Cha, C. J., Kim, P. G. and Lee, S. J. (2006). Development of an analytical air spring model with hysteresis characteristics. Fall Conf. Proc., Korean Society of Automotive Engineers, pp. 1964–1969.
[16] Xiaoqiu Xu, Junwei Han, Dacheng Cong, Shutao Zheng. High-power impact experimental generation analysis using hydraulic impact simulation tester. IEEE 3rd Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2019. pp. 2098-2102.
[17] Jingjing Wen, Chengwu Liu, Houpu Yao, Bin Wu. A nonlinear dynamic model and parameters identification method for predicting the shock pulse

of rubber waveform generator. International Journal of Impact Engineering. 2018, 120. pp. 1–15.
[18] Tae-Ho Yang, Young-Shin Lee, Yoon-Jae Kim, Tae-Hyeong Kim, Chang-Won Shul, Myung-Seog Yang, Chae-Hun An, Gyu-Sub Lee. A Study on Dynamic Characteristics of Hyper-elastic Shock Programmer with Truncated Conical Shape. Advanced Materials Research, 2014, 871. PP. 240-246.
[19] Sujuan Jiao, Yu Wang, Lei Zhang, Hongxing Hua. Shock wave characteristics of a hydraulic damper for shock test machine. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010. pp. 1570-1578
[20] Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — 15-е изд., перераб. — М.: Наука, 1976. — 607 с.

A.N. Popov, M.N. Polishchuck, D.V. Reshetov

OPERATION ANALYSIS OF HORIZONTAL BIDIRECTIONAL BUMP TESTING MACHINE WITH PENDULUM INERTIAL MASS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This article describes the working principle and provides the technical specifications of a horizontal bump testing machine with a pneumatic actuator, designed for testing products under single shock loads. The machine features an original configuration with a pendulum inertial mass and ensures bidirectional bump. The pendulum mechanism significantly reduces the overall dimensions of the bump machine and minimizes the load on workshop equipment, while the bidirectional bump allows the application of shock acceleration in two directions without the need to reposition the test object. The article includes an evaluation of the parameters determining the machine’s capability to generate shock pulses with the required peak values and duration.

Key words: shock testing, horizontal machine, bidirectional bump, pendulum mechanism, technical specifications.

REFERENCES

[1] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.
[2] Christian Lalanne. Mechanical Shock: Monograph. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, 2009. – 367 p.

[3] Karazin V.I., Khlebosolov I.O., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Andrienko P.A., Tereshin V.A., Khisamov A.V. Methods and Means of Laboratory Reproduction of Acceleration. St. Petersburg: POLITEKH-PRESS, 2023 – 168 p.
[4] Official website of Seattle Safety [Electronic resource]. URL: https://seattlesafety.com/ (accessed: 08.03.2025).
[5] Official website of CME Technology Co [Electronic resource]. URL: https://www.cmetechnology.com/ (accessed: 07.03.2025).
[6] Official website of Vibroservistest LLC [Electronic resource]. URL: https://vstest.ru/ (accessed: 07.03.2025).
[7] Official website of Deltamec LLC [Electronic resource]. URL: https://www.deltamec.ru/ (accessed: 07.03.2025).
[8] Popov, A.N., Polishchuk, M.N., Reshetov, D.V. Analysis of Horizontal Impact Testing Stand Configurations. Modern Mechanical Engineering. Science and Education. – 2024. – No. 13. – pp. 410-421. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-111. – EDN TDIXLF.
[9] A. N. Popov, M. N. Polishchuk, D. V. Reshetov. Horizontal Bump Machine. // Advances in Mechanical Engineering: Selected Contributions from the Conference “Modern Mechanical Engineering: Science and Education,” Saint Petersburg, Russia, June 1–30, 2023. – Zug, 2024. – pp. 133-145. – DOI 10.1007/978-3-031-48851-1_13. – EDN KILRPF.
[10] Eliseev, V.V., Piskunov, V.A. Rescue Line Throwers: Mathematical Modeling and Experimental Research. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 18, No. 1-2. – pp. 205-208. – EDN WLWYWD.
[11] Hertz, E.V., Kreinin, G.V. Designer’s Library. Calculation of Pneumatic Drives. Reference Manual. Moscow: Mashinostroenie, 1975 – 274 p.
[12] Hertz, E.V. *Pneumatic Drives.* Theory and Calculation. Moscow: Mashinostroenie, 1969. – 359 p.
[13] Polishchuk M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical Model of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, 2022, pp. 86-96.
[14] Polishchuk M.N., Popov A.N., Vasiliev A.K., Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, 2021, pp. 219-230.
[15] Cha, C. J., Kim, P. G., Lee, S. J. (2006). Development of an Analytical Air Spring Model with Hysteresis Characteristics. Fall Conference Proceedings, Korean Society of Automotive Engineers, pp. 1964–1969.
[16] Xiaoqiu Xu, Junwei Han, Dacheng Cong, Shutao Zheng. High-Power Impact Experimental Generation Analysis Using Hydraulic Impact Simulation Tester. IEEE 3rd Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2019, pp. 2098-2102.

[17] Jingjing Wen, Chengwu Liu, Houpu Yao, Bin Wu. *A* Nonlinear Dynamic Model and Parameters Identification Method for Predicting the Shock Pulse of Rubber Waveform Generator. International Journal of Impact Engineering, 2018, Vol. 120, pp. 1–15.
[18] Tae-Ho Yang, Young-Shin Lee, Yoon-Jae Kim, Tae-Hyeong Kim, Chang-Won Shul, Myung-Seog Yang, Chae-Hun An, Gyu-Sub Lee. A Study on Dynamic Characteristics of Hyper-Elastic Shock Programmer with Truncated Conical Shape. Advanced Materials Research, 2014, Vol. 871, pp. 240-246.
[19] Sujuan Jiao, Yu Wang, Lei Zhang, Hongxing Hua. Shock Wave Characteristics of a Hydraulic Damper for Shock Test Machine. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, pp. 1570-1578.
[20] Belyaev, N. M. Strength of Materials. 15th revised edition. Moscow: Nauka, 1976. – 607 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 004.021
doi:10.18720/SPBPU/2/id-133

В.А. Чеканин[1], А.В. Чеканин[2]

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАССТАНОВКИ, УЧИТЫВАЮЩЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПО МИНИМАЛЬНОМУ РАССТОЯНИЮ МЕЖДУ ОСОБЫМИ ТОЧКАМИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ



[1]Владислав Александрович Чеканин, д.т.н., доцент
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук
Россия, Москва
Тел.: (499)972-9480, E-mail: vladchekanin@rambler.ru



[2]Александр Васильевич Чеканин, д.т.н., профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)972-9480, E-mail: av.chekanin@stankin.ru

Аннотация

В работе рассматривается задача оптимизированного размещения плоских прямоугольных объектов, для которых помимо базовых геометрических и технологических ограничений, накладываемых на формируемую расстановку, дополнительно задаётся ограничение на минимальное расстояние между предварительно выделенными особыми точками объектов. На основе модели потенциальных контейнеров разработан алгоритм расстановки прямоугольников с учётом индивидуальных ограничений по минимальному расстоянию между особыми точками объектов. Предложен эвристический алгоритм выбора

наилучшего варианта ортогональной ориентации прямоугольных объектов, минимизирующий плотность формируемой компоновки. Представлены примеры решения некоторых частных задач расстановки с различными ограничениями по минимальному расстоянию, задаваемому между особыми точками объектов.

Ключевые слова: задача расстановки, компоновка, модель потенциальных контейнеров, особые точки.

Введение

В работе рассматривается задача расстановки прямоугольных объектов, относящаяся к числу классических задач раскроя-упаковки [1]. Она заключается в поиске наиболее компактного способа размещения в ограниченном пространстве некоторого набора объектов, заданных в форме прямоугольников. Эта задача является NP-трудной оптимизационной задачей компоновки, для которой не всегда может быть получено точное решение [2, 3]. В связи с этим, задача разработки новых эффективных алгоритмов, обеспечивающих быстрое формирование плотной компоновки объектов, является актуальной.

При решении задач раскроя-упаковки необходимо учитывать различные виды ограничений на формируемую расстановку. Геометрические ограничения не позволяют объектам перекрывать друг друга, выходить за границы области размещения (контейнера), а также задают допустимые варианты ориентации для каждого размещаемого объекта [4]. При решении реальных задач, возникающих на производстве, помимо геометрических ограничений учитываются также и технологические ограничения, включающие задание минимальных отступов (допусков) между соседними объектами, минимальных отступов от границ пространства размещения, задание запретных для размещения областей (запретных зон), а также другие ограничения [5–7].

В некоторых задачах расстановки возникает необходимость задания дополнительных ограничений, связанных не с объектом целиком, а с его некоторой точкой, которую будем называть особой точкой [8]. Для каждой особой точки объекта задаётся минимальное расстояние, на котором она должна находиться по отношению к особым точкам остальных объектов. В частности, ограничение в виде минимального расстояния между особыми точками объектов необходимо учитывать для обеспечения пожарной безопасности на промышленных складах, содержащих контейнеры с опасными веществами (горючими жидкостями, газом, химикатами), при этом пожарная безопасность рассчитывается исходя из радиуса зоны поражения при возгорании и расположения опасной точки объекта [9–12]. В качестве другого примера можно привести задачу оптимизированной

расстановки электронных компонентов с тепловыми или электромагнитными ограничениями (центры чипов могут рассматриваться в качестве источников тепла или электромагнитного излучения) [13, 14].

В настоящей работе представлен разработанный алгоритм, обеспечивающий расстановку прямоугольных объектов с учётом дополнительного технологического ограничения на минимальное расстояние между особыми точками размещаемых объектов.

Методы

Постановка задачи

Приведём постановку плоской задачи расстановки прямоугольных объектов в один контейнер. Дан набор из n объектов в форме прямоугольника с габаритными размерами $\{w_i^1, w_i^2\}, i \in \{1,\ldots,n\}$ (верхний индекс в формулах будет обозначать порядковый номер координатной оси), а также единственный контейнер с габаритными размерами описанного прямоугольника $\{W^1, W^2\}$. Контейнер может быть как прямоугольным, так и иметь любую другую форму, полученную в результате размещения в нём набора запретных зон, задающих геометрические ограничения [15]. Обозначим положение объекта i в контейнере через $(x_i^1; x_i^2)$. При решении задачи упаковки необходимо наиболее плотно разместить все объекты в контейнере (т.е. получить компоновку минимальной длины), при этом объекты не должны перекрывать друг друга и не должны выходить за границы контейнера. Все объекты должны быть ориентированы параллельно осям контейнера, при этом допускается их поворот на углы, кратные 90°.

При моделировании расстановки будем использовать разработанную модель потенциальных контейнеров, которая описывает свободное пространство каждого контейнера полным набором потенциальных контейнеров – ортогональных объектов с наибольшими габаритными размерами, которые могут быть в нём размещены [16, 17]. Потенциальный контейнер k описывается вектором $\{v_k^1; v_k^2\}$, содержащим его габаритные размеры, а также вектором $\{p_k^1; p_k^2\}$, содержащим координаты положения его начала координат относительно начала координат контейнера.

Для каждого объекта i в системе координат его центра задаётся особая точка $(X_i^1; X_i^2)$, а также минимальное расстояние R_i, на котором эта точка должна быть удалена от остальных объектов.

При описании алгоритма расстановки одного объекта будем опускать нижний индекс, обозначающий порядковый номер этого объекта (см. рис. 1).

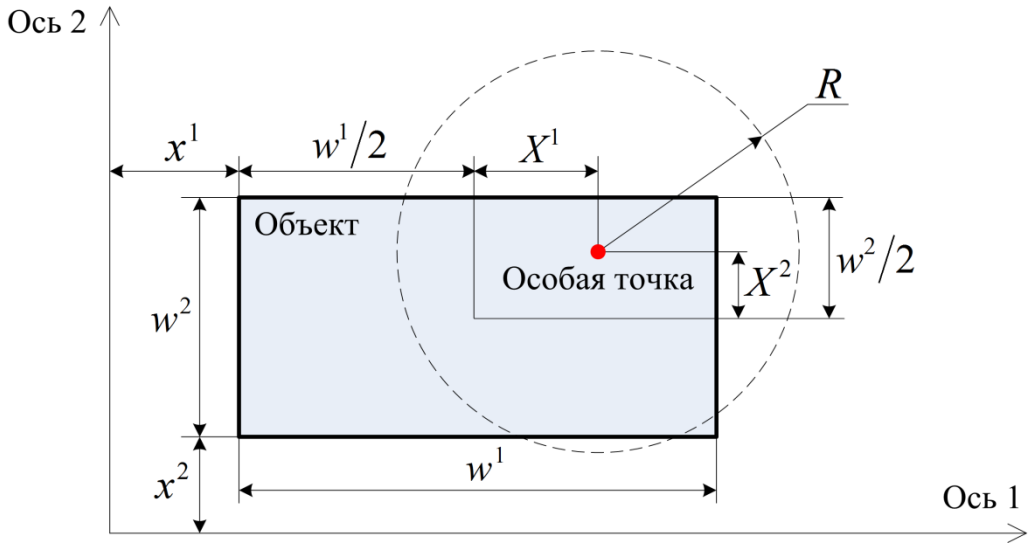


Рис. 1. Параметры особой точки объекта

Прямоугольный объект при расстановке имеет два уникальных варианта ортогональных ориентации, однако при задании особой точки число вариантов ортогональной ориентации объекта становится равным четырём (рис. 2).

Координаты особой точки при повороте объекта будут принимать значения Z^1 и Z^2 в соответствии с таблицей 1.

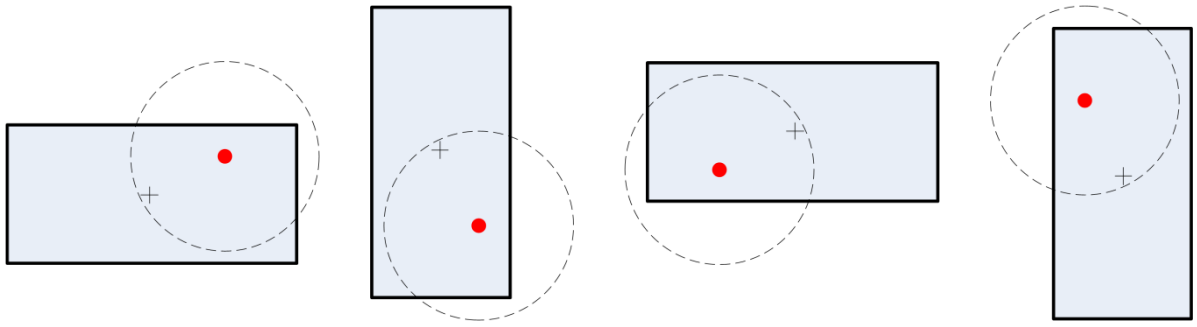


Рис. 2. Варианты ортогональной ориентации прямоугольного объекта:
a) угол поворота 0°; *b)* угол поворота 90°; *c)* угол поворота 270°; *d)* угол поворота 360°

Таблица 1. Координаты особых точек для различных вариантов ориентации объекта

Вариант ориентации	Координата особой точки вдоль оси 1 (Z^1)	Координата особой точки вдоль оси 2 (Z^2)
0°	$x^1 + w^1/2 + X^1$	$x^2 + w^2/2 + X^2$
90°	$x^1 + w^2/2 + X^2$	$x^2 + w^1/2 - X^1$
180°	$x^1 + w^1/2 - X^1$	$x^2 + w^2/2 - X^2$
270°	$x^1 + w^2/2 - X^2$	$x^2 + w^1/2 + X^1$

Алгоритм расстановки объектов с учётом особых точек

При решении задачи расстановки необходимо для каждого объекта найти такой потенциальный контейнер, в котором объект будет целиком размещён с учётом выполнения требований по отступам между объектами, отступам от границ контейнера, а также при этом он будет находиться наиболее близко к точке старта расстановки [15]. Поиск первого подходящего потенциального контейнера осуществляется алгоритмом, который подробно описан в статье [17].

Для размещения объекта с учётом особых точек ранее размещённых объектов разработан следующий алгоритм (пример применения данного алгоритма представлен на рис. 3).

Шаг 1. Определение области Ω_1 возможного сдвига объекта внутри выбранного потенциального контейнера.

Внутри найденного потенциального контейнера k задаётся прямоугольная область Ω_1, каждая точка которой может быть использована в качестве начала координат размещаемого объекта (начало координат объекта связано с его левым нижним углом). Эта прямоугольная область определяет возможный сдвиг размещаемого объекта внутри выбранного потенциального контейнера (рис. 3, *b*). Расположение области возможного сдвига объекта задаётся вектором $\left\{q_k^1; q_k^2\right\}$, значения которого вычисляются по формуле $q_k^d = \min\left(p_k^d, p_k^d + \min\left(\xi^d, v_k^d - Z^d + x^d\right)\right)$ $\forall d = \{1,2\}$, при этом она имеет габаритные размеры, задаваемые вектором $\left\{s_k^1; s_k^2\right\}$, элементы которого вычисляются по формуле $s_k^d = \max\left(p_k^d, p_k^d + \min\left(\xi^d, v_k^d - Z^d + x^d\right)\right) - q_k^d \ \forall d = \{1,2\}$. Здесь ξ^d – величина возможного сдвига объекта в направлении координатной оси d внутри всего пространства размещения в окрестности выбранного потенциального контейнера с учётом заданных отступов, которые должны быть выдержаны для каждой стороны размещаемого объекта [15]. Значение ξ^1 определяется как разность между максимально возможным сдвигом правой стороны объекта и минимально необходимым отступом с левой стороны объекта при условии, что максимально возможный сдвиг правой стороны объекта положителен. В случае если максимально возможный сдвиг левой стороны объекта положителен, то значение ξ^1 определяется как разность между минимально необходимым отступом с правой стороны объекта и максимально возможным отступом левой стороны объекта. Значение ξ^2 определяется аналогичным образом, только при этом рассматриваются верхняя и нижняя стороны объекта.

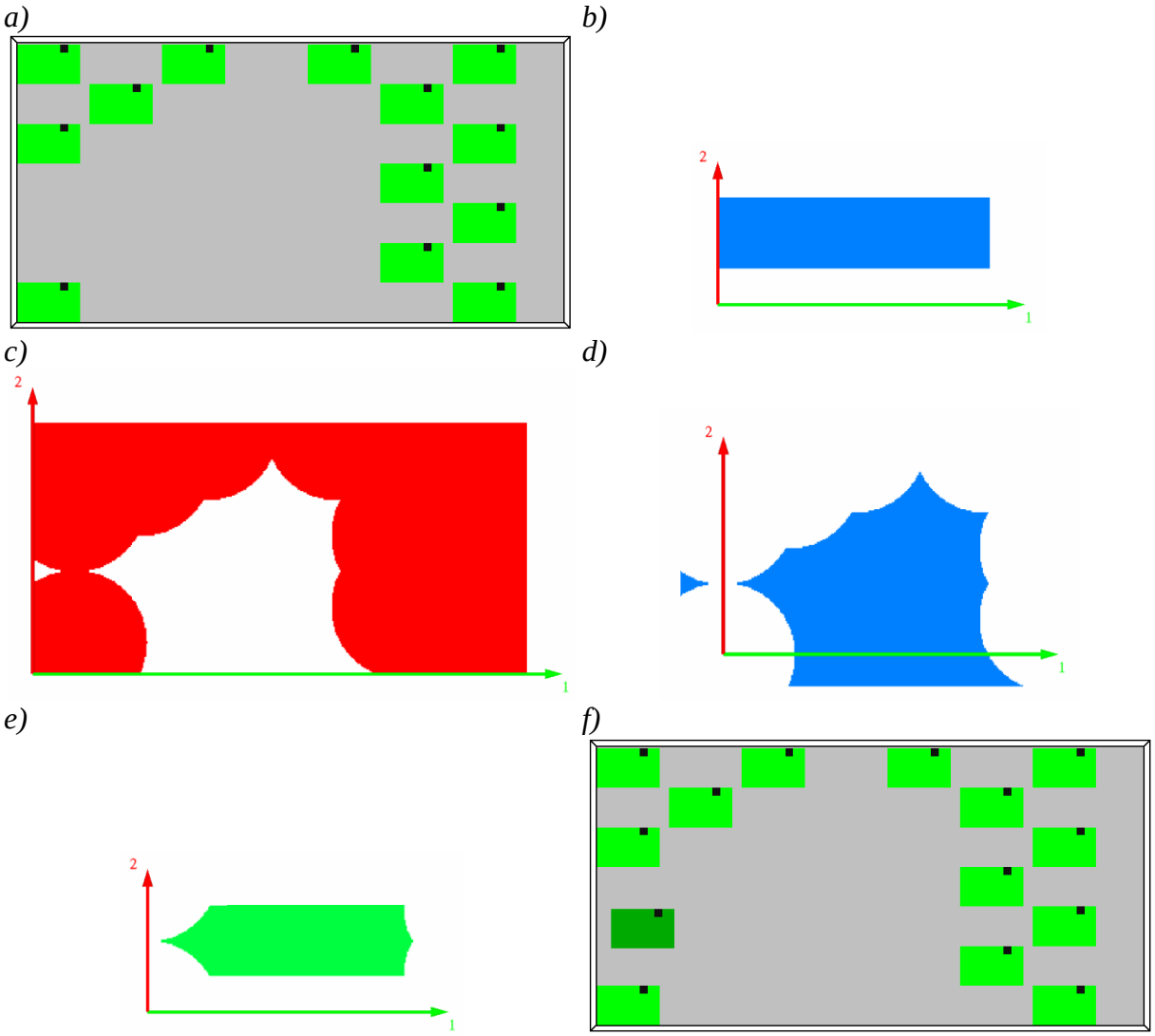


Рис. 3. Определение области допустимого размещения объекта с учётом ограничений по минимальному расстоянию между особыми точками объектов: *a)* исходная расстановка объектов с заданными особыми точками; *b)* область возможного сдвига начала координат размещаемого объекта внутри выбранного потенциального контейнера; *c)* результат размещения кругов ограничений в окрестности зон действия особых точек размещённых объектов; *d)* инвертированный набор кругов ограничений после сдвига; *e)* область возможного размещения начала координат размещаемого объекта после применения операции пересечения; *f)* результат расстановки

Шаг 2. Получение области, свободной от зон действия особых точек.

Для учёта зон влияния особых точек создаётся пустой контейнер C с габаритными размерами $\{W^1, W^2\}$, в котором размещаются геометрические ограничения в форме кругов в окрестности особых точек всех ранее размещённых объектов (рис. 3, *c*). При размещении очередного объекта i для каждого ранее размещённого объекта j формируется геометрическое ограничение в форме круга, которое задаётся

ортогональным многогранником [18] с центром в точке $\left(Z_j^1; Z_j^2\right)$ и радиусом, равным $\max\left(R_j, R_i\right)$. Далее для контейнера C применяется операция инвертирования его содержимого, которая даст область контейнера Ω_2, свободную от зон действия особых точек. Последующий сдвиг области Ω_2 на величину $D_i = \left\{D_i^1, D_i^2\right\}$ (см. таблицу 2) даст область Ω_3 (рис. 3, *d*), которая будет далее использована совместно с областью Ω_1 для анализа возможности размещения в контейнере объекта i.

Шаг 3. Получение области Ω_4, доступной для размещения объекта с учётом зон действия особых точек.

В результате применения теоретико-множественной операции пересечения областей Ω_1 и Ω_3 получаем область Ω_4, каждая точка которой может быть использована в качестве начала координат размещаемого объекта при расстановке с учётом ограничений, задаваемыми особыми точками: $\Omega_4 = \Omega_1 \cap \Omega_3$ (рис. 3, *e*). Последующий выбор конкретной точки области Ω_4 для размещения объекта осуществляется с учётом анализа заданных точек старта расстановки [15].

Таблица 2. Параметры сдвига области, свободной от зон действия особых точек, применяемого при размещении объекта *i*

Вариант ориентации	Сдвиг вдоль оси 1 (D_i^1)	Сдвиг вдоль оси 2 (D_i^2)
0°	$-w_i^1/2 - X_i^1$	$-w_i^2/2 - X_i^2$
90°	$-w_i^2/2 - X_i^2$	$-w_i^1/2 + X_i^1$
180°	$-w_i^1/2 + X_i^1$	$-w_i^2/2 + X_i^2$
270°	$-w_i^2/2 + X_i^2$	$-w_i^1/2 - X_i^1$

Алгоритм выбора наилучшего варианта ориентации объекта

При решении задачи расстановки объектов необходимо получить по возможности наиболее плотную компоновку. При размещении объекта, особая точка которого не совпадает с его геометрическим центром, за счёт анализа различных вариантов поворота можно найти такой вариант ориентации объекта, при котором получаемая расстановка будет характеризоваться меньшей длиной (высотой). На рис. 4 представлен пример получения компоновки меньшей длины при повороте размещаемого объекта с номером 2 на угол 180°.

Реализованный эвристический алгоритм выбора наилучшего варианта размещения для каждого объекта i выполняет следующие шаги.

Шаг 1. Установить порядковый номер $k := 1$ варианта ориентации объекта (каждому порядковому номеру k соответствует единственный

вариант ориентации объекта из следующего набора: 0°, 90°, 180°, 270°). Установить номер наилучшего варианта ориентации $k^* := 1$.

Шаг 2. Применить к объекту вариант ориентации k, после чего разместить объект в контейнере. Определить габаритные размеры $\{H_{i,k}^1, H_{i,k}^2\}$ прямоугольника, описанного вокруг полученной расстановки. Если $k > 1$, то задать $k^* := k$ при выполнении условия $H_{i,k}^{L^1} < H_{i,k^*}^{L^1}$ или $\left(H_{i,k}^{L^1} = H_{i,k^*}^{L^1}\right) \wedge \left(H_{i,k}^{L^2} < H_{i,k^*}^{L^2}\right)$ (здесь $L = \{L^1, L^2\}$ – приоритетный список выбора координатных осей контейнера, определяющий направление формирования расстановки [17]).

Шаг 3. Увеличить порядковый номер варианта ориентации $k := k + 1$. Если значение k не превышает максимальное число вариантов ориентации для размещаемого объекта i, то повторить шаг 2, иначе применить к этому объекту вариант ориентации k^* и завершить работу алгоритма.

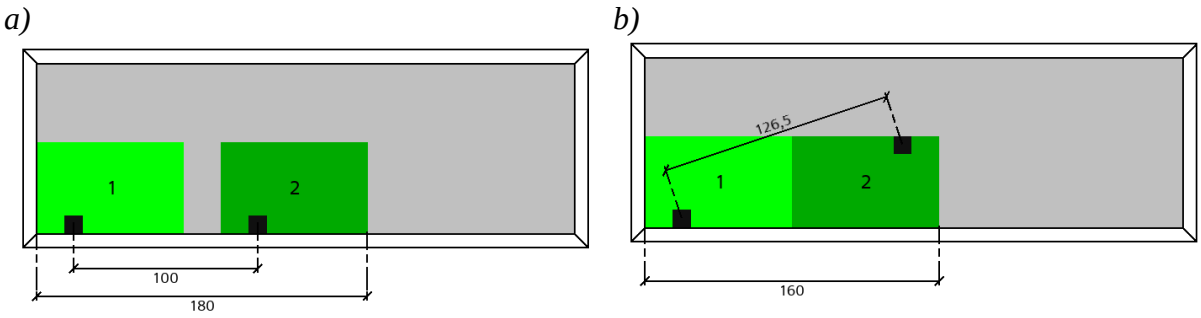


Рис. 4. Пример получения более плотной компоновки объектов:
a) исходное размещение объектов; *b)* более компактный вариант размещения объектов при соблюдении минимального расстояния (100) между особыми точками

Результаты

На рис. 5 представлены примеры компоновки объектов, полученные при различных значениях минимального расстояния между особыми точками объектов.

Примеры применения предложенного алгоритма выбора наилучшего варианта ориентации объекта при расстановке с учётом особых точек представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что данный алгоритм обеспечивает получение более плотной компоновки (в сравнении с результатами, показанными на рис. 5).

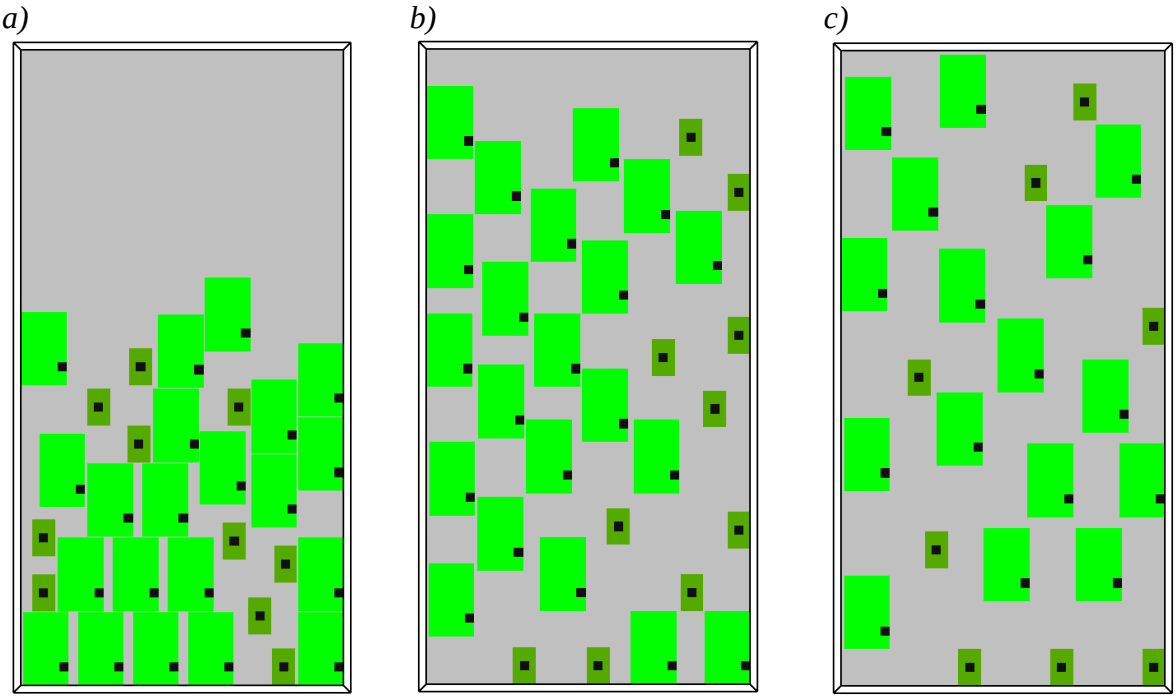


Рис. 5. Примеры компоновки объектов с различными значениями минимального расстояния, заданного между особыми точками:
a) минимальное расстояние между особыми точками равно 60; *b)* минимальное расстояние между особыми точками равно 80; *c)* минимальное расстояние между особыми точками равно 100

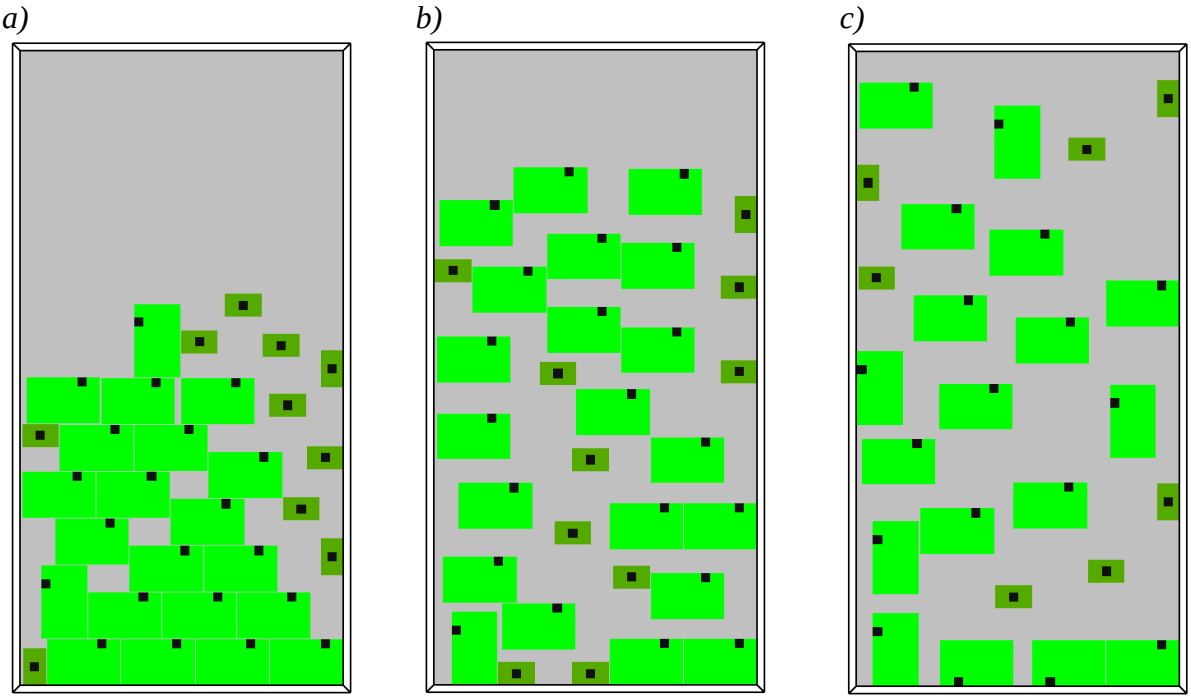


Рис. 6. Примеры компоновки объектов при выборе наилучшего варианта ориентации размещаемого объекта:
a) минимальное расстояние между особыми точками равно 60; *b)* минимальное расстояние между особыми точками равно 80; *c)* минимальное расстояние между особыми точками равно 100

Обсуждение

Разработанный алгоритм расстановки обеспечивает размещение объектов, для каждого из которых возможно задание индивидуального расположения особой точки, а также индивидуального значения минимальной дистанции до особых точек других объектов.

Предложенный алгоритм расстановки позволяет решать задачи оптимизированного размещения наборов прямоугольных объектов, для которых задано дополнительное технологическое ограничение по минимальному расстоянию между указанными особыми точками объектов, что актуально при обеспечении пожаробезопасности хранимой на складах контейнеров, проектировании электронных компонентов с тепловыми и электромагнитными ограничениями, а также при решении ряда других полезных на практике задач компоновки.

Заключение

Разработан алгоритм расстановки, учитывающий технологические ограничения по минимальному расстоянию между особыми точками размещаемых объектов.

С целью минимизации плотности компоновки, получаемой с учётом ограничений, накладываемых особыми точками размещаемых объектов, предложен алгоритм выбора наиболее подходящего варианта ортогональной ориентации прямоугольного объекта, обеспечивающий быстрое формирование плотной компоновки без применения многопроходных метаэвристических алгоритмов оптимизации.

Реализованный алгоритм расстановки объектов с учётом ограничений, задаваемых особыми точками, обеспечивает размещение только прямоугольных объектов, рёбра которых параллельны координатным осям пространства размещения. При этом актуальным направлением развития исследований является разработка усовершенствованного алгоритма расстановки, учитывающего ограничения, накладываемые особыми точками объектов сложной геометрии [19–21], задаваемых ортогональными многогранниками, а также применимого для оптимизированной расстановки объектов, ориентированных под произвольными углами.

Исследование выполнено в рамках научной программы национального центра физики и математики, направление №9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Валиахметова Ю.И., Филиппова А.С. Теория оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича в задачах раскроя-упаковки: обзор и история развития методов решения // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18. № 1 (62). С. 186-197.

[2] Alvarez-Valdes R., Carravilla M.A., Oliveira J.F. Cutting and packing. Handbook of Heuristics. Springer, Cham. 2018. pp. 931-977.

[3] Johnson D.S. A brief history of NP-completeness, 1954–2012. Documenta Mathematica. 2012. Extra Volume ISMP. pp. 359-376.

[4] Кротова Н.А., Пушков Р.Л. Определение геометрических параметров и ориентации заготовки на станке с применением алгоритмов технического зрения // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 2 (57). С. 8-12.

[5] Pinto M., Silva C., Thürer M., Moniz S. Nesting and scheduling optimization of additive manufacturing systems: Mapping the territory. Computers & Operations Research. 2024. pp. 106592.

[6] Júnior A.N., Silva E., Francescatto M., Rosa C. B., Siluk J. The rectangular two-dimensional strip packing problem real-life practical constraints: A bibliometric overview. Computers & Operations Research. 2022. Vol. 137. pp. 105521.

[7] Gajda M., Trivella A., Mansini R., Pisinger D. An optimization approach for a complex real-life container loading problem. Omega. 2022. Vol. 107. pp. 102559.

[8] Ермолов И.Л., Собольников С.А. Решение задачи распределения группы мобильных роботов для обеспечения работы подвижной коммуникационной сети // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 4. С. 126-129.

[9] Fang H., Xu M., Chen X., Lo S.M., Wan M.P. Development of a Performance-Based Approach for Optimizing Sensor Placement in Building Fire Detection. Fire Technology. 2025. pp. 1-28. https://doi.org/10.1007/s10694-025-01721-1.

[10] Onal S., Zhu W., Das S. Order picking heuristics for online order fulfillment warehouses with explosive storage. International Journal of Production Economics. 2023. Vol. 256. pp. 108747.

[11] Guo B., Zhang Y., Hu J., Li J., Wu F., Peng Q., Zhang Q. Two-dimensional irregular packing problems: A review. Frontiers in Mechanical Engineering. 2022. Vol. 8. pp. 966691.

[12] Chugaia A., Alyokhina S., Zhuravka A. Mathematical aspects of optimal layout problem of spent nuclear fuel containers on the storage site. Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics. 2022. Vol. 15. No. 3-4. pp. 85-99.

[13] Lau J.H. Recent advances and trends in advanced packaging. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 228-252.
[14] Kumar Y., Deep K. Positioning of new mobile tower using Circle Packing Problem. Evolutionary Intelligence. 2024. Vol. 17. No. 5. pp. 3241-3268.
[15] Чеканин В.А., Чеканин А.В. Развитие алгоритмов расстановки плоских объектов с учётом специфики реальных задач компоновки // Современное машиностроение. Наука и образование. 2024. № 13. С. 458-472.
[16] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Deleting objects algorithm for the optimization of orthogonal packing problems. Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing. 2017. pp. 27-35.
[17] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Algorithms for management objects in orthogonal packing problems. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 13. pp. 8436-8446.
[18] Чеканин В.А. Алгоритмы размещения и удаления ортогональных многогранников произвольной размерности в задачах раскроя и упаковки // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 3 (50). С. 77-81.
[19] Е Вин Тун, Маркин Л.В. Построение рецепторных геометрических моделей объектов сложных технических форм // Геометрия и графика. 2019. № 7 (4). С. 44-56.
[20] Leao A.A., Toledo F.M., Oliveira J.F., Carravilla M.A., Alvarez-Valdés R. Irregular packing problems: a review of mathematical models. European Journal of Operational Research. 2020. Vol. 282. No. 3. pp. 803-822.
[21] Lamas Fernandez C., Bennell J., Martinez Sykora A. Voxel-Based Solution Approaches to the Three-Dimensional Irregular Packing Problem. Operations Research. 2021. pp. 1-20.

V.A. Chekanin[1,2], A.V. Chekanin[1]

DEVELOPMENT OF A PLACEMENT ALGORITHM THAT TAKES INTO ACCOUNT THE CONSTRAINTS ON THE MINIMUM DISTANCE BETWEEN SPECIAL POINTS OF RECTANGULAR OBJECTS

[1]Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia;
[2]V.A. Trapeznikov Instutute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Russia.

Abstract

The paper considers the problem of optimized placement of flat rectangular objects, for which, in addition to the basic geometric and technological constraints applied to the generated arrangement, a constraint on the minimum distance between pre-selected special points of objects is additionally set. Based on the model of potential containers, an algorithm intended for placing rectangles is developed, taking into account individual constraints on the minimum distance between special points of objects. A heuristic algorithm for choosing the best orthogonal orientation of rectangular objects to minimize the density of the generated placement scheme is proposed. Examples of solving some particular problems of arrangement with various constraints on the minimum distance specified between special points of objects are presented.

Key words: packing problem, layout, model of potential containers, special points.

REFERENCES

[1] Valiakhmetova Y.I., Filippova A.S. Theory of optimum resource utilization by L.V. Kantorovich in cutting-packing problems: overview and history of development of solving methods. Vestnik UGATU. 2014. Vol. 18. No. 1(62). pp. 186-197. (rus.)
[2] Alvarez-Valdes R., Carravilla M.A., Oliveira J.F. Cutting and packing. Handbook of Heuristics. Springer, Cham. 2018. pp. 931-977.
[3] Johnson D.S. A brief history of NP-completeness, 1954–2012. Documenta Mathematica. 2012. Extra Volume ISMP. pp. 359-376.
[4] Krotova N.A., Puskov R.L. Determination of geometric parameters and orientation of the workpiece inside the machine-tool using computer-vision algorithms. Vestnik MSTU «STANKIN». 2021. No. 2 (57). pp. 8-12. (rus.)

[5] Pinto M., Silva C., Thürer M., Moniz S. Nesting and scheduling optimization of additive manufacturing systems: Mapping the territory. Computers & Operations Research. 2024. pp. 106592.
[6] Júnior A.N., Silva E., Francescatto M., Rosa C. B., Siluk J. The rectangular two-dimensional strip packing problem real-life practical constraints: A bibliometric overview. Computers & Operations Research. 2022. Vol. 137. pp. 105521.
[7] Gajda M., Trivella A., Mansini R., Pisinger D. An optimization approach for a complex real-life container loading problem. Omega. 2022. Vol. 107. pp. 102559.
[8] Ermolov I.L., Sobolnikov S.A. Planning of mobile robots' deployment for functioning of mobile communication network. Vestnik MSTU «STANKIN». 2012. Vol. 4. pp. 126-129. (rus.)
[9] Fang H., Xu M., Chen X., Lo S.M., Wan M.P. Development of a Performance-Based Approach for Optimizing Sensor Placement in Building Fire Detection. Fire Technology. 2025. pp. 1-28. https://doi.org/10.1007/s10694-025-01721-1.
[10] Onal S., Zhu W., Das S. Order picking heuristics for online order fulfillment warehouses with explosive storage. International Journal of Production Economics. 2023. Vol. 256. pp. 108747.
[11] Guo B., Zhang Y., Hu J., Li J., Wu F., Peng Q., Zhang Q. Two-dimensional irregular packing problems: A review. Frontiers in Mechanical Engineering. 2022. Vol. 8. pp. 966691.
[12] Chugaia A., Alyokhina S., Zhuravka A. Mathematical aspects of optimal layout problem of spent nuclear fuel containers on the storage site. Journal of Numerical Analysis, Industrial and Applied Mathematics. 2022. Vol. 15. No. 3-4. pp. 85-99.
[13] Lau J.H. Recent advances and trends in advanced packaging. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 228-252.
[14] Kumar Y., Deep K. Positioning of new mobile tower using Circle Packing Problem. Evolutionary Intelligence. 2024. Vol. 17. No. 5. pp. 3241-3268.
[15] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Development of algorithms for placement of flat objects taken into account the specifics of real layout problems // Modern mechanical engineering: Science and education. 2024. Vol. 13. P. 458-472. (rus.)
[16] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Deleting objects algorithm for the optimization of orthogonal packing problems // Advances in Mechanical Engineering. Springer International Publishing. 2017. pp. 27-35.
[17] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Algorithms for management objects in orthogonal packing problems. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 13. pp. 8436-8446.

[18] Chekanin V.A. Algorithms for the placing and deleting of orthogonal polyhedrons of arbitrary dimension in the cutting and packing problems. Vestnik MSTU «STANKIN». 2019. Vol. 3. pp. 77-81. (rus.)
[19] E Vin Tun, Markin L.V. Construction of receptor geometric models for objects of complex technical forms. Geometry & Graphics. 2019. Vol 7. No. 4. pp. 44-56. (rus.)
[20] Leao A.A., Toledo F.M., Oliveira J.F., Carravilla M.A., Alvarez-Valdés R. Irregular packing problems: a review of mathematical models. European Journal of Operational Research. 2020. Vol. 282. No. 3. pp. 803-822.
[21] Lamas Fernandez C., Bennell J., Martinez Sykora A. Voxel-Based Solution Approaches to the Three-Dimensional Irregular Packing Problem. Operations Research. 2021. pp. 1-20.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.865.8, 519.711.3
doi:10.18720/SPBPU/2/id-134

Чжан Цзиннянь[1], А.Н. Волков[2], Янь Чуаньчао[3]

МЕТОД СИНТЕЗА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С УЧЁТОМ МИНИМАЛЬНОЙ ОСТАТОЧНОЙ ВИБРАЦИИ



[1]Чжан Цзиннянь,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (906)273-1901, E-mail: niange6666@gmail.com.



[2]Андрей Николаевич Волков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)992-4700, E-mail: volkov-and-1@yandex.ru.



[3]Янь Чуаньчао,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)005-3226, E-mail: ychuanchao@mail.ru.

Аннотация

В работе представлен метод синтеза симметричного прямоугольного закона движения, направленный на минимизацию энергопотребления системы при условии снижения остаточной вибрации за счет регулировки временных параметров. Для достижения этой цели создана модель привода с учетом вибрации, в рамках которой закон прямоугольного движения проанализирован как во временной области, так и в области Лапласа, что позволило установить ограничения для минимизации остаточной вибрации. Задача минимизации энергопотребления была сформулирована как задача смешанного целочисленного нелинейного программирования и эффективно решена с использованием генетического алгоритма со штрафными функциями. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: энергосбережение, оптимизация вибрации, прямоугольный закон движения, генетический алгоритм.

Введение

Планирование траектории движения «точка-точка» является критической задачей в промышленном управлении движением и находит применение в кранах, роботизированных манипуляторах и станках. Текущие исследования в основном сосредоточены на двух целях оптимизации: (1) минимизация энергопотребления для снижения себестоимости и развития экологически чистого производства и (2) сокращение времени движения для повышения производительности. Однако промышленное оборудование часто обладает структурной гибкостью. Оптимизация исключительно для повышения энерго- или временной эффективности может привести к резкому изменению ускорения, вызывающему вредные вибрации. Эти вибрации нарушают точность движений, ухудшают качество продукции и ускоряют износ оборудования, что в итоге сокращает срок его службы. [1-3]

Для решения этой проблемы при проектировании оптимального закона движения необходимо учитывать подавление вибраций и многоцелевую оптимизацию. Существующие методы многоцелевой оптимизации в основном включают настройку нулевой точки движения на полюс вибрации системы, принимая ее в качестве ограничения для минимизации вибрации, а также решение задач минимального общего времени движения или общего потребления энергии путем регулировки времени ускорения и замедления закона движения. Например, в [4] минимальная остаточная вибрация и общее время движения достигаются за счет регулировки профиля графика пути S; в [5] рассматривается снижение энергопотребления и подавление остаточной вибрации при перемещении подвешенных грузов краном. Второй способ заключается в синтезе комплексной целевой функции, которая объединяет обе цели оптимизации (энергопотребление и время работы) и показатели вибрационных характеристик через суммирование весовых функций. Затем решается многокритериальная задача оптимизации с использованием интеллектуальных алгоритмов для синтеза траектории движения, учитывающей энергопотребление или время и подавление вибрации (например, в [6],[7]). Однако эти методы имеют высокую вычислительную сложность и жесткие требования к точности контроллера, что затрудняет их реализацию на промышленном оборудовании с ограниченной производительностью контроллера.

Цель данного исследования — предложить метод синтеза прямоугольного закона движения, которые широко используются и легко реализуются в промышленности [8],[9] для достижения минимального потребления энергии и остаточной вибрации. Подобные исследования уже

проводились и их результаты представлены в [10],[11]. Они имеют два основных ограничения. Во-первых, модели вибрации игнорируют эффект демпфирования упругой системы. Во-вторых, модели потребления энергии основаны на электрических характеристиках входов мехатронной системы, что не позволяет адекватно отразить связь с кинематикой системы.

В данной работе на основе исследований, проведенных в [10],[11] предлагается метод синтеза прямоугольного закона движения для минимизации энергопотребления и подавления остаточной вибрации. Сначала для сценария движения «точка-точка» с симметрией ускорения и замедления определяется безразмерное выражение прямоугольных законов движения. Затем выводится условие минимальной остаточной вибрации пружинно-демпфированной системы в области Лапласа, строится модель энергопотребления на основе механического момента на выходе электромеханической системы, и оптимизационная задача преобразуется в форму смешанного целочисленного нелинейного программирования с ограничениями на минимальную остаточную вибрацию и кинематику. Задача решается генетическим алгоритмом, при этом оптимизируются величина вибраций. Эффективность метода подавления вибраций и оптимизации энергопотребления проверяется с помощью сравнительного моделирования на конкретных примерах.

Методы

I. Безразмерный прямоугольный закон движения.

Прямоугольный закон движения (последующие сокращения в данной работе: Т-образная кривая движения.) — это распространенный метод управления в промышленном производстве, который условно делится на три фазы: ускорение, равномерное движение и замедление. В данном разделе рассматривается симметричное движение для промышленных машин с циклическим движением, где время и ускорения в фазах ускорения и замедления равны. Безразмерный прямоугольный закон движения, представленный в литературе [12],[14], включает выражения для ускорения, скорости и перемещения:

$$\rho''(\alpha,\xi)\begin{cases} \dfrac{1}{\xi(1-\xi)} & 0 \le \alpha \le \xi \\ 0 & \xi < \alpha \le 1-\xi \\ \dfrac{1}{\xi(\xi-1)} & 1-\xi < \alpha \le 1 \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho'' -$ безразмерное ускорение;
$\xi -$ постоянная временного интервала;
$\alpha -$ безразмерное время.

$$\rho'(\alpha,\xi)\begin{cases}\dfrac{\alpha}{\xi(1-\xi)} & 0\le\alpha\le\xi\\ \dfrac{1}{1-\xi} & \xi<\alpha\le 1-\xi\\ \dfrac{1-\alpha}{\xi(1-\xi)} & 1-\xi<\alpha\le 1\end{cases} \quad (2)$$

где $\rho'-$ безразмерная скорость.

$$\rho(\alpha,\xi)\begin{cases}\dfrac{\alpha^2}{2\xi(1-\xi)} & 0\le\alpha\le\xi\\ \dfrac{\xi-2\alpha}{2(\xi-1)} & \xi<\alpha\le 1-\xi\\ \dfrac{(1-\alpha)^2}{2\xi(\xi-1)}+1 & 1-\xi<\alpha\le 1\end{cases} \quad (3)$$

где $\rho-$ безразмерное перемещение.

Для интервала ускорения $\xi = 0.3$, графики ускорения, скорости и перемещения показаны на рис 1.

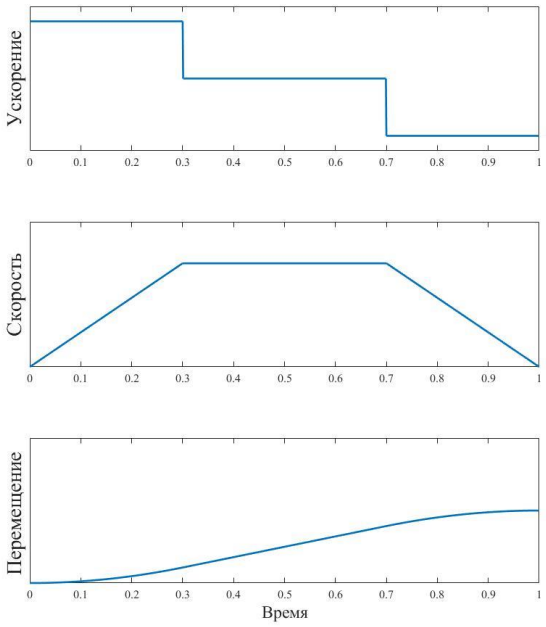


Рис. 1. Графики ускорения, скорости и перемещения от времени для безразмерного прямоугольного закона движения при $\xi = 0.3$

Для того чтобы сгенерировать подходящую Т-кривую, необходимо определить кинематические параметры – перемещение, время, максимальное ускорение, максимальную скорость [x_f, t_f, A_{lim}, V_{lim}]. Кинематические ограничения имеют вид:

$$\mathbf{D1}.\begin{cases} 0 \le A_{max} = \dfrac{1}{\xi(1-\xi)} \cdot \dfrac{x_f}{{t_f}^2} \le A_{lim} \\ 0 \le V_{max} = \dfrac{1}{1-\xi} \cdot \dfrac{x_f}{t_f} \le V_{lim} \\ 0 < \xi \le 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

Кинематическое ограничение **D1** будет использоваться как ограничение последующей системы.

II. Условия минимальной остаточной вибрации.

Гибкая механическая структура, рассматриваемая в данной работе, упрощается до двухмассовой пружинно-демпфированной системы [4], представленной на рис.2. В литературе [13] отмечается, что такая система достаточно хорошо описывает доминирующую динамику большинства объектов. Упрощенная модель включает два жестких тела — базу и гибкое звено, а гибкие свойства реализуются через пружинно-демпфированную структуру между ними.

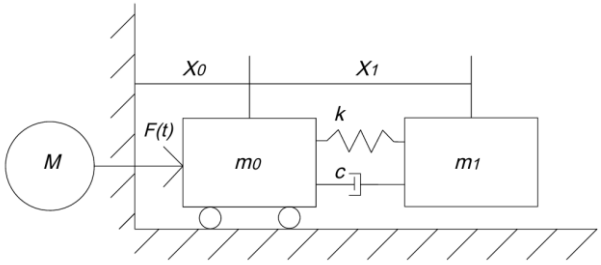


Рис. 2. Двухмассовая пружинно-демпфированная система (*F(t)* – выходной крутящий момент двигателя; $x_0(t)$ – положение базы; $x_1(t)$ – положение гибкой части относительно базы; m_0 – масса базы; m_1 – масса гибкой части; *c* – коэффициент демпфирования пружины; *k* – жесткость пружины)

Кинетическое уравнение может быть представлено в виде:

$$m_1\ddot{x}_0(t) = -m_1\ddot{x}_1(t) - c\dot{x}_1(t) - kx_1(t); \quad (5)$$

$$F(t) = (m_0 + m_1)\ddot{x}_0(t) + m_1\ddot{x}_1(t);$$

или в форме Лапласа

$$\frac{X_1(s)}{X_0(s)} = \frac{-s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2} \quad (6)$$

где $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{m_1 k}}$ – коэффициент демпфирования;

$\omega_n = \sqrt{k/m_1}$ – собственная частота системы.

Если предположить, что основание $x_0(t)$ движется по Т-кривой закона движения (1–3), то выражение Лапласа для профиля ускорения имеет вид

$$s^2 X_0(s) = \frac{\frac{1}{\xi(1-\xi)}(1-e^{-\xi s})(1-e^{-(1-\xi)s})}{s} \tag{7}$$

Из (6) (7) может быть получено выражение в частотной области для гибкой части $X_1(s)$:

$$X_1(s) = \frac{-\frac{1}{\xi(1-\xi)}(1-e^{-\xi s})(1-e^{-(1-\xi)s})}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+{\omega_n}^2)} \tag{8}$$

Ниже рассматривается функционирование системы при различных коэффициентах демпфирования.

Случай 1. Коэффициент демпфирования системы $\zeta = 0$. Колебания, возникающие в системе, становятся незатухающими

$$sX_1(s) = \frac{-\frac{1}{\xi(1-\xi)}(1-e^{-\xi s})(1-e^{-(1-\xi)s})}{(s^2+{\omega_n}^2)} \tag{9}$$

Используя обратное преобразование Лапласа, можно получить:

$$\dot{x}_1(\alpha) = -\frac{1}{\omega_n \xi(1-\xi)}[\sin(\omega_n\alpha)u(\alpha) - \sin\big(\omega_n(\alpha-\xi)\big)u(\alpha-\xi) - \sin\Big(\omega_n\big(\alpha-(1-\xi)\big)\Big)u\big(\alpha-(1-\xi)\big) + \sin\big(\omega_n(\alpha-\xi-(1-\xi))\big)u(\alpha-\xi-(1-\xi))] \tag{10}$$

где u(.)−единичная ступенчатая функция.

Когда $\alpha \geq 1$, $u(.) = 1$.

$$\dot{x}_1(\alpha) = -\frac{1}{\omega_n \xi(1-\xi)}[\sin(\omega_n\alpha) - \sin\big(\omega_n(\alpha-\xi)\big) - \sin\Big(\omega_n\big(\alpha-(1-\xi)\big)\Big) + \sin\big(\omega_n(\alpha-\xi-(1-\xi))\big)] \tag{11}$$

После тригонометрических преобразований (11) можно записать в виде произведения:

$$\dot{x}_1(\alpha) = \frac{4}{\omega_n \xi(1-\xi)}\left[\sin\left(\frac{\omega_n\xi}{2}\right)\sin\left(\frac{\omega_n(1-\xi)}{2}\right)\sin\left(\frac{\omega_n(2\alpha-1)}{2}\right)\right] \tag{12}$$

Для достижения нулевой остаточной вибрации, т. е. $\dot{x}_1(\alpha) = 0 | \alpha \geq 1$, ξ должно удовлетворять следующим условиям:

$$\sin\left(\frac{\omega_n\xi}{2}\right) = 0 \text{ или } \sin\left(\frac{\omega_n(1-\xi)}{2}\right) = 0 \tag{13}$$

Диапазон значений для константы временного интервала ξ:

$$\textbf{D2.} \qquad \xi = \frac{2n\pi}{\omega_n},\ 1-\xi = \frac{2m\pi}{\omega_n}\ (n, m = 1,2,3 \ldots \in Z^+) \tag{14}$$

Случай 2. Коэффициент демпфирования системы $\zeta \neq 0$.
Анализ нулевой точки уравнения (8):

$$X_1(s) = \frac{-\frac{1}{\xi(1-\xi)}(1-e^{-\xi s})(1-e^{-(1-\xi)s})}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+{\omega_n}^2)} = 0 \quad (15)$$

Нулевая точка соответствует условиям:

$$1-e^{-\xi s}=0 \text{ или } 1-e^{-(1-\xi)s}=0 \quad (16)$$

Решение (16) имеет вид:

$$s=\frac{j2n\pi}{\xi} \text{ или } s=\frac{j2m\pi}{1-\xi}\ (n,m=1,2,3\ldots \in Z^+) \quad (17)$$

То есть нули являются чисто мнимыми и лежат на мнимой оси.
Полюса системы (6) определяются выражением

$$s=-\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (18)$$

Действительная часть полюса системы не равна нулю $-\zeta\omega_n \neq 0$. В этот момент не существует действительного числа ξ , при котором нули совпадают с полюсами. Поэтому, когда $\zeta \neq 0$, невозможно полностью устранить остаточную вибрацию, поскольку не произойдет идеального подавления нулевой точки. Для получения оптимальной кривой движения нулевую точку следует расположить максимально близко к полюсу, что позволит добиться наилучшего эффекта подавления вибрации. Во временной области это выражается как нахождение минимальной скорости движения гибкой части в момент окончания движения $\mathbf{min}|\dot{x}_1(\alpha)||_{\alpha \geq 1}$.

При $\zeta \neq 0$, $\alpha \geq 1$ обратное преобразование Лапласа уравнения (8) имеет вид:

$$\dot{x}_1(\alpha)=-\frac{e^{-\zeta\omega_n\alpha}}{\omega_d\xi(1-\xi)}[\sin(\omega_d\alpha)-e^{\zeta\omega_n\xi}\sin\big(\omega_d(\alpha-\xi)\big)- \quad (19)$$
$$e^{\zeta\omega_n(1-\xi)}\sin\Big(\omega_d\big(\alpha-(1-\xi)\big)\Big)+e^{\zeta\omega_n}\sin\big(\omega_d(\alpha-\xi-(1-\xi))\big)]$$

где $\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

После тригонометрических преобразований можно получить условие минимальной остаточной вибрации **D3**

$$\textbf{D3.}\ \min\ |\dot{x}_1(\alpha)|=\frac{-e^{-\zeta\omega_n\alpha}}{\omega_d\xi(1-\xi)}\cdot R\cdot\sin(\omega_d\alpha+\phi) \quad (20)$$

где $R=\sqrt{A^2+B^2}$; $\phi=\arctan(\frac{B}{A})$;

A=$1-e^{\zeta\omega_n\xi}\cos(\omega_d\xi)-e^{\zeta\omega_n(1-\xi)}\cos(\omega_d(1-\xi))+e^{\zeta\omega_n}\cos(\omega_d)$;

B=$e^{\zeta\omega_n\xi}\sin(\omega_d\xi)+e^{\zeta\omega_n(1-\xi)}\sin(\omega_d(1-\xi))-e^{\zeta\omega_n}\sin(\omega_d)$.

III. Энергопотребление системы.

В данной работе модель энергопотребления системы строится на основе кинематических характеристик исполнительного механизма, а в качестве показателя оценки энергопотребления используется механическая энергия. В работе [14] предложено следующее выражение относительной (безразмерной) мгновенной мощности:

$$\eta(\alpha, \xi, \kappa, p) = \rho'(\alpha, \xi)[\rho''(\alpha, \xi)(p + 1 + k) + (1 - k)K_g] \quad (21)$$

где p − коэффициент приведения момента инерции ротора двигателя или линейной массы для цилиндров к выходному звену механизма или машины;

к − коэффициент (степень) уравновешивания вертикально перемещающихся масс; он определяется отношением приведенной массы противовеса к приведенной массе вертикально перемещающихся частей механизма или машины;

K_g − коэффициент, характеризующий динамичность (быстродействие системы), который определяется формулой. $K_g = \frac{g\, t_f^2}{x_f}$

g −ускорение свободного падения.

Энергопотребление системы можно записать как интеграл мгновенной мощности по времени движения с выражением безразмерной величины:

$$P(\alpha, \xi, \kappa, p) = \int_0^1 \eta(\alpha, \xi, \kappa, p)\, d\alpha \quad (22)$$

Очевидно, что общий расход энергии связан с коэффициентом временного интервала ξ, когда базовая часть пружинно-демпфированной системы движется в соответствии с T - кривой движения (1)(2).

IV. Решение и алгоритма.

В целом, задача минимизации потребления энергии и остаточной вибрации для T-образного кривой движения сводится к определению временного интервала ξ, который минимизирует функцию потребления энергии (22). При этом учитываются кинематические параметры системы $[x_f,\ t_f,\ A_{lim},\ V_{lim},\ \zeta,\ \omega_n,\ m,\ p,\ k,\ Kg]$, кинематические ограничения **D1** и ограничения на минимальную остаточную вибрацию **D2** или **D3.**.

Преобразование к **математической задаче 1** при коэффициенте демпфирования $\zeta = 0$.

MIN

$$\mathrm{P}(\alpha,\xi,\kappa,p)=\int_0^1 \eta(\alpha,\xi,\kappa,p)\,d\alpha \tag{23}$$

S.T.

$$\textbf{D1.}\begin{cases} 0\le A_{max}=\dfrac{1}{\xi(1-\xi)}\cdot\dfrac{x_f}{{t_f}^2}\le A_{lim} \\ 0\le V_{max}=\dfrac{1}{1-\xi}\cdot\dfrac{x_f}{t_f}\le V_{lim} \\ 0<\xi\le 0.5 \end{cases}$$

D2. $\xi=\frac{2n\pi}{\omega_n}$, $1-\xi=\frac{2m\pi}{\omega_n}$ n, m=1,2,3…. $(n,m\in Z^+)$

Преобразование к **математической задаче 2** при коэффициенте демпфирования $\zeta\neq 0$;

MIN

$$\mathrm{P}(\alpha,\xi,\kappa,p)=\int_0^1 \eta(\alpha,\xi,\kappa,p)\,d\alpha \tag{24}$$

S.T.

$$\textbf{D1.}\begin{cases} 0\le A_{max}=\dfrac{1}{\xi(1-\xi)}\cdot\dfrac{x_f}{{t_f}^2}\le A_{lim} \\ 0\le V_{max}=\dfrac{1}{1-\xi}\cdot\dfrac{x_f}{t_f}\le V_{lim} \\ 0<\xi\le 0.5 \end{cases}$$

D3. min $|\dot{x}_1(\alpha)|=\frac{-e^{-\zeta\omega_n\alpha}}{\omega_d\xi(1-\xi)}\cdot R\cdot\sin(\omega_d\alpha+\phi)$

Очевидно, что **математическая задача 1** представляет собой задачу смешанного целочисленного нелинейного программирования（Mixed-Integer Nonlinear Programming）. Для точных вычислений небольшого масштаба ее можно решить с помощью таких методов, как метод ветвей и границ （Branch-and-Bound）и внешнее приближение (Outer Approximation). При $t_f\gg\frac{2\pi}{\omega_n}$ алгоритмы искусственного интеллекта могут более эффективно справляться с вычислительными задачами высокой сложности. В данной работе мы используем генетический алгоритм со штрафной функцией, основанный на решателе MATLAB, для быстрого решения задачи. Этот метод продемонстрировал хорошие результаты в работах. [15-17]

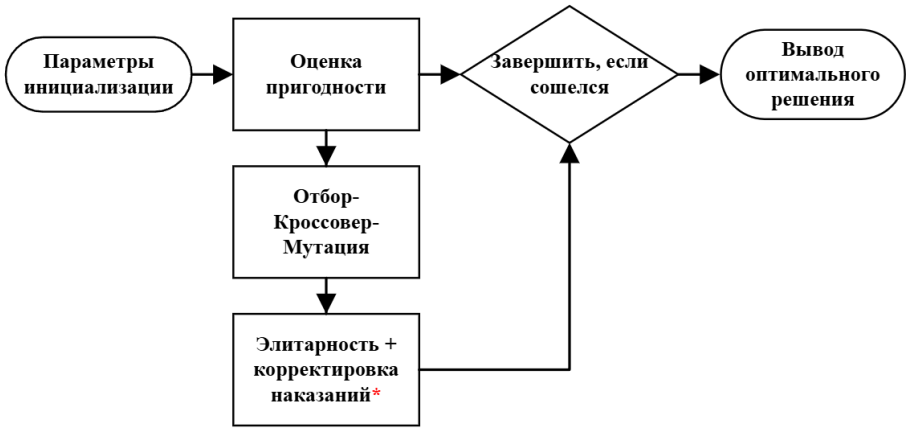
Генетические алгоритмы со штрафными функциями подходят для решения задач ограниченной оптимизации. На основе генетического алгоритма задача ограниченной оптимизации преобразуется в задачу безусловной взвешенной многокритериальной оптимизации. Степень нарушения ограничений интегрируется в целевую функцию через функцию штрафа, направляя популяцию к достижению допустимой области. Функция штрафа по сути является взвешенной функцией.

Для решения **математической задачи 2** в данной работе сначала используется широко распространенный метод численной оптимизации «метод сеточного поиска» (Grid Search Method) [18]. Для нахождения всех ξ, удовлетворяющих условиям оптимизации, преобразуются ограничения **D3** в дискретный набор ограничении $\xi = [\xi_1; \xi_2; \cdots \xi_n]$, и, наконец, для поиска оптимального решения используется тот же генетический алгоритм со штрафной функцией, о котором говорилось выше.

Из-за ограничений по объему здесь показана только основная часть алгоритма:

Основной алгоритм решения математических задач 1 и 2

Общий процесс генетического алгоритма



**Построение функции пригодности и штрафного члена*

Fitness	=	**f(x)**	+	μ_1	**Penalty_ineqality**	+	μ_2	**Penalty_eqality**
[Функция фитнеса]		[Целевая функция **min** $P(\xi)$]		[Динамический штрафной фактор]	[Степень нарушения неравенства ограничения **D1**]		[Динамический штрафной фактор]	[Степень нарушения неравенства ограничения **D2**]

*Обработка ограничения **D3** в **математической задаче 2***

Ограничение **D3**	→	Коллекция решений, полученных методом сеток $\xi_{\text{Допустимый}} = [\xi_1; \xi_2; \cdots \xi_n]$	→	Пройти допустимое решение $\xi_{\text{Допустимый}}$ и решить **min** $P(\xi)$ при ограничении **D1**

Результаты

V. Пример моделирования.

Для проверки эффективности метода синтеза кривой Т-образного движения в MATLAB проведено несколько имитационных тестов, направленных на сравнение и анализ влияния алгоритма на подавление остаточной вибрации и энергопотребление системы. Параметры моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры моделирования системы

$\mathbf{x_f}$	$\mathbf{t_f}$	$\mathbf{A_{lim}}$	$\mathbf{V_{lim}}$	**k**	**p**	$\mathbf{K_g}$	**m**	$\boldsymbol{\omega_n}$
3.5 м	4 с	1 м/с^2	3 м/с	0.5	4	9.81	1 кг	105 ряд/с

Далее сравниваются три Т-кривые движения: **T1** оптимальная по энергопотреблению, основанная на минимизации остаточной вибрации; **T2** оптимальная по энергопотреблению; и **T3** максимальная по энергопотреблению, также основанная на минимизации остаточной вибрации. Сравниваются максимальная мгновенная мощность P_{max} , энергопотребление E , остаточная вибрация V_{Load} (максимальная скорость груза в конце движения $\mathrm{t_f}$) и X_{Load} (максимальная амплитуда груза в конце движения $\mathrm{t_f}$) для случаев без демпфирования ($\zeta = 0$) и с демпфированием ($\zeta = 0.005$). Результаты моделирования обобщены в таблице 2, а свойства различных кривых движения и остаточной вибрации представлены на рис. 3–6.

Таблица 2. Результаты моделирования

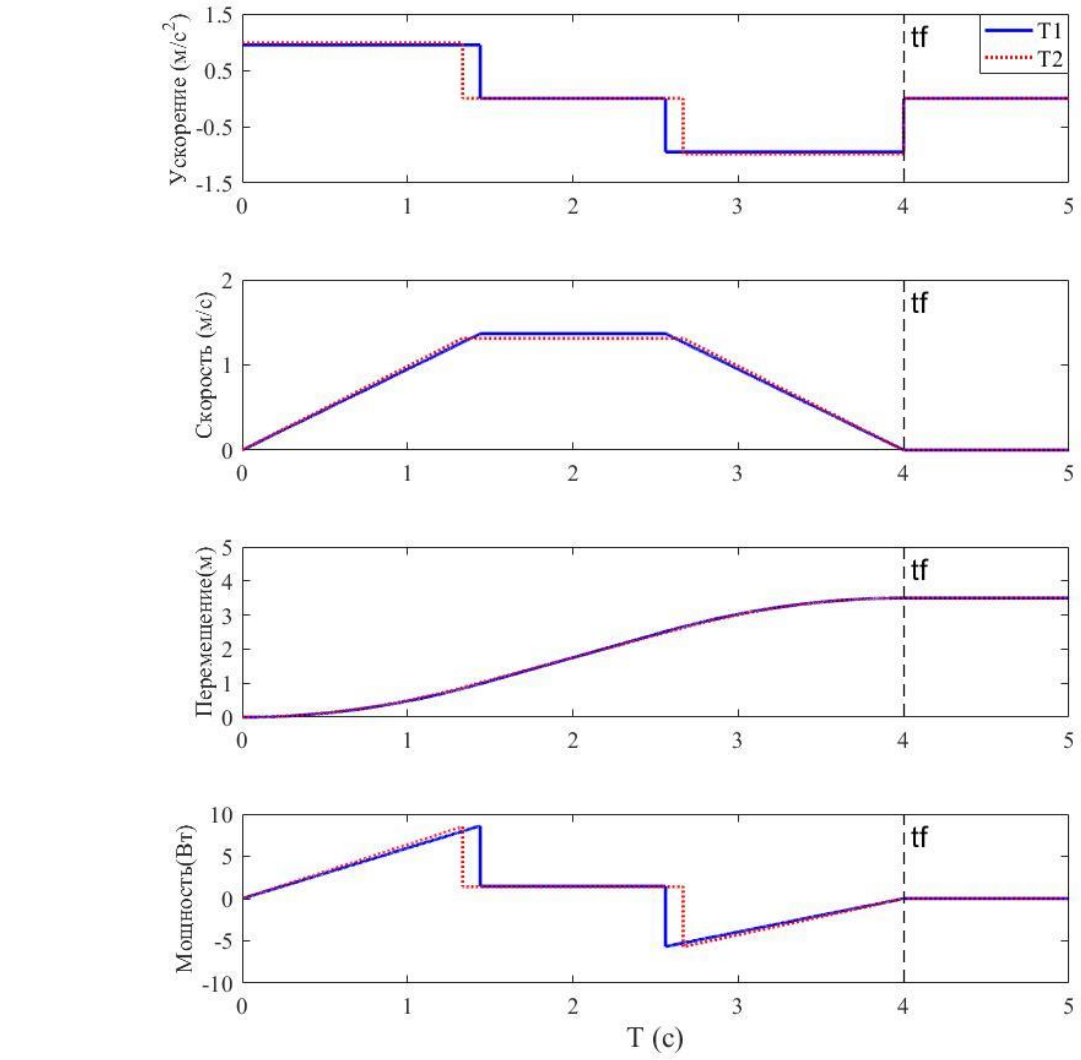
$\boldsymbol{\zeta}$	**Тип**	$\boldsymbol{\xi}$	$\mathbf{A_{max}}$ [м/с^2]	$\mathbf{V_{max}}$ [м/с]	$\mathbf{P_{max}}$ [Вт]	**E** [Дж]	$\mathbf{V_{Load}}$ [м/с]	$\mathbf{X_{Load}}$ [мм]
$\zeta = 0$	T1	0.3600	0.9494	1.3672	8.6039	47.6920	0	0
	T2	0.3333	0.9844	1.3124	8.5116	45.4043	0.0236	0.2256
	T3	0.4800	0.8764	1.6827	9.9143	63.4446	0	0
$\zeta = 0.005$	T1	0.3601	0.9493	1.3674	8.6044	47.7012	0.0045	0.0437
	T2	0.3333	0.9844	1.3124	8.5116	45.4043	0.0180	0.1735
	T3	0.4803	0.8764	1.6837	9.9218	63.5128	0.0063	0.0607

Обсуждение

Алгоритм, предложенный в данной работе, позволяет достичь нулевой остаточной вибрации для сгенерированной кривой движения **T1** в бездемпферной системе ($\zeta = 0$) и минимальной остаточной вибрации в системе с коэффициентом демпфирования ($\zeta = 0.005$). По сравнению с энергооптимальной кривой **T2** общее потребление энергии увеличивается всего на 5.04%, а по сравнению с кривой **T3**, характеризующейся максимальным энергопотреблением, энергопотребление значительно снижается на 24.83%. Таким образом, синтезированная Т-образная кривая движения оптимизирует энергопотребление и обеспечивает минимальную остаточную вибрацию.

Заключение

В данной работе предлагается метод синтеза симметричного прямоугольного закона движения, основанный на оптимизации параметра временного интервала ξ, который может обеспечить минимальную остаточную вибрацию и в то же время минимизировать потребление энергии системой. Для двух рабочих условий - недемпфированной и демпфированной системы, генетический алгоритм используется для быстрой генерации оптимальной Т-кривой движения, а его эффективность проверяется с помощью моделирования. Оптимальные кривые, полученные с помощью этого метода, подходят для промышленных роботизированных систем с простыми структурами контроллеров. В будущих исследованиях метод может быть расширен до оптимальной синтеза сложных законов движения, таких как кривые AS [19] и энергосберегающая кривая движения [12].



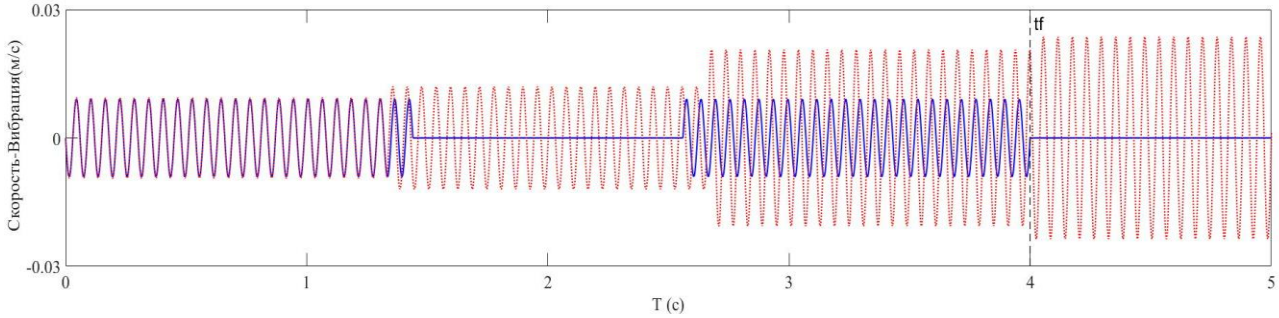
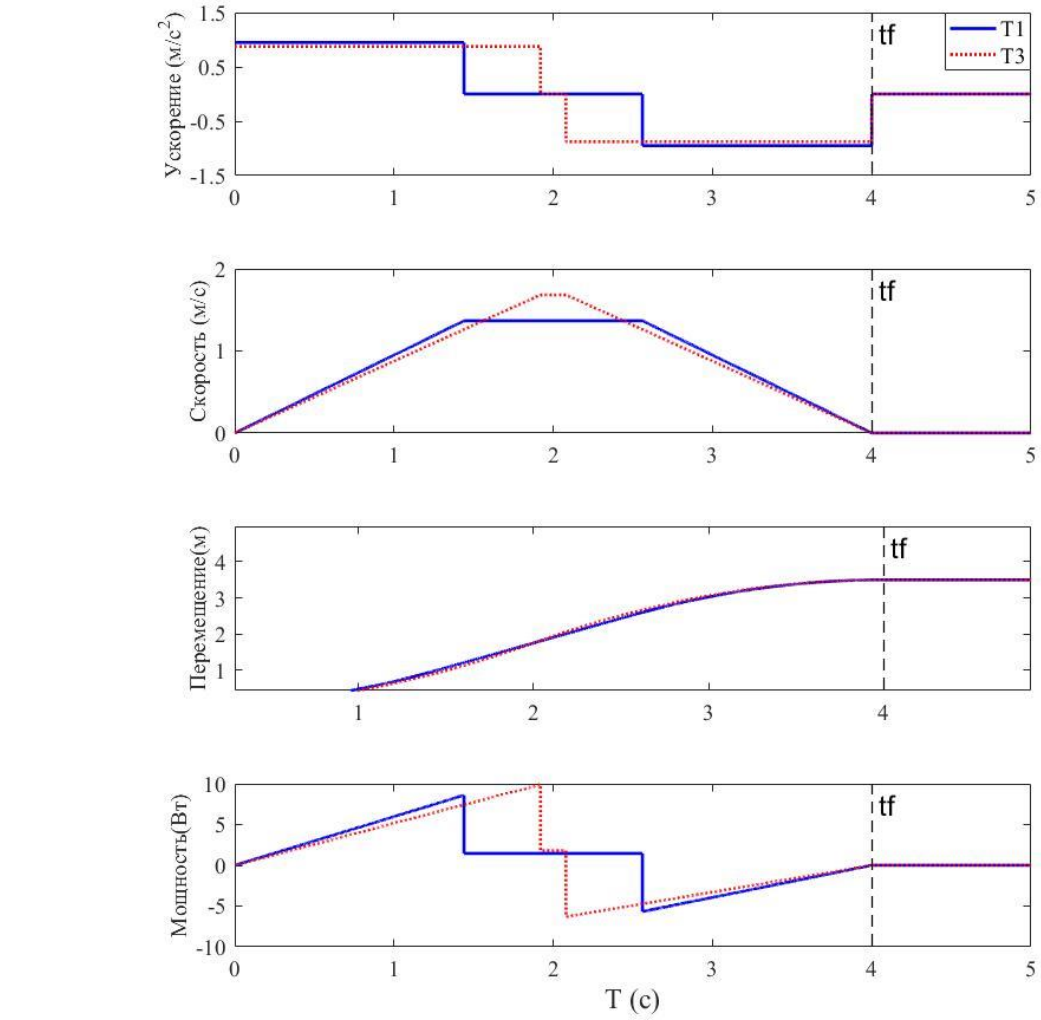


Рис. 3. Сравнение ускорения, скорости, перемещения, мгновенной мощности и вибрации между кривыми движения T1 и T2 без демпфирования $\zeta = 0$



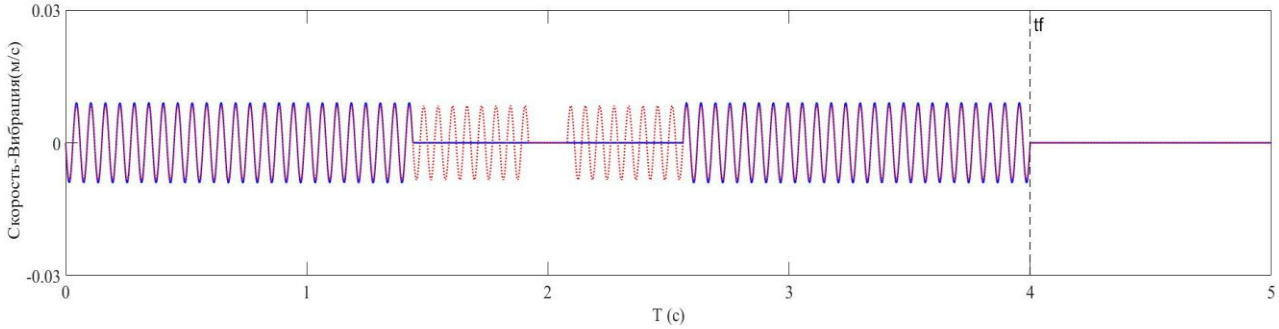


Рис. 4. Сравнение ускорения, скорости, перемещения, мгновенной мощности и вибрации между кривыми движения T1 и T3 без демпфирования $\zeta = 0$

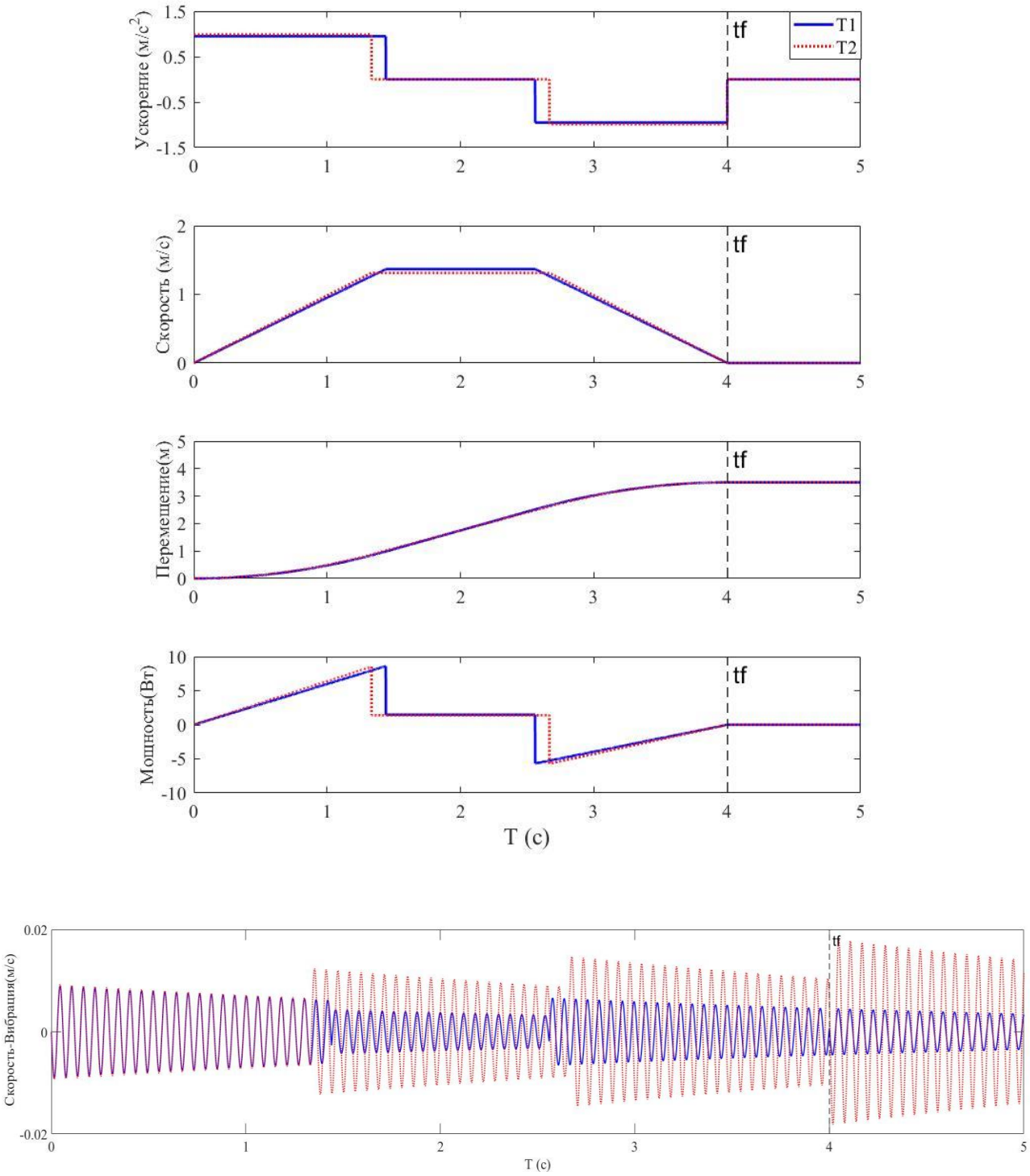


Рис. 5. Сравнение ускорения, скорости, перемещения, мгновенной мощности и вибрации между кривыми движения T1 и T2 с демпфированием $\zeta = 0.005$

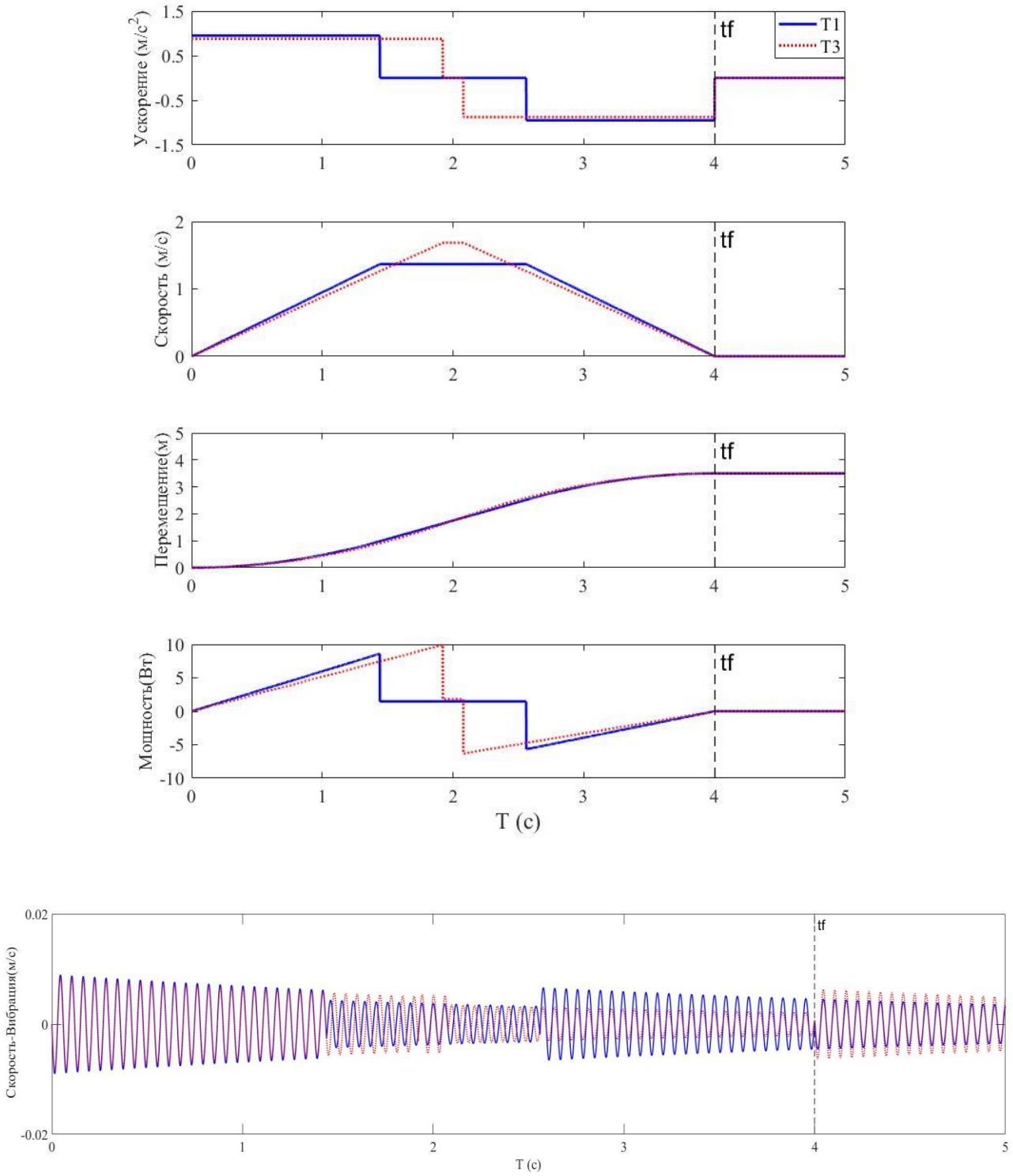


Рис. 6. Сравнение ускорения, скорости, перемещения, мгновенной мощности и вибрации между кривыми движения T1 и T3 с демпфированием $\zeta = 0.005$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] P. H. Meckl and W. P. Seering, "Reducing residual vibration in systems with uncertain resonances," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 73-76.

[2] Singhose W. Command shaping for flexible systems: a review of the first 50 years. International Journal of Precision Engineering Manufacturing, 2009, 10(4):153-168.

[3] Wu J, Tang X, Xin S, et al. Research on the directionality of end dynamic compliance dominated by milling robot body structure and milling vibration suppression[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 85: 102631.

[4] C. -W. Ha, K. -H. Rew, K. -S. Kim and S. Kim, "Tuning the S-curve motion profile in short distance case," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 4975-4980.

[5] H. Takahashi et al., "Optimal Crane Motion Trajectory Generation Considering Energy Saving during Deceleration,"2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Narvik, Norway, 2022, pp. 29-33.

[6] Abe A. An effective trajectory planning method for simultaneously suppressing residual vibration and energy consumption of flexible structures. Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. 2016, 4: 19-27.

[7] F. Assad, E. Rushforth, M. Ahmad, B. Ahmad and R. Harrison, "An Approach of Optimising S-curve Trajectory for a Better Energy Consumption,"2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, Germany, 2018, pp. 98-103.

[8] Пути повышения эффективности функционирования транспортных роботов / А. Н. Волков, А. В. Козлович, О. В. Кочнева, О. Н. Мацко // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 11(137). – С. 30-38.

[9] Мацко, О. Н. Оптимизация законов движения мехатронных приводов автоматизированного оборудования / О. Н. Мацко // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021 : Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 61-65.

[10] H. Chen, H. Mu and Y. Zhu, "Real-time generation of trapezoidal velocity profile for minimum energy consumption and zero residual vibration in servomotor systems," 2016 American Control Conference (ACC), Boston, MA, USA, 2016, pp. 2223-2228.

[11] N. Uchiyama, Y. Honda and S. Sano, "Residual vibration suppression and energy saving in industrial machines using a trapezoidal velocity profile," 2014 American Control Conference, Portland, OR, USA, 2014, pp. 323-328.

[12] Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин: Учебное пособие / А. Н. Волков, А. А. Корнилова, О. Н. Мацко, А. В. Козлович. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – 80 с.
[13] Zhang Yawei, Zhang Weimin. Modeling of the feed drive system based on torsion multi- oscillator. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, 2011:426-429.
[14] Волков Н А, Каледина Д Е, Корнилова А А, et al. Мехатронные приводы роботов и технологических машин. Уравновешивание механизмов[J]. 2021.
[15] Shao Y, Zhou X, Yu T, et al. Pump scheduling optimization in water distribution system based on mixed integer linear programming[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 313(3): 1140-1151.
[16] Liu S, Zhou J, Liang G, et al. Optimizing large-scale hydrogen storage: A novel hybrid genetic algorithm approach for efficient pipeline network design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 66: 430-444.
[17] Wasanapradit T, Mukdasanit N, Chaiyaratana N, et al. Solving mixed-integer nonlinear programming problems using improved genetic algorithms[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28: 32–40.
[18] MathWorks, Global Optimization Toolbox User's Guide (R2024b). 2024. [Электронный ресурс].URL:https://www.mathworks.com/help/gads/
[19] Chang-Wan Ha, K. -H. Rew and K. -S. Kim, "A complete solution to asymmetric S-curve motion profile: Theory & experiments,"2008 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea (South), 2008, pp.

Zhang Jingnian, A.H. Volkov, Yan Chuanchao

METHOD OF SYNTHESIS OF RECTANGULAR LAW OF MOTION OF TECHNOLOGICAL MACHINES FOR MINIMISATION OF ENERGY CONSUMPTION TAKING INTO ACCOUNT MINIMUM RESIDUAL VIBRATION

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This paper presents a method for synthesizing a symmetric rectangular motion law to minimize the system's energy consumption while reducing residual

vibration through timing parameter adjustments. To achieve this objective, a vibration-aware actuator model is established, analyzing the rectangular motion law in both the time and Laplace domains. This analysis enables the imposition of constraints to minimize residual vibration. The energy minimization problem is formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem and efficiently solved using a genetic algorithm with penalty functions. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach.

Key words: energy saving, vibration optimization, rectangular motion law, genetic algorithm.

REFERENCES

[1] P. H. Meckl and W. P. Seering, "Reducing residual vibration in systems with uncertain resonances," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 73-76.

[2] Singhose W. Command shaping for flexible systems: a review of the first 50 years. International Journal of Precision Engineering Manufacturing, 2009, 10(4):153-168.

[3] Wu J, Tang X, Xin S, et al. Research on the directionality of end dynamic compliance dominated by milling robot body structure and milling vibration suppression[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 85: 102631.

[4] C. -W. Ha, K. -H. Rew, K. -S. Kim and S. Kim, "Tuning the S-curve motion profile in short distance case," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 4975-4980.

[5] H. Takahashi et al., "Optimal Crane Motion Trajectory Generation Considering Energy Saving during Deceleration," 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Narvik, Norway, 2022, pp. 29-33.

[6] Abe A. An effective trajectory planning method for simultaneously suppressing residual vibration and energy consumption of flexible structures. Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. 2016, 4: 19-27.

[7] F. Assad, E. Rushforth, M. Ahmad, B. Ahmad and R. Harrison, "An Approach of Optimising S-curve Trajectory for a Better Energy Consumption," 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Munich, Germany, 2018, pp. 98-103.

[8] Ways to improve the efficiency of transport robots / A. N. Volkov, A. V. Kozlovich, O. V. Kochneva, O. N. Matsko // Science and business: development paths. - 2022. - No. 11 (137). - P. 30-38.

[9] Matsko, O. N. Optimization of the laws of motion of mechatronic drives of automated equipment / O. N. Matsko // Innovations and Prospects for the Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2021: Collection of Abstracts of the VIII International Scientific and Practical

Conference, St. Petersburg, April 22–23, 2021. – St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2021. – P. 61–65.
[10] H. Chen, H. Mu and Y. Zhu, "Real-time generation of trapezoidal velocity profile for minimum energy consumption and zero residual vibration in servomotor systems," 2016 American Control Conference (ACC), Boston, MA, USA, 2016, pp. 2223-2228.
[11] N. Uchiyama, Y. Honda and S. Sano, "Residual vibration suppression and energy saving in industrial machines using a trapezoidal velocity profile," 2014 American Control Conference, Portland, OR, USA, 2014, pp. 323-328.
[12] Synthesis of Optimal Energy-Saving Algorithms for Robot Drives and Technological Machines: Tutorial / A. N. Volkov, A. A. Kornilova, O. N. Matsko, A. V. Kozlovich. – St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”, 2023. – 80 p.
[13] Zhang Yawei, Zhang Weimin. Modeling of the feed drive system based on torsion multi- oscillator. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, 2011:426-429.
[14] Volkov N A, Kaledina DE, Kornilova AA, et al. Mechatronic drives of robots and technological machines. Balancing mechanisms[J]. 2021.
[15] Shao Y, Zhou X, Yu T, et al. Pump scheduling optimization in water distribution system based on mixed integer linear programming[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 313(3): 1140-1151.
[16] Liu S, Zhou J, Liang G, et al. Optimizing large-scale hydrogen storage: A novel hybrid genetic algorithm approach for efficient pipeline network design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 66: 430-444.
[17] Wasanapradit T, Mukdasanit N, Chaiyaratana N, et al. Solving mixed-integer nonlinear programming problems using improved genetic algorithms[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, 28: 32–40.
[18] MathWorks, Global Optimization Toolbox User's Guide (R2024b). 2024. [Electronic resource].URL:https://www.mathworks.com/help/gads/
[19] Chang-Wan Ha, K. -H. Rew and K. -S. Kim, "A complete solution to asymmetric S-curve motion profile: Theory & experiments,"2008 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea (South), 2008, pp.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01, 621.08, 32.816-04
doi:10.18720/SPBPU/2/id-135

Янь Чуаньчао[1], А.Н. Волков[2], Чжан Цзиннянь[3], Ши Шуанюань[4]

МЕХАТРОННЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ С ПРУЖИННЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ И ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ



[1]Янь Чуаньчао,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)005-3226, E-mail: ychuanchao@mail.ru.



[2]Андрей Николаевич Волков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)992-4700, E-mail: volkov-and-1@yandex.ru.



[3]Чжан Цзиннянь,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (906)273-1901, E-mail: niange6666@gmail.com.



[4]Ши Шуанюань,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)995-2622, E-mail: bravoshi@yandex.ru.

Аннотация

В работе разработано схемное решение мехатронного пневматического привода с пружинным аккумулятором и гибкими звеньями передаточного механизма. Построена математическая модель, учитывающая конструктивные параметры привода, давление воздуха, алгоритм подкачки энергии, сухое трение в кинематических парах, жесткость пружины и ее предварительную деформацию. Проведен сравнительный анализ быстродействия таких приводов с пружинными аккумуляторами и без них. Верификация математической модели

выполнена на действующем макете. Результаты показали, что применение пружинного аккумулятора и гибкого звена для мехатронных пневматических приводов повышает быстродействие до 26% по сравнению с традиционными пневматическими приводами. Увеличение величины давления воздуха в цилиндре при компенсации энергии, жесткости пружины, радиуса шкива и предварительной деформации пружины повышается быстродействие.

Ключевые слова: быстродействие; компенсации энергии; робототехника; потери энергии, математическая модель, экспериментальный макет

Введение

Мехатронные приводы с пружинными аккумуляторами энергии обладают высоким быстродействием и энергоэффективностью [1-3], что обеспечивается рекуперацией и управляемым высвобождением потенциальной энергии упругих элементов. В работе [4] представлен патент, описывающий систему накопления энергии с использованием полиспаста. Привод включает опорную конструкцию, стальной трос, лебёдку, блок пружин и электроагрегат, совмещающий функции двигателя и генератора. Данный привод отличается высокой гибкостью работы и способностью обеспечивать быстродействие. Чжан Сяофэй и коллеги [5] разработали инновационный трёхзвенный пружинный механизм для прыжков, оснащённый функциями автоматического накопления энергии с последующим ее высвобождением и регулировкой высоты прыжка. Энергия в механизме накапливается путём поэтапного растяжения пружины с использованием стального троса. В сравнении с пневматическими роботами для прыжков, предложенный механизм показывает существенные преимущества в гибкости, практичности и широте возможных областей применения.

При разработке прыгающих роботов с пружинным приводом основным способом компенсации энергии, как показывают исследования [6-10], остаётся использование электродвигателей. В качестве альтернативы рассматриваются решения на базе гидравлических приводов [11], [12], которые показывают эффективность в условиях низкочастотных нагрузок с высокой амплитудой.

В работах [3], [13], [14] рассмотрен быстродействующий мехатронный пневматический привод возвратно-поступательного движения с интегрированным пружинным аккумулятором энергии на базе жёстких элементов. По сравнению с пневматическими приводами без пружинных аккумуляторов, он имеет меньшее запаздывание высвобождение запасенной энергии и меньшие потери. Жавнер М.В. и соавторы в [15], [16] исследовали пружинный энергоаккумулирующий привод на базе

кулисного механизма реализации кругового движения выходного звена. На основе соответствующей математической модели выполнен анализ влияния конструктивных параметров на его быстродействие.

Методы

С целью дальнейшего повышения быстродействия и энергоэффективности предлагается мехатронный привод с пружинным аккумулятором и фиксаторами выходного звена в крайних положениях на базе передаточного механизма с гибкими звеньями, которые соединяют выходное звено и пневматический цилиндр (Рисунок 1). Такое решение значительно снижает потери кинетической энергии выходного звена на неэффективное преобразование в движение других массивных подвижных звеньев. Гибкие звенья передаточного механизма облегчают интеграцию привода в технологических машинах.

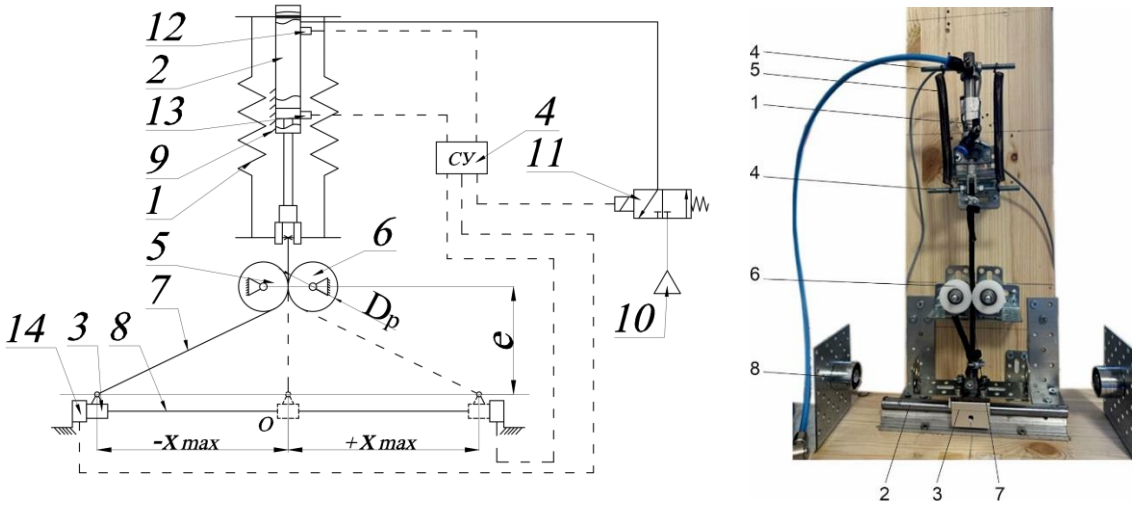


Рис. 1. Схема и экспериментальный макет мехатронного пневматического привода с пружинным аккумулятором и гибкими звеньями на базе передаточного механизма: 1 - пружина растяжения; 2 – пневматический цилиндр; 3 - выходное звено; 4 – система управления; 5,6 – шкив; 7 – гибкий элемент; 8 – направляющая; 9 – основание; 10 - блок подготовки воздуха; 11 – распределитель; 12,13 - датчики положения; 14 - фиксатор

В работе [17] предложены различные алгоритмы компенсации энергии для пружинного аккумулятора, включая компенсацию в начале хода выходного звена, в конце хода, в середине хода, а также в начале и конце хода или компенсацию на протяжении всего движения. В математической модели мехатронного пневматического привода с пружинным аккумулятором и гибкими звеньями в соответствии с его рабочими процессами рассматриваются три этапа функционирования:

1. Выходное звено находится в крайнем положении направляющей, а пружинный аккумулятор находится в состоянии накопления максимальной

потенциальной энергии. После отключения фиксатора выходное звено начинает перемещение вдоль направляющей до её средней точки. На этом этапе подача сжатого воздуха в цилиндр отсутствует. Потенциальная энергия пружины преобразуется в кинетическую энергию выходного звена и других подвижных элементов, а также частично теряется на преодоление сил трения.

2. После прохождения средней точки на направляющей изменяется конфигурация привода. В безштоковую полость цилиндра начинает поступать воздух, а из штоковой полости воздух сбрасывается в атмосферу. Кинетическая энергия выходного звена преобразуется в потенциальную энергию пружинного аккумулятора и потери энергии.

3. Выходное звено достигает заданной точки x_t на направляющей и магнитное кольцо поршня активирует датчик положения. В безштоковую полость цилиндра подаётся воздух с высоким давлением для компенсации потерь энергии, затраченной на преодоление сил трения, пока выходное звено не достигнет конечного положения направляющей. Гибкие звенья работают только растяжения, поэтому преобразование кинетической энергии выходного звена в потенциальную энергию пружины возможно только при условии, что скорость выходного звена превышает скорость других движущихся элементов привода.

Кинетическая энергия системы включает составляющие: выходное звено $E_в$, шток цилиндра $E_ш$, гибкий элемент $E_э$, шкив $E_{шк}$. Формулы для определения кинетической энергии подвижных звеньев привода с гибкими элементами представлены в Таблице 1:

Таблица 1. Формулы для определения кинетической энергии подвижных звеньев

кинетическая энергия выходного звена	$E_в = \frac{m \cdot \dot{x}(t)^2}{2}$,	(1)
где	m – масса выходного звена; $\dot{x}(t)$ – скорость выходного звена.	
кинетическая энергия шкива	$E_{шк} = \frac{I_{шк} \cdot \dot{\alpha}_г(t)^2}{2}$,	(2)
где	$m_{шк}$ – масса шкива; $I_{шк} = m_{шк} \cdot r^2$ – момент инерции шкива; $\dot{\alpha}_г(t)$ – уголовная скорость шкива.	
кинетическая энергия штока цилиндра	$E_ш = \frac{m_ш \cdot \dot{x}_ш(t)^2}{2}$,	(3)
где	$m_ш$ – масса штока; $\dot{x}_ш(t)$ – скорость штока цилиндра.	
кинетическая энергия гибкого элемента	$E_э = \frac{m_э \cdot \dot{x}_э(t)^2}{2}$,	(4)
где	$m_э$ – масса гибкого элемента;	

$\dot{x}_э(t) = \frac{r \cdot e \cdot \dot{x}(t)}{x(t)^2 + e^2}$ – скорость гибкого элемента;

r – радиус шкива;

e - расстояние от оси опорного шарнира до оси направляющей.

Кинетическая энергия в системе

$$E = E_в + E_{шк} + E_ш + E_э, \quad (5)$$

$$E = \frac{m \cdot \dot{x}(t)^2}{2} + \frac{W \cdot r^2 \cdot e^2 \cdot \dot{x}(t)^2}{2 \cdot (x(t)^2 + e^2)^2}, \quad (6)$$

где $W = m_{шк} + m_э + m_ш$.

После двойного дифференцирования по скорости времени кинетической энергии системы можно получить первое слагаемое уравнения Лагранжа

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial \dot{x}}\right) = \ddot{x}(t) \cdot \left[m + \frac{W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^2} - x(t) \cdot \frac{4 \cdot W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^3}\right], \quad (7)$$

Второе слагаемое уравнения Лагранжа имеет вид

$$\frac{dE}{dx} = \dot{x}(t)^2 \cdot \left[- x(t) \cdot \frac{2 \cdot W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^3}\right], \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{dE}{dx} = A_г(x(t)) \cdot \ddot{x}(t) - B_г(x(t)) \cdot \dot{x}(t)^2, \quad (9)$$

$$A_г(x(t))) = m + \frac{W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^2} - x(t) \cdot \frac{4 \cdot W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^3},$$

$$B_г(x(t))) = - x(t) \cdot \frac{2 \cdot W \cdot r^2 \cdot e^2}{(x(t)^2 + e^2)^3}.$$

Текущая деформация пружины $h_г(t)$, согласно рисунку 1, состоит из двух участков: прямолинейного участка OO_1 и участка, где гибкий элемент огибает направляющий ролик с углом охвата $\pi/2$ минус $\alpha_г(t)$. Сила от пружин определяется следующей формулой:

$$F_г(t) = c \otimes h_г(t), \quad (10)$$

где $h_г(t) = \sqrt{(x(t) - r + r \otimes \sin \alpha_г(t))^2 + (e - r \otimes \cos \alpha_г(t))^2} + r \otimes \alpha_г(t) - (e - r \cdot \cos \alpha_г(t)) + s_1$ - деформация пружины;

s_1 – предварительная деформация пружины;

$\alpha_г(t) = -\frac{e \cdot x(t)}{x(t)^2 + e^2}$ – угол между направляющей и гибкими элементами;

$x_t(t)$ – место начала компенсации энергии.

Таким образом, результирующая сила $F_c^г(t, x(t))$, действующая на поршень, включает давление газа с обеих сторон поршня $P(t)$, силу трения между поршнем и стенками цилиндра, усилие от пружинного аккумулятора, а также постоянное сопротивление N в цилиндре.

$$F_c^г(t, x(t)) = F_г(t) + P(t) \cdot sign(x(t)) - N \cdot sign(x(t)) + F_м(x(t)), \quad (11)$$

где $F_м(x(t)$ – сила от электромагнита.

В приводе возникают силы трения, такие как сила трения $F_{нг}(t, x(t))$ между направляющей и выходным звеном, сила трения $F_{ш}(t, x(t))$ между шкивами и гибким элементом, а также сила трения $F_{сг}(t, x(t))$ в шарнирных соединениях между гибким элементом и выходным звеном.

Сила трения в шарнирных соединениях и опоре

$$F_{сг}(t, x(t)) = \frac{F_c^e(t, x(t)) \cdot f_c \cdot e \cdot \dot{x}(t) \cdot d}{2 \cdot (x(t)^2 + e^2)}, \quad (12)$$

где d – диаметр шарнирного соединения;

f_c – коэффициент трения в двух шарнирных соединениях (опора цилиндра и шарнир штока цилиндра).

Сила трения в направляющих возникает из-за взаимодействия суммарной силы и массы выходного звена

$$F_{нг}(t, x(t)) = \left[F_c^e(t, x(t)) \cdot \sin\alpha(t) + m \cdot g \cdot sign(\dot{x}(t))\right] \cdot f_н, \quad (13)$$

где $f_н$ – коэффициент трения в направляющих.

Сила трения $F_{ш}(t, x(t))$ между шкивами и гибким элементом

$$F_{ш}(t, x(t)) = - F_c^e(t, x(t)) \cdot (exp^{-f_{ш} \cdot \alpha_г(t)} - 1), \quad (14)$$

где $f_{ш}$ - коэффициент трения в подшипнике.

Суммарная сила, которая действует на выходное звено

$$Q(t, x(t)) = \begin{cases} F_c^e(t, x(t)) \cdot |\cos\alpha(t)| - F_{сг}(t, x(t)) \cdot \sin\alpha(t) - F_{ш}(t, x(t))) \cdot |\cos\alpha(t)| \\ \qquad - F_{нг}(t, x(t)) \qquad x(t) \in [-x_{max}, x_t(t)] \\ F_{м}(t, x(t)) - F_{нг2}(t, x(t)) \qquad x(t) \in [x_t(t), x_{max}] \end{cases}, \quad (15)$$

Поставляя уравнения (9), (12), (13), (14) в уравнение (15)

$$Q(t, x(t)) = \begin{cases} -\dot{x} \cdot R(x(t)) \cdot S(x(t)) + R(x(t)) \cdot T(x(t)) + R & x(t) \in [-x_{max}, x_t(t)] \\ M_г \cdot \left(\frac{x(t)}{x_{max}}\right)^n - R & x(t) \in [x_t(t), x_{max}] \end{cases}, \quad (16)$$

где $M_г$ – максимальная сила притяжения от электромагнита;

$$R_г(x(t)) = c \cdot (x(t)^2 - 2 \cdot r \cdot |x(t)| + e^2 - |x(t)| \cdot \frac{r \cdot e}{x(t)^2 + e^2} - e +$$

$$s_1) + P(t) \cdot sign(x(t)) - N \cdot sign(x(t)) + \left(e - r \cdot \frac{r \cdot e + (x(t) - r) \cdot \sqrt{x(t)^2 - 2 \cdot r \cdot x(t) + e^2}}{x(t)^2 - 2 \cdot r \cdot x(t) + r^2 + e^2}\right) + M_г \cdot$$

$$\left(\frac{x(t)}{x_{max}}\right)^2];$$

$$S_г(x(t)) = \frac{r \cdot [e - f_2 \cdot (r - x(t))] - (r - x(t) + e \cdot f_2) \cdot \sqrt{x(t)^2 - 2 \cdot r \cdot x(t) + e^2}}{r^2 - 2 \cdot r \cdot x(t) + x(t)^2 + e^2};$$

$$T_г(x(t)) = \frac{r\cdot[e-f_н\cdot(r-x(t))] - (r-x(t) + e\cdot f_н)\cdot\sqrt{x(t)^2 - 2\cdot r\cdot x(t) + e^2}}{r^2 - 2\cdot r\cdot x(t) + x(t)^2 + e^2} +$$

$$exp^{f_ш\boxtimes\frac{e}{x(t)^2 + e^2}}-1)\cdot\left[\frac{r\cdot e + (x(t) - r)\cdot\sqrt{x(t)^2 - 2\cdot r\cdot x(t) + e^2}}{x(t)^2 - 2\cdot r\cdot x(t) + r^2 + e^2}\right]^2;$$

$$C_г=m\cdot g\cdot f_1\cdot sign(\dot{x}(t)).$$

Получим дифференциальные уравнения движения механической системы

$$\begin{cases} A_г(x(t))\cdot\ddot{x}(t)+B_г(x(t))\cdot\dot{x}(t)^2+R(x(t))\cdot S(x(t)))\cdot\dot{x}(t)-R(x(t))\cdot T(x(t))=0 \\ \qquad\qquad x(t)\in[-x_{max},x_t(t)], \\ A_г(x(t))\cdot\ddot{x}(t)+B_г(x(t))\cdot\dot{x}(t)^2-M_г\cdot(\frac{x(t)}{x_{max}})^n+C_г=0 \qquad x(t)\in[x_t(t),\ x_{max}] \end{cases} \quad (17)$$

где $\ddot{x}(t)$ – ускорение выходного звена.

Для определения скорости выходного звена в эксперименте использовалась высокоскоростная камера. Видеоданные импортированы в среду Python, где для преобразования видеопоследовательности применялся специальный алгоритм обработки оптического потока с целью получения информации о скорости движении. Датчики, установленные на цилиндре, передают сигналы в систему управления, которая активирует распределитель, подающий воздух в его рабочую полость.

Результаты

Из-за задержек в передаче и обработке сигналов в эксперименте выбраны пять базовых точек (-0,04 м, -0,03 м, -0,02 м, -0,01 м и 0 м) для сбора данных. Когда выходное звено привода достигает этих точек, датчик положения на корпусе цилиндра фиксирует сигнал. На рисунке 2 показаны графики зависимости скорости выходного звена от времени для различных точек начала компенсации энергии.

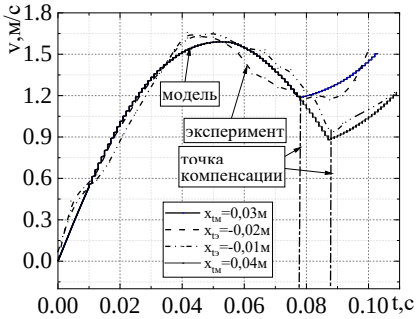


Рис. 2. Графики зависимости скорости выходного звена от времени для различных точек начала компенсации энергии: а –привод с аккумулятором, б – привод без аккумулятора

С помощью математического программного обеспечения Mathcad 2015 проведена симуляция математической работы привода. Сравнение результатов симуляции с экспериментальными данными показало, когда начальная точка компенсации энергии в модели составляет 0,03м, соответствующая позиция в эксперименте равна -0,02м; а когда начальная точка компенсации энергии в модели составляет 0,04м, соответствующая позиция в эксперименте равна -0,01м. Теоретическая модель показывает хорошее согласование с экспериментальными данными при заданных условиях, а отклонение остается в пределах допустимой инженерной погрешности (не более 20%).

Для мехатронного пневматического привода без пружинного аккумулятора энергии на начальном этапе работы сжатый воздух подается в безштоковую полость цилиндра, в результате чего под приводится в движение выходное звено. По достижении определенной точки хода подача сжатого воздуха прекращается, и выходное звено под воздействием инерционных сил продолжает движение до конца рабочего хода. Зависимости времени цикла движения от положения выходного звена в момент начала компенсации энергии для приводов с аккумулятором энергии и без него при одинаковом давлении воздуха в цилиндрах представлена на рисунке 3.

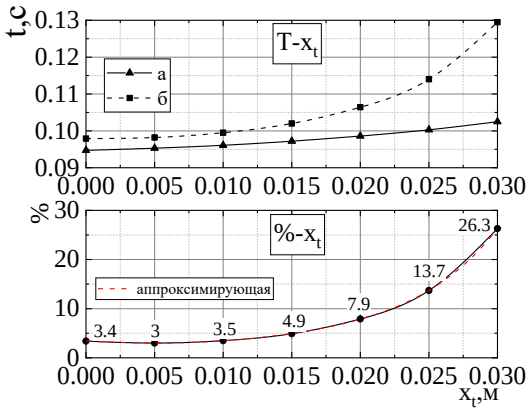


Рис. 3. Графики зависимости быстродействия мехатронного пневматического привода от положения выходного звена в момент начала компенсации энергии: а) привод с аккумулятором, б) привод без аккумулятора

На основании анализа графиков установлено следующее. Во-первых, использование пружинного аккумулятора в мехатронном пневматическом приводе повышает его быстродействие до 26% при различных положениях начала компенсации энергии. Во-вторых, минимальное увеличение быстродействия составляет 3% и имеет место при начале компенсации в одном из крайних положений выходного звена. В-третьих, полученная зависимость имеет параболический характер и хорошо аппроксимируются многочленом пятой степени (с погрешностью менее 2%).

Потери энергии напрямую влияют на быстродействие мехатронного пневматического привода, поэтому их снижение потерь является важным направлением оптимизации схемных решений.

Соотношение между потерями энергии и максимальной потенциальной энергией аккумулятора представляется целесообразным использовать в качестве критерия для оценки энергетических эффективности аккумуляции энергии. В макете привода расчетные потери энергии составляют 26% от потенциальной энергии пружины, фактические превышают это значение не более чем 11% (Рисунок 4).

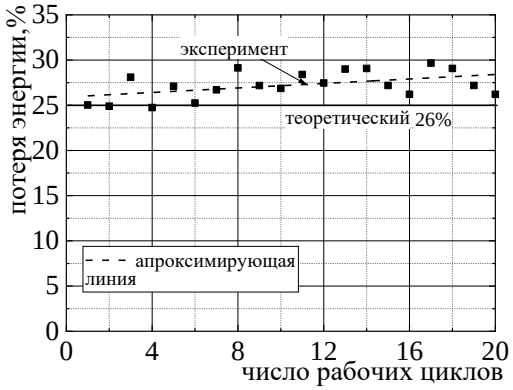
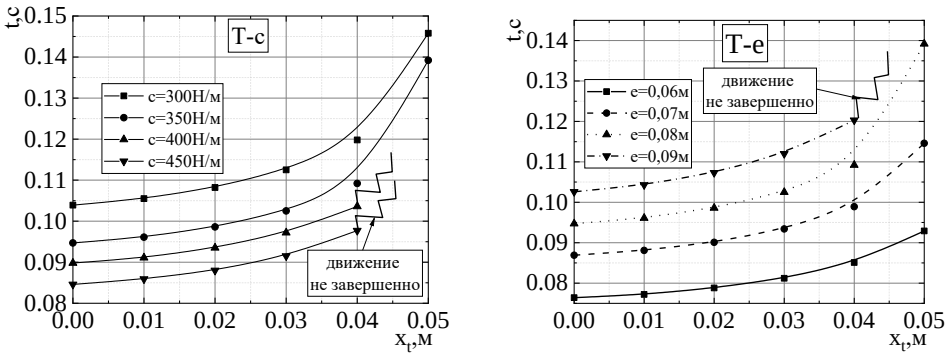


Рис. 4. Процентное соотношение энергетических потерь к максимальной потенциальной энергии пружинного аккумулятора

Быстродействие и энергопотери мехатронного пневматического привода с пружинным аккумулятором энергии на базе передаточного механизма с гибкими звеньями зависят от множества факторов, таких конструктивные параметры e, предварительная деформация пружины s_1, жесткость пружины с и диаметр шкива r. На рисунках 5, 6 представлены результаты анализа влияния каждого из этих параметров, алгоритма компенсации, а также различных типов факторов на быстродействие привода.

a) *b*)



c) *d*)

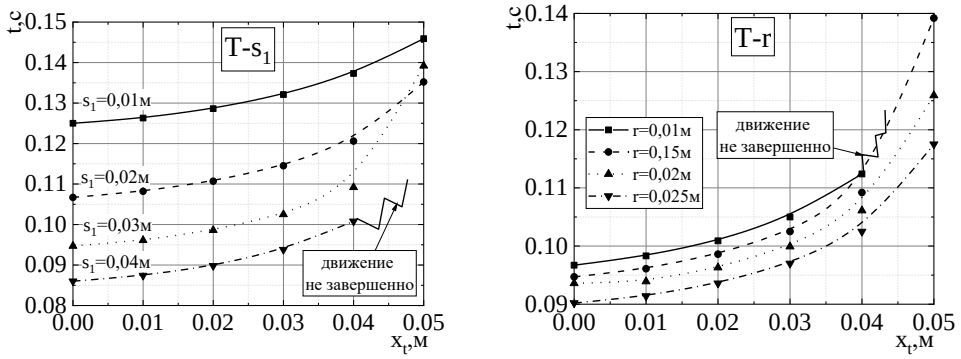


Рис. 5. Графики зависимости быстродействия от положения начала компенсации энергии при различных факторах: a) жесткость; b) конструктивный параметр; c) предварительная деформация; d) радиус шкива

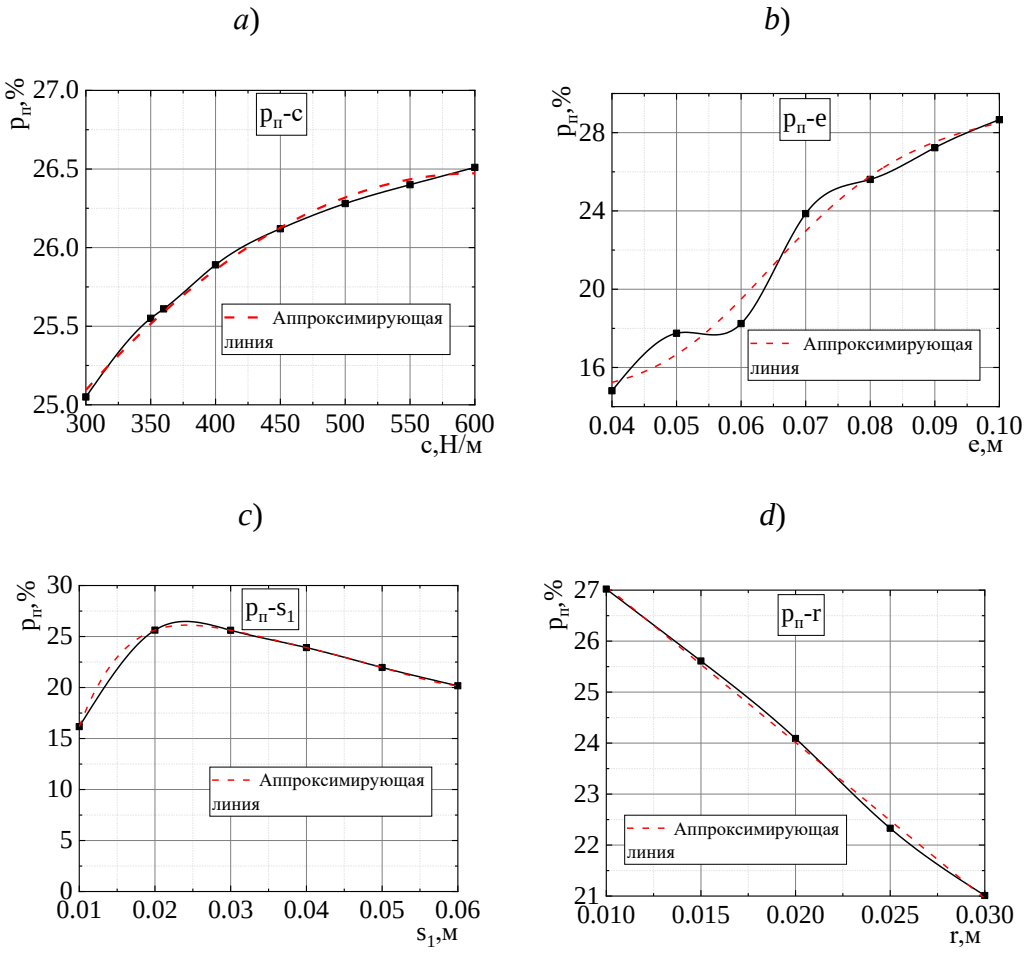


Рис. 6. Графики зависимости доли потерь энергии к потенциальной энергии от значений различных факторов: a) жесткость; b) конструктивный параметр; c) предварительная деформация; d) радиус шкива

Из графиков, приведенных на рисунке 5 показывает, что с увеличением жесткости пружины, предварительной деформации пружины и радиуса шкива быстродействие привода повышается. Анализ графиков (Рисунок 6) позволяет утверждать, что энергопотери возрастают с ростом

жесткости пружины и конструктивного параметра между осью кулисного камнях и направляющих, достигают максимума при величине предварительной деформации пружины и уменьшаются по мере увеличения радиуса шкива.

Обсуждение

Полученные результаты показывают значительное повышение быстродействия мехатронных пневматических приводов за счет интеграции пружинного аккумулятора энергии и гибких передаточных звеньев. Это достижение объясняется рекуперацией энергии, которая компенсирует потери, связанные с трением и инерцией подвижных элементов, а также оптимизацией места подкачки энергии.

Важно отметить, что ключевые конструктивные параметры, такие как жесткость пружины, радиус шкива и предварительная деформация, оказывают нелинейное влияние на энергоэффективность и динамику системы.

Сравнение с существующими решениями [1, 3, 6] показывает, что использование гибких звеньев вместо жестких механизмов позволяет минимизировать массу подвижных частей и упростить интеграцию привода в промышленные системы.

Экспериментальная верификация математической модели подтвердила её адекватность с отклонением не более 20%, что соответствует инженерным требованиям. Расхождения между теорией и экспериментом могут быть связаны с неучтенными динамическими эффектами, такими как вибрации гибких элементов или вариации давления воздуха. Тем не менее, модель служит надежным инструментом для предварительного анализа и оптимизации параметров.

Заключение

В работе разработан и исследован мехатронный пневматический привод с пружинным аккумулятором энергии и гибкими передаточными звеньями. Построена математическая модель, учитывающая конструктивные параметры, давление воздуха и силы трения, показывала высокую точность при экспериментальной проверке.

Оптимизация жесткости пружины, радиуса шкива и предварительной деформации позволяет достичь баланса между быстродействием и энергоэффективностью.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- Изучение влияния температуры на характеристики приводов.
- Разработку адаптивных алгоритмов управления для работы в переменных нагрузочных условиях.

- Внедрение предложенной схемы в промышленные манипуляторы и прыгающих роботов для валидации в реальных сценариях.

Результаты работы вносят вклад в развитие энергоэффективных мехатронных систем и могут быть применены в автоматизации, робототехнике и других областях, где требуются высокоскоростные и точные приводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Чжао В., Жавнер В.Л., Смирнов А.Б., Янь Ч. Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронныхт рекуперативных приводах. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2019. - Т. 25. - № 1. - С. 111-123.

[2] Жавнер В.Л., Мацко О.Н., Пружинные приводы с уравновешиванием для горизонтальных возвратно-поступательных перемещений. М.:Вестник научно-технического развития 2016 № 5, с. 12-17.

[3] Янь Чуаньчао, А.Н. Волков, О.В. Кочнева, О.Н. Мацко Нелинейный пружинный аккумулятор для мехатронных пневматических приводов с рекуперацией энергии. Наука и бизнес: пути развития. - 2024. - № 8. - С. 39-43.

[4] Patent No. CN 109707575A, Int. CI. F03G 1/00(2006.01), F03G 1/02(2006.01), F03G 1/06(2006.01). A system and method for realizing spring energy storage using a pulley block / Wang Dongjun, Wang Shuai, Dong Baoguang, Song Liping, Li Ruihua, Bai Yanbin, Huang Yaoyu, Jian Junqiang, Pu Baoji// 201910075673.6. Application date: 2019.01.25. Application publication date: 2019.05.03.

[5] Zhang Xiaofei, Zhang Yanheng, Sun Hanxu, Jia Qingxuan, Xiao Han. Design and dynamic analysis of a two-wheeled robot capable of jumping. Robotics. 2014.05.

[6] C Hubicki, J Grimes, M Jones, D Renjewski, A Spröwitz, A Abate, J Hurst Atrias: Design and validation of a tether-free 3d-capable spring-mass bipedal robot //The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Т. 35. – №. 12. – С. 1497-1521.

[7] Lo J., Parslew B. Elastic energy storage of spring-driven jumping robots //arXiv preprint arXiv:2311.02188. – 2023.

[8] Shin W. D., Stewart, W., Estrada, M. A., Ijspeert, A. J., & Floreano, D. Elastic-actuation mechanism for repetitive hopping based on power modulation and cyclic trajectory generation //IEEE Transactions on Robotics. – 2022. – Т. 39. – №. 1. – С. 558-571.

[9] 李兴旺, 滕燕, 徐迎 一种基于双稳态驱动器的气动软体四足机器人[J]. // 机器人, 2024, 46(3): 294-304.

[10] Christian Hubicki ATRIAS: Design and validation of atether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot / Christian Hubicki, Jesse Grimes, Mikhail Jones, Daniel Renjewski, Alexander Spröwitz, Andy Abate1 and Jonathan Hurst // - The International Journal of Robotics Research. 2016. Vol. 35(12) 1497–1521.
[11] Hu Shi, Y Yue, H Wang, J Xu, X Mei Design and performance analysis of human walking induced energy recovery system by means of hydraulic energy conversion and storage //Energy Conversion and Management. – 2020. – Т. 217. – С. 113008.
[12] 专利 CN202183327U，2012.04.04. M·施密特 T·布伦奈斯 J·克诺斯佩。用于液压弹簧储能驱动器的储能模块及高压断路器驱动器// 中国专利申请号 201120036870.6，2011.02.01.
[13] Пат. 2742446, Рос. Федерация: МПК B25J 9/10, F03G 7/08. Мехатронный пружинный привод / Жавнер В.Л., Чжао Вэнь, Янь Чуаньчао// №2020122271: заявил. 06.07.2020: опубл. 05.02.2021 Бюл № 4. 13 с.
[14] Жавнер М.В., Чуаньчао Я., Ли С. Исследование пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии в оборудовании пищевых производств. Вестник Международной академии холода. - 2022. - № 1. - С. 68-75.
[15] Жавнер М.В., Янь Чуаньчао, Чжао В. Мехатронные рекуперативные приводы для шаговых перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами. Вестник Международной академии холода. - 2019. - № 2. - С. 22-28.
[16] Пелупесси Д.С., Жавнер М.В. Пружинные аккумуляторы для шаговых приводов. Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 5-й Междунар. науч. -практ. конф. (30 июня - 01 июля 2016 г.). -СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2016. – С. 499-509.
[17] Мацко, О.Н. Мехатронные рекуперативные приводы для возвратно-поступательного движения: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук: 05.02.05 / О.Н. Мацко – СПб: СПбПУ, 2011. -16 с.

Yan Chuanchao, A.H. Volkov, Zhang Jingnian, Shi Shuangyuan

MECHATRONIC PNEUMATIC ACTUATORS WITH SPRING ACCUMULATORS AND FLEXIBLE LINKS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

In this work, a circuit design solution is developed for a mechatronic pneumatic actuator with a spring accumulator and flexible links in the transmission mechanism. A mathematical model is constructed that considers the actuator's design parameters, air pressure, energy replenishment algorithm, dry friction in kinematic pairs, spring stiffness, and its pre-deformation. A comparative analysis of the response speed between actuators with spring accumulators and conventional pneumatic actuators is conducted. Verification of the mathematical model was performed using a functional prototype. The results demonstrate that incorporating a spring accumulator and flexible links in mechatronic pneumatic actuators enhances response speed by up to 26% compared to traditional pneumatic actuators. Increasing the air pressure in the cylinder during energy compensation, spring stiffness, pulley radius, and spring pre-deformation enhances the response speed.

Key words: response speed; energy compensation; robotics; energy losses; mathematical model; experimental prototype.

REFERENCES

[1] W. Zhao, V. L. Zhavner, A. B. Smirnov, Ya. Chuanchao Application of pneumatic spring-return cylinders in mechatronic drives with energy recovery // Scientific and technical bulletins of SPbPU. Engineering sciences and technology. 2019, vol. 25, no. 1, pp. 111-123.

[2] Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring actuators with balancing for horizontal reciprocating movements // M.: Herald of Scientific and Technical Development, 2016, No. 5, pp. 12-17.

[3] Yan Chuanchao, A.N. Volkov, O.V. Kochneva, O.N. Matsko Nonlinear spring accumulator for mechatronic pneumatic drives with energy recovery // Science and business: paths of development. 2024, no. 8, pp. 39-43.

[4] Patent No. CN 109707575A, Int. CI. F03G 1/00(2006.01), F03G 1/02(2006.01), F03G 1/06(2006.01). A system and method for realizing spring energy storage using a pulley block / Wang Dongjun, Wang Shuai, Dong Baoguang, Song Liping, Li Ruihua, Bai Yanbin, Huang Yaoyu, Jian Junqiang, Pu Baoji// 201910075673.6. Application date: 2019.01.25. Application publication date: 2019.05.03.

[5] Zhang Xiaofei, Zhang Yanheng, Sun Hanxu, Jia Qingxuan, Xiao Han. Design and dynamic analysis of a two-wheeled robot capable of jumping. Robotics. 2014.05.

[6] C Hubicki, J Grimes, M Jones, D Renjewski, A Spröwitz, A Abate, J Hurst Atrias: Design and validation of a tether-free 3d-capable spring-mass bipedal robot //The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Т. 35. – №. 12. – С. 1497-1521.

[7] Lo J., Parslew B. Elastic energy storage of spring-driven jumping robots //arXiv preprint arXiv:2311.02188. – 2023.
[8] Shin W. D., Stewart, W., Estrada, M. A., Ijspeert, A. J., & Floreano, D. Elastic-actuation mechanism for repetitive hopping based on power modulation and cyclic trajectory generation //IEEE Transactions on Robotics. – 2022. – Т. 39. – №. 1. – С. 558-571.
[9] Li Xingwang, Teng Yan, Xu Ying. A pneumatic soft quadruped robot based on a bistable actuator[J] // ROBOT, 2024, 46(3): 294-304.
[10] Christian Hubicki ATRIAS: Design and validation of atether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot / Christian Hubicki, Jesse Grimes, Mikhail Jones, Daniel Renjewski, Alexander Spröwitz, Andy Abate1 and Jonathan Hurst // - The International Journal of Robotics Research. 2016. Vol. 35(12) 1497–1521.
[11] Hu Shi, Y Yue, H Wang, J Xu, X Mei Design and performance analysis of human walking induced energy recovery system by means of hydraulic energy conversion and storage //Energy Conversion and Management. – 2020. – Т. 217. – С. 113008.
[12] Patent CN202183327U, April 4, 2012. M. Schmidt, T. Brunnes, J. Knospe. Energy storage module for hydraulic spring energy storage driver and high-voltage circuit breaker driver // Chinese Patent Application No. 201120036870.6, February 1, 2011.
[13] Pat. 2742446, Russian Federation: IPC B25J 9/10, F03G 7/08. Mechatronic spring drive / Zhavner V.L., Zhao Wen, Yan Chuanchao // No. 2020122271: declared. 06.07.2020: published. 05.02.2021 Bulletin No. 4. 13 p.
[14] Zhavner M.V., Chuanchao Yan., Li S. Study of spring accumulators for mechatronic drives with energy recovery in food production equipment. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. - 2022. - No. 1. - P. 68-75.
[15] Zhavner M.V., Yan Chuanchao, Zhao W. Mechatronic regenerative drives for stepping movements based on pneumatic cylinders with return springs. Bulletin of the International Academy of Refrigeration. - 2019. - No. 2. - P. 22-28.
[16] Pelupessi D.S., Zhavner M.V. Spring accumulators for stepper drives. Modern mechanical engineering. Science and education: Proceedings of the 5th Int. scientific -practical. conf. (June 30 - July 01, 2016). - St. Petersburg: Publishing house of the Polytechnic University. - 2016. - P. 499-509.
[17] Matsko, O.N. Mechatronic recuperative drives for reciprocating motion: Abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 05.02.05 / O.N. Matsko - St. Petersburg: SPbPU, 2011.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.865.8, 519.711.3
doi:10.18720/SPBPU/2/id-136

А.А. Брянский[1], А.Н. Волков[2], К.М. Гусейнов[3], Д.В. Шабанов[4]

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ДВУХЗВЕННОГО АНГУЛЯРНОГО МАНИПУЛЯТОРА ОТ ЕГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ТРАЕКТОРИИ СХВАТА



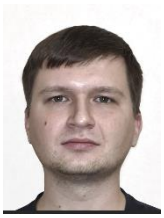
[1]Андрей Андреевич Брянский,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)150-0313, E-mail: andrebriyanskiy@gmail.com.



[2]Андрей Николаевич Волков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)992-4700, E-mail: volkov-and-1@yandex.ru.



[3] Канан Мурсал оглу Гусейнов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (952)398-8963, E-mail: kanan.guseinov@mail.ru.



[4]Дмитрий Вячеславович Шабанов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)427-0147, E-mail: shabanov_dv@internet.ru.

Аннотация

В работе представлен метод исследования зависимости энергопотребления манипулятора от его положения относительно рабочей траектории схвата. В основу математической модели положена система двух уравнений Лагранжа второго рода, записанная для произвольного положения манипулятора относительно траектории. Преобладающей нагрузкой приняты силы и моменты инерции, действующие на объект манипулирования, звенья и роторы электрических моторов. Рекуперация

кинетической энергии и потери в приводах не рассматривались. Движения схвата задавалось по прямолинейной траектории с наиболее распространенным законом: равноускоренный разгон, равномерное перемещение и равнозамедленное торможение. Формулы для определения мгновенных мощностей приводов получены путем умножения правых и левых частей уравнений Лагранжа на функции соответствующих угловых скоростей. Энергопотребление цикла определяеется путем интегрирования функций мощности на интервалах с их положительными значениями. Исследование модели показало высокую эффективность оптимизации расположения манипулятора относительно вектора перемещения схвата по критерию минимизации потребляемой за цикл энергии.

Ключевые слова: манипулятор, вектор перемещения, схват, уравнения Лагранжа, энергопотребление, оптимизация.

Введение

Положение манипулятора относительно траектории исполнительного органа определяет его энергопотребление, максимальную мощность, производительность, а также точность, и поэтому является актуальной задачей при разработке планировки роботизированной ячейки или алгоритма работы автономного мобильного робота с манипулятором. В последнее десятилетие вопросам оптимизации положения робота по критериям минимизации энергопотребления и мощности уделялось значительное внимание, а на практике проектировщики по-прежнему ориентируются на СНИП, обеспечивая проходы и пространство, необходимые для эвакуации и обслуживания оборудования.

С целью привлечения большего внимания к вопросу оптимизации положения манипуляторов относительно их рабочих траекторий необходимо проанализировать соотношение практической выгоды и фактических затрат для типовой задачи манипулирования.

Предложенная выше цель достигается путем аналитического и компьютерного моделирования работы манипулятора по критерию минимизации энергозатрат.

В работе [1] установлено, что оптимизация размещения роботов относительно их рабочих траекторий в сравнении с существующим вариантом планировки роботизированного участка сварки автомобильных дверей, позволила снизить энергозатраты на каждом из роботов на 6…20%. Хороший производственный пример роботизированной системы с большим числом точек позиционирования, рассмотренный в статье, не дает исчерпывающего представления о потенциале предложенного метода оптимизации поскольку, получена интегральная оценка оптимизации положения робота для совокупности большого числа точек

позиционирования, каждая пара из которых предполагает свое оптимальное положение. Проблему снижения трудоемкости моделирования энергопотребления в [2] предложено решать на упрощенных моделях механики и приводов. Исследования проводились на серийном роботе KUKA KR210 и подтвердили, что упрощенные модели двигателей и инверторов дают хорошую точность. Планирование движения исполнительного органа робота по критерию минимума потребляемой энергии с применением метаэвристических алгоритмов, теории графов, структурной декомпозиции, учитывающей механизмы генерации и вычислительную сложность энергопотребления, а также нейронных сетей рассмотрено в работах [3-8]. Зависимость потребляемой роботом мощности от скоростей и нагрузок исследована в [9]. В [10–20] исследована эффективность оптимизации положения робота относительно рабочих траекторий исполнительного органа по критериям минимума объема движений в сочленениях робота и минимума потребляемой энергии для различных траекторий исполнительного органа.

Представленный анализ подтверждает актуальность разработки компьютерных моделей и методик системного подхода к проблеме планировки роботизированных участков, обеспечивающего наилучшее сочетание энергопотребления, максимальной мощности, быстродействия и точности. Однако, на первом этапе такой работы необходимо решить задачу о зависимости энергопотребления W за цикл T при заданных векторе перемещения центра схвата **s** и координатах положения робота x, y. Это позволит установить и проанализировать характер зависимости W от координат x и y.

Методы

Рассматривается манипулятор ангулярного типа с вертикально ориентированными осями и работающий в горизонтальной плоскости. Суть технологической операции сводится к перемещению объекта манипулирования по прямолинейной траектории из точки A в точку B на расстояние **s** за время T (рисунок 1*a*). С целью уменьшения масс, вовлекаемых в движение перемещение осуществляется за счет поворота двух звеньев манипулятора ближайших к захватному устройству, а остальные звенья и их приводы выполняют роль установочного перемещения шарнира O.

Для исследования энергозатрат сначала решается первая задачи динамики по определению обобщенных моментов на выходных валах мотор-редукторов приводов при заданном перемещении центра схвата по прямолинейной траектории, заданной вектором **s** (s = AB). В качестве закона изменения координаты l(t), скорости l'(t) и ускорения l''(t) центра схвата во

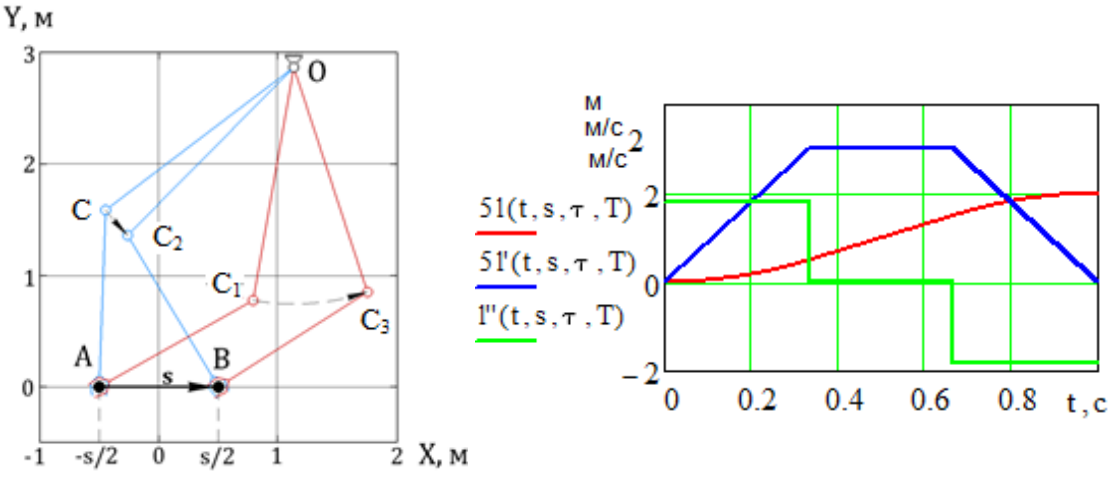
времени t принят наиболее простой и распространенный прямоугольный закон движения. При равных временах разгона и торможения τ такой законы изменения положения, скорости и ускорения схвата можно представить кусочно-заданными функциями

$$l(t,s,\tau,T)=\begin{cases}\dfrac{s\cdot t^2}{2\tau\cdot(T-\tau)} & \text{if } 0\le t<\tau\\ \dfrac{s\cdot(\tau-2t)}{2\cdot(\tau-T)} & \text{if } \tau\le t\le T-\tau\\ \dfrac{s\cdot(T-t)^2}{2\tau\cdot(\tau-T)}+s & \text{if } T-\tau<t\le T\end{cases} \tag{1}$$

$$l'(t,s,\tau,T)=\begin{cases}\dfrac{s\cdot t}{\tau\cdot(T-\tau)} & \text{if } 0\le t<\tau\\ \dfrac{s}{T-\tau} & \text{if } \tau\le t\le T-\tau\\ \dfrac{s\cdot(T-t)}{\tau\cdot(T-\tau)} & \text{if } T-\tau<t\le T\end{cases} \tag{2}$$

$$l''(t,s,\tau,T)=\begin{cases}\dfrac{s}{\tau\cdot(T-\tau)} & \text{if } 0\le t<\tau\\ 0 & \text{if } \tau\le t\le T-\tau\\ \dfrac{-s}{\tau\cdot(T-\tau)} & \text{if } T-\tau<t\le T\end{cases} \tag{3}$$

Графики закона движения представлены на рисунке 1 *б.*



а *б*

Рис. 1. Схема манипулирования – *а* и законы изменения координаты, скорости и ускорения центра схвата

Кинематика двухзвенного робота предполагает для любого положения схвата, лежащего не на границе зоны обслуживания, две конфигурации звеньев манипулятора (рисунок 1 *а*): в начальном положении ОСА или OC_1A и в конечном положении OC_2B или OC_3B. Это обусловлено наличием двух пар корней для системы квадратных уравнений описывающих геометрию манипулятора в двух крайних положений. При нахождении манипулятора в особых положениях (точки сингулярности), которые могут лежать на границах зоны обслуживания две конфигурации звеньев манипулятора совпадают. Функционирование робота таких точках определяется его геометрией и конструктивным исполнением и вызывает проблемы в организации управления. В представленной работе рассматривается функционирование робота только в одной из конфигураций.

На первом этапе разработки математической модели записываются выражения связывающие обобщенные координаты, в качестве которых приняты углы поворота выходных валов мотор-редукторов и декартовы координаты центра схвата. Расчетная кинематическая схема двухзвенного манипулятора представлена на рисунке 2 *а*. Функций обобщенные координаты первого и второго звеньев на прямом и обратном ходах имеют вид

$$\varphi_1(t,x,y,s,\tau,T) = \beta_0(t,x,y,s,\tau,T) - \beta_2(t,x,y,s,\tau,T) \qquad (4)$$

$$\varphi_2(t,x,y,s,\tau,T) = \pi - \beta_3(t,x,y,s,\tau,T) \qquad (5)$$

$$\varphi_{1r}(t,x,y,s,\tau,T) = \varphi_1(T-t,x,y,s,\tau,T) \qquad (6)$$

$$\varphi_{2r}(t,x,y,s,\tau,T) = \varphi_2(T-t,x,y,s,\tau,T) \qquad (7)$$

где

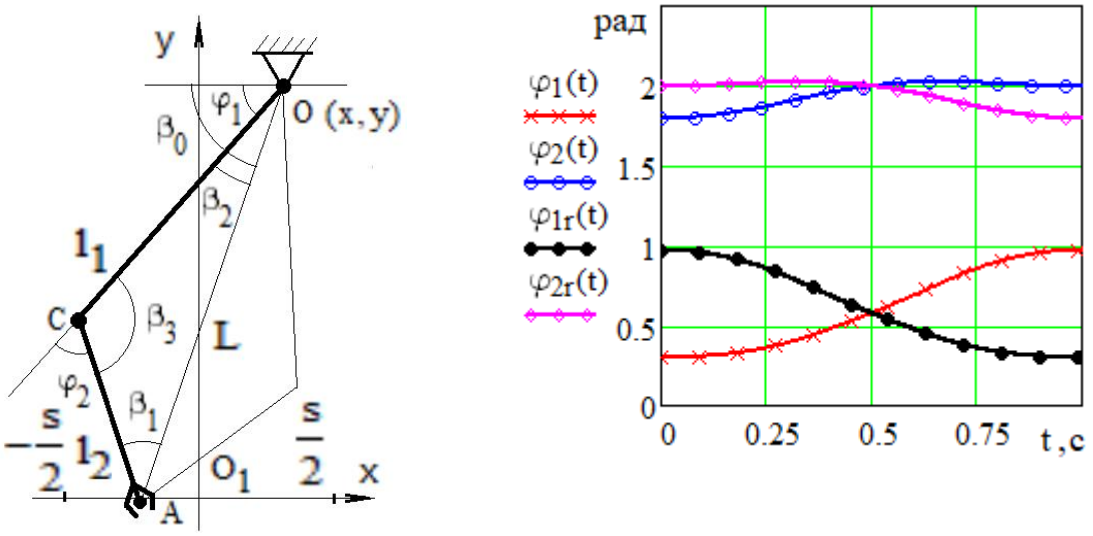
$$L(t,x,y,s,\tau,T) = \sqrt{\left(\frac{s}{2} + x - l(t,s,\tau,T)\right)^2 + y^2}$$ - длина радиус-вектора схвата в декартовой системе координат,

$$\beta_0(t,x,y,s,\tau,T) = \operatorname{acos}\left(\frac{\frac{s}{2} + x - l(t,s,\tau,T)}{L(t,x,y,s,\tau,T)}\right)$$ - гол между радиус-вектором и осью OY $\beta_0(t,x,y,s,\tau,T)$,

$$\beta_1(t,x,y,s,\tau,T) = \operatorname{acos}\left(\frac{l_1^2 - L(t,x,y,s,\tau,T)^2 - l_2^2}{-2\cdot l_2 \cdot L(t,x,y,s,\tau,T)}\right)$$ - угол между радиус-вектором и осью второго звена $\beta_1(t,x,y,s,\tau,T)$,

$$\beta_2(t,x,y,s,\tau,T) = \operatorname{acos}\left(\frac{l_2^{\,2} - L(t,x,y,s,\tau,T)^2 - l_1^{\,2}}{-2\cdot l_1 \cdot L(t,x,y,s,\tau,T)}\right)$$ - угол между радиус-вектором и осью второго звена $\beta_2(t,x,y,s,\tau,)$,

$$\beta_3(t,x,y,s,\tau,T) = \operatorname{acos}\left(\frac{L(t,x,y,s,\tau,T)^2 - l_1^{\,2} - l_2^{\,2}}{-2\cdot l_2 \cdot l_1}\right)$$ - угол между осью первого и осью второго звеньев $\beta_3(t,x,y,s,\tau,T)$.



а *б*

Рис. 2. Расчетная кинематическая схема манипулятора – *а,* и законы изменения обобщенных координат звеньев на прямом и обратном ходах

Обобщенные угловые скорости и ускорения звеньев манипулятора на прямом и обратном ходу найдены путем дифференцирования выражений (8) – (15).

Угловая скорость звена 1 прямого хода:
$$\omega_1(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\varphi_1(t,x,y,s,\tau,T) \quad (8)$$

Угловая скорость звена 2 прямого хода:
$$\omega_2(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\varphi_2(t,x,y,s,\tau,T) \quad (9)$$

Угловая скорость звена 1 обратного хода:
$$\omega_{1r}(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\varphi_{1r}(t,x,y,s,\tau,T) \quad (10)$$

Угловая скорость звена 2 обратного хода:
$$\omega_{2r}(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\varphi_{2r}(t,x,y,s,\tau,T) \quad (11)$$

Угловое ускорение звена 1 прямого хода:
$$\varepsilon_1(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\omega_1(t,x,y,s,\tau,T) \quad (12)$$

Угловое ускорение звена 2 прямого хода:
$$\varepsilon_2(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\omega_2(t,x,y,s,\tau,T) \quad (13)$$

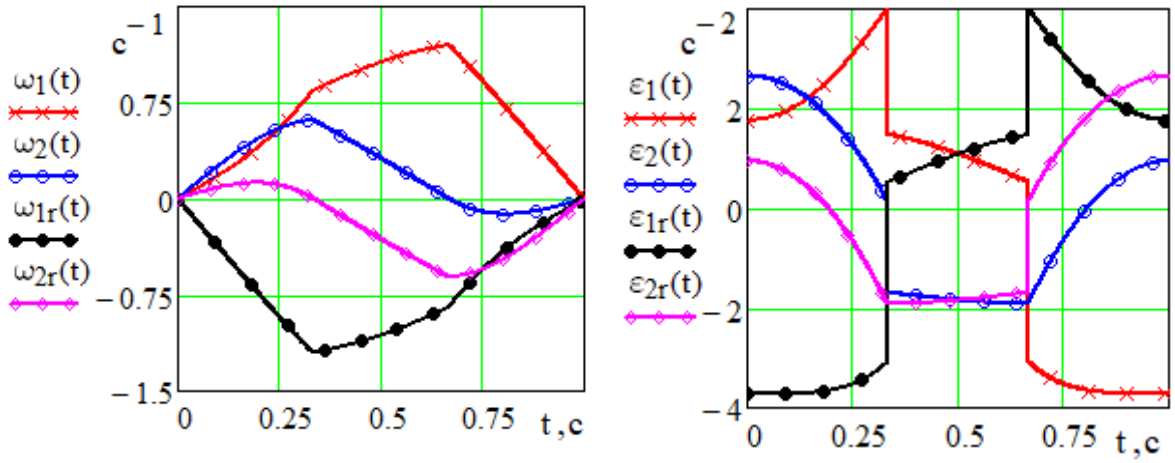
Угловое ускорение звена 1 обратного хода:

$$\varepsilon_{1r}(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\omega_{1r}(t,x,y,s,\tau,T) \quad (14)$$

Угловое ускорение звена 2 обратного хода:

$$\varepsilon_{2r}(t,x,y,s,\tau,T) = \frac{d}{dt}\omega_{2r}(t,x,y,s,\tau,T) \quad (15)$$

Все представленные выше производные взяты аналитически и использованы при компьютерном моделировании с целью сокращения времени вычислений. В работе эти выражения не приводятся из-за их громоздкости. Графики зависимостей обобщенных скоростей и ускорений от времени для прямого и обратного ходов представлены на рисунке 3.



а *б*

Рис. 3. Графики зависимости скоростей – *а* и ускорений – *б* на прямом и обратном ходах (x = 0,1 м, y = 0,5 м, s = 0,4 м, τ = 0,33 с и T = 1с)

Расчетная схема динамической модели манипулятора представлена на рисунке – 4. Система уравнений Лагранжа второго рода для рассматриваемого манипулятора имеет вид

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial}{\partial\dot{\varphi}_1}K - \frac{\partial}{\partial\varphi_1}K = M_1; \qquad \frac{d}{dt}\frac{\partial}{\partial\dot{\varphi}_2}K - \frac{\partial}{\partial\varphi_2}K = M_2 \quad (16)$$

где M_1 и M_2 – обобщенные моменты на приводах первого и второго звена, К – кинетическая энергия подвижных частей манипулятора включая приводы. Все приведенные в формуле, моменты, энергия, обобщенные скорости и координаты являются функциями времени t, декартовых координат шарнира первого звена x, y , времени цикла T, времени разгона (торможения) τ, величины вектора перемещения схвата s, геометрических размеров звеньев l_1, l_2, масс и моментов инерции звеньев m_1, m_2, J_1, J_2, моментов инерции якорей электрических моторов J_{01}, J_{02}, передаточного

числа редукторов i и массы исполнительного органа m_3. Здесь и далее эти аргументы функций будут опускаться с целью сокращения соответствующих записей. Это позволяет получить параметрическую динамическую модель манипулятора для всестороннего исследования зависимости максимальных за цикл моментов и мощностей, а также энергопотребления в зависимости от его размещения относительно реализуемой траектории и параметров закона движения.

Кинетическая энергия манипулятора представляет собой сумму следующих энергий: вращательных движений первого и второго звена, вращательной движений якорей электромоторов, поступательного движения звеньев и исполнительного органа от их вращения. Для определения этих энергий первоначально записываются формулы для определения линейных скоростей центров тяжести звеньев и исполнительного органа.

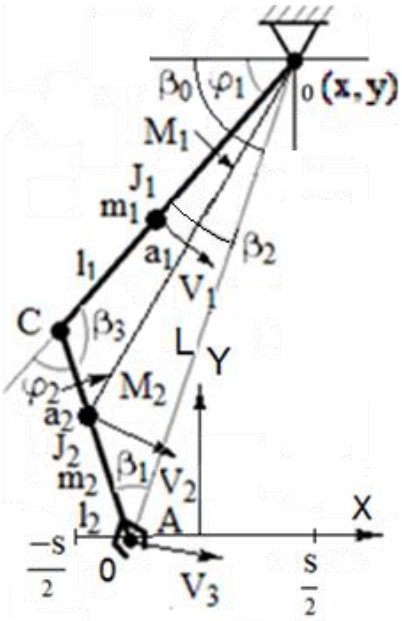


Рис. 4. Расчетная схема динамической модели манипулятора

Кинетическая энергия манипулятора представляет собой сумму следующих энергий: вращательных движений первого и второго звена, вращательной движений якорей электромоторов, поступательного движения звеньев и исполнительного органа от их вращения. Выражение для кинетической энергии манипулятора имеет вид

$$K = K_1 + K_2;$$

$$K_1 = \frac{1}{2}\left[\left(J_1 + J_{01}\cdot i^2\right)\cdot \varphi'_1{}^2 + \left(J_2\right)\cdot\left(\varphi'_1 + \varphi'_2\right)^2 + J_{02}\left(\varphi'_1 + i\cdot\varphi'_2\right)^2\right]; \quad (17)$$

$$K_2 = \frac{1}{2}\left[m_1\cdot V_1^2 + J_1\cdot\varphi'_1{}^2 + m_2\cdot V_2^2 + J_2\cdot\left(\varphi'_1 + \varphi'_2\right)^2 + m_3\cdot V_3^2\right]$$

где K_1 и K_2 – кинетические энергии звеньев манипулятора от вращательного и поступательного движений соответственно.

Поскольку ранее было принято допущение о пренебрежении силами трения, тяжести и технологическими, обобщенными силами являются моменты на выходных валах приводных мотор-редукторов.

Таким образом, поставляя в (16) выражение для кинетической энергии (17) можно получить уравнения динамики для прямого и обратного хода. Уравнения для прямого хода имеют вид

$$J_{E1}\varepsilon_{1r} + J_{E12}\varepsilon_2 - l_1 \sin\varphi_2\left(a_2 m_2 + l_2 m_3\right)\left(2\omega_1\omega_2 + \omega_2^2\right) = M_1 \tag{18}$$

$$J_{E12r}\varepsilon_1 + J_{E2}\omega_2 + l_1 \sin\varphi_2\left(a_2 m_2 + l_2 m_3\right)\omega_2^2 = M_2 \tag{19}$$

где

$$J_{E1} = J_1 + J_2 + J_{02} + J_{01} i^2 + a_1^2 m_1 + m_2\left(a_2^2 + l_1^2 + 2a_2 l_1 \cos\varphi_2\right) + m_3\left(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos\varphi_2\right)$$

$$J_{E12} = J_2 + J_{02}\cdot i + a_2^2 \cdot m_2 + a_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \cos\varphi_2 + l_2^2 \cdot m_3 + l_1 \cdot l_2 \cdot m_3 \cdot \cos\varphi_2$$

$$J_{E2} = J_2 + J_{02}\cdot i^2 + a_2^2 \cdot m_2 + l_2^2 \cdot m_3$$

Уравнения динамики для обратного хода можно получить путем добавления к индексам переменных уравнений прямого хода еще одного знака «r» (реверс)

$$J_{E1r}\varepsilon_{1r} + J_{E12r}\varepsilon_{2r} - l_1 \sin\varphi_{2r}\left(a_2 m_2 + l_2 m_3\right)\left(2\omega_{1r}\omega_{2r} + \omega_{2r}^2\right) = M_{1r} \tag{20}$$

$$J_{E12r}\varepsilon_{1r} + J_{E2}\omega_{2r} + l_1 \sin\varphi_{2r}\left(a_2 m_2 + l_2 m_3\right)\omega_{2r}^2 = M_{2r} \tag{21}$$

где

$$J_{E1} = J_1 + J_2 + J_{02} + J_{01} i^2 + a_1^2 m_1 + m_2\left(a_2^2 + l_1^2 + 2a_2 l_1 \cos\varphi_{2r}\right) + m_3\left(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos\varphi_{2r}\right.$$

$$J_{E12} = J_2 + J_{02} i + a_2^2 \cdot m_2 + a_2 \cdot l_1 \cdot m_2 \cdot \cos\varphi_{2r} + l_2^2 \cdot m_3 + l_1 \cdot l_2 \cdot m_3 \cdot \cos\varphi_{2r}$$

Момент инерции J_{E2} не зависит от обобщенных координат и одинаков для прямого и обратного хода схвата.

Механическая мощность, потребляемая приводами звеньев манипулятора, определяется выражениями

$$N_1 = M_1 \cdot \omega_1 \tag{22}$$

$$N_2 = M_2 \cdot \omega_2 \tag{23}$$

В случае отсутствия электрической рекуперации для режимов торможения потребляемая мощность определяется ее положительными значениями. Отрицательное значение мощности соответствует торможению привода в генераторном режиме с диссипацией энергии на тормозном резисторе. Поэтому потребляемую приводами мощность представлена следующим образом

$$N_1 = \begin{cases} N_1 & \text{if } N_1 \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

$$N_2 = \begin{cases} N_2 & \text{if } N_2 \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

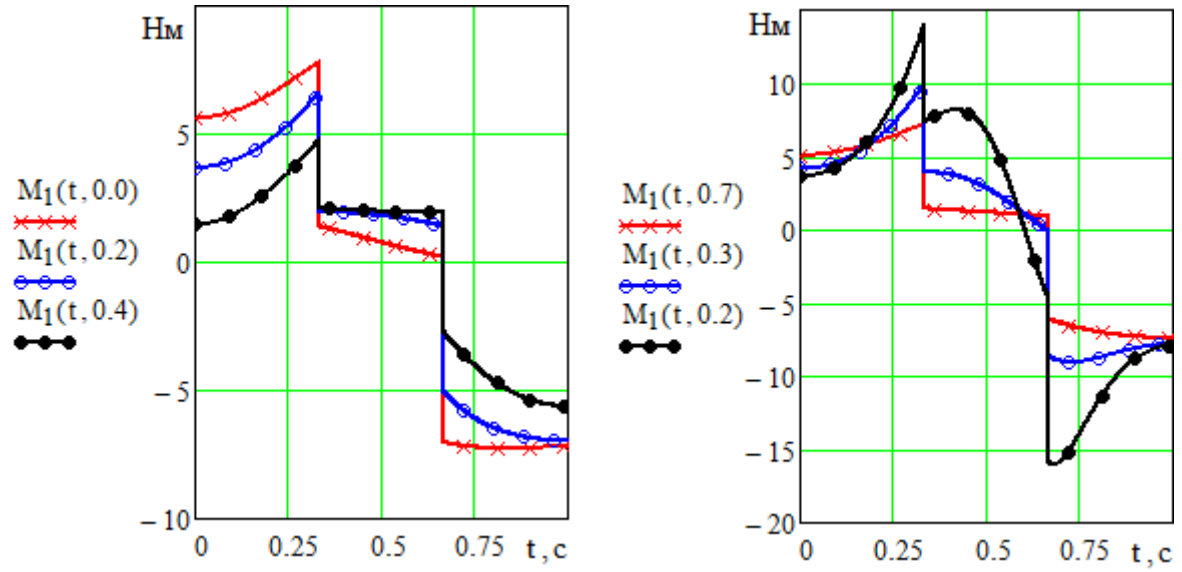
Таким образом динамическая модель двухзвенного манипулятора, при заданных законе движения и траектории, а также декартовых координатах шарнира первого звена позволяет получить законы изменения моментов и мощностей в аналитическом виде.

Для построения графиков моментов и мощностей использованы параметры проектируемого макета манипулятора. Значения этих параметров представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики макета манипулятора

Параметр	Первое звено	Второе звено
Электромотор ДПТ FL45BLW21-24V-6750A		
Номинальная скорость вращения вала мотора, рад/с	ω=526	
Номинальный момент мотора, Нм	$M_{ном}$=0,084	
Момент инерции якоря мотора, кг·м^2	J_0=135·10^{-7}	
Конструкция манипулятора		
Передаточное число редуктора	i=150,286	
Масса звена, кг	m_1=4,65	m_2=3,56
Длина звена, м	l_1=0,522	l_2=0,4
Расстояние от шарнира звена до его центра масс, м	a_1=0,261	a_2=0,2
Момент инерции звена, кг·м^2	J_1=0,106	J_2=0,048

На рисунке 5 представлены зависимости момента $M_1(t, x, y)$ на приводе первого звена от времени при различных значениях x и y (здесь и далее на графиках приводятся только те аргументы и параметры, которые изменяются, а остальные приводятся в подрисуночной надписи).

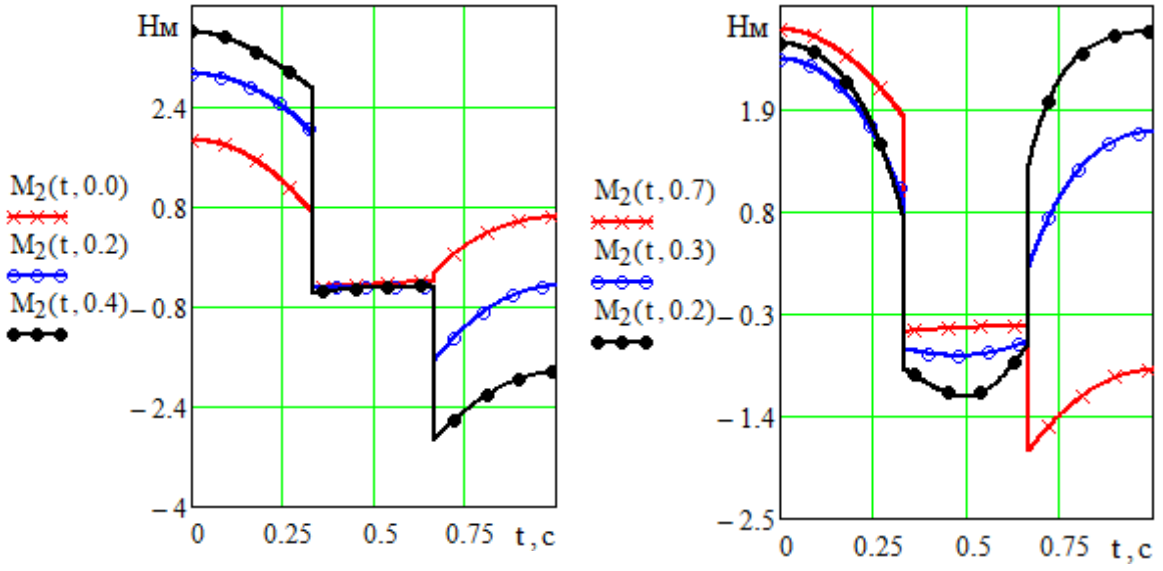


а *б*

Рис. 5. Графики зависимости момента привода первого звена при y = 0,5 и различных значениях x – *а*, а также при x = 0,1 и различных значениях y - *б* от времени (s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

На рисунке 6 представлены зависимости момента $M_2(t, x, y)$ на приводе второго звена от времени при различных значениях x и y.

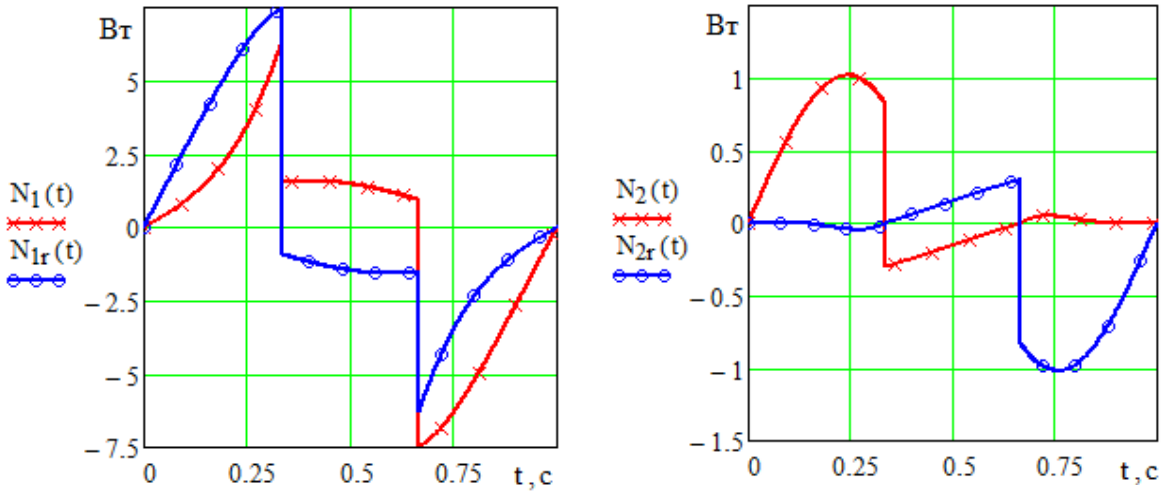
Анализ графиков моментов хорошо иллюстрирует их существенную зависимость от положения манипулятора и это относиться как к характеру графиков, так и величине максимумов. Графики моментов на обратном ходу симметричны графикам прямого хода относительно вертикальной оси.



а *б*

Рис. 6. Графики зависимости момента привода второго звена при y = 0,5 и различных значениях x – *а*, а также при x = 0,1 и различных значениях x - *б* от времени (s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

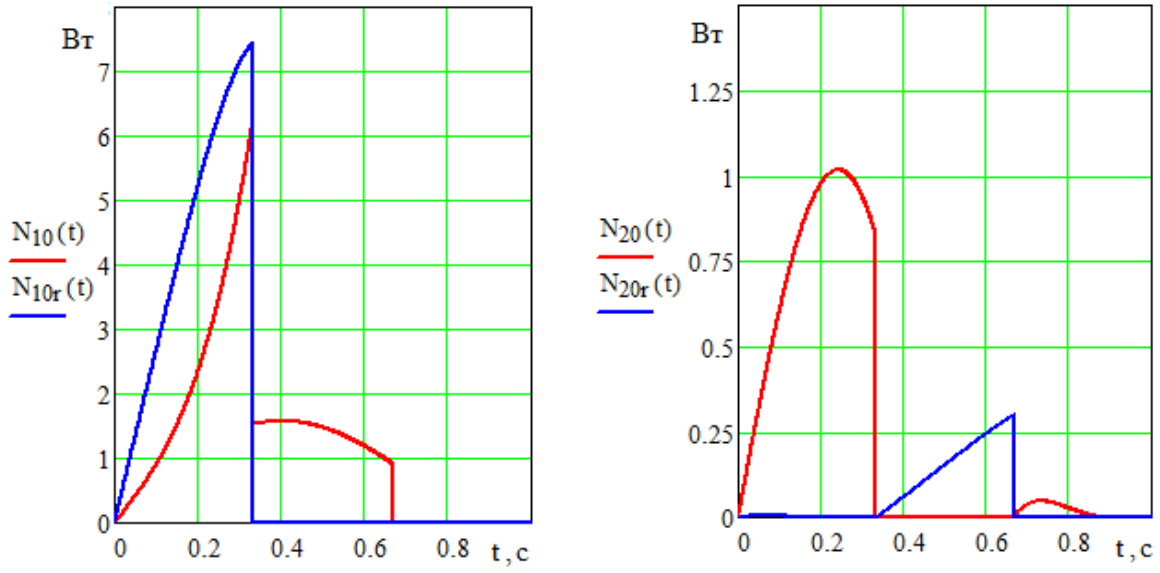
На рисунке 7 представлены зависимости механической мощности на приводах звеньев манипулятора от времени прямого и обратного ходов, на рисунке 8 графики механической (положительной) мощности на приводах звеньев манипулятора для прямого и обратного ходов от времени.



а *б*

Рис. 7. Зависимость механической мощности привода первого звена от времени на прямом и обратном ходах – *а* и привода второго звена от времени на прямом и обратном ходах – *б* (x = 0,1 м, y = 0,5 м, s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

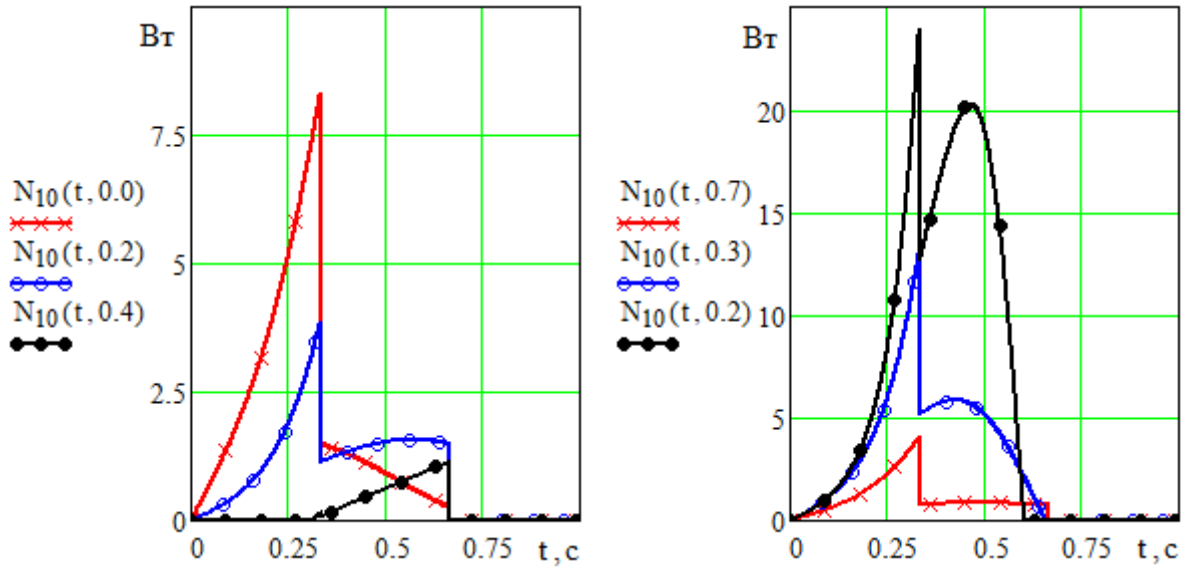
На рисунке 9 изображены графики механической (положительной) мощности на приводе первого звена манипулятора для прямого хода от времени для различных положений манипулятора.



а *б*

Рис. 8. Зависимость механической мощности на приводе первого звена от времен на прямом и обратном ходах – *а* и на приводе второго звена от времени на прямом и обратном ходах – *б*
(x = 0,1 м, y = 0,5 м, s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

Анализ графиков зависимости мощности от времен (рисунки 7 – 9) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, законы изменения механической мощности, на приводах звеньев, на прямом и обратном ходах различны как по форме, так и по максимальным значениям. Во-вторых, на прямом и обратном ходах максимальные положительные и отрицательные



а *б*

Рис. 9. Графики зависимости потребляемой (положительной) мощности привода первого звена манипулятора прямого хода от времени для различных x при y = 0,5 - *а* и различных y при x = 0,1 – *б* (s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

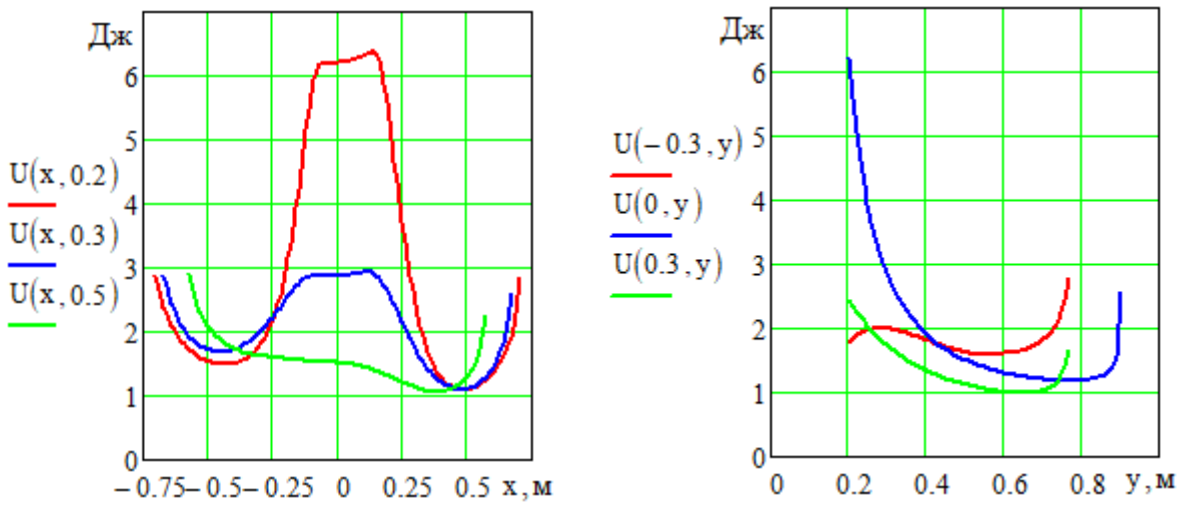
мощности имеют различные значения. В-третьих, максимальные положительные значения механической мощности на приводе первого звена, в зависимости от положения манипулятора относительно реализуемой траектории, могут отличаться в разы.

Механическая энергия, потребляемая при реализации прямого и обратного ходов центра схвата определяется следующими формулами

$$U\left(x,y,s,\tau,T,m_3\right) = \int_0^T N_0\left(t,x,y,s,\tau,T,m_3\right)\,dt \qquad (26)$$

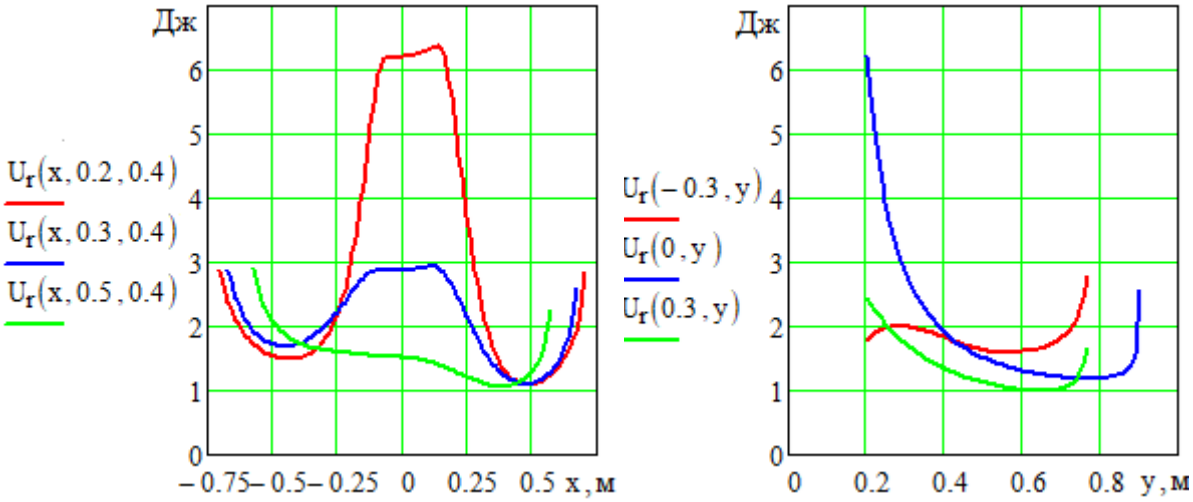
$$U_r\left(x,y,s,\tau,T,m_3\right) = \int_0^T N_{0r}\left(t,x,y,s,\tau,T,m_3\right)\,dt \qquad (27)$$

На рисунках 10 и 11 представлены графики зависимости потребляемой за цикл энергии от положения манипулятора на прямом и обратном ходах соответственно.



а *б*

Рис. 10. Графики зависимости затрат механической энергии от координаты x положения манипулятора при фиксированной координате y – *а* и от координаты y при фиксированной координате x – *б* на прямом ходу (s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

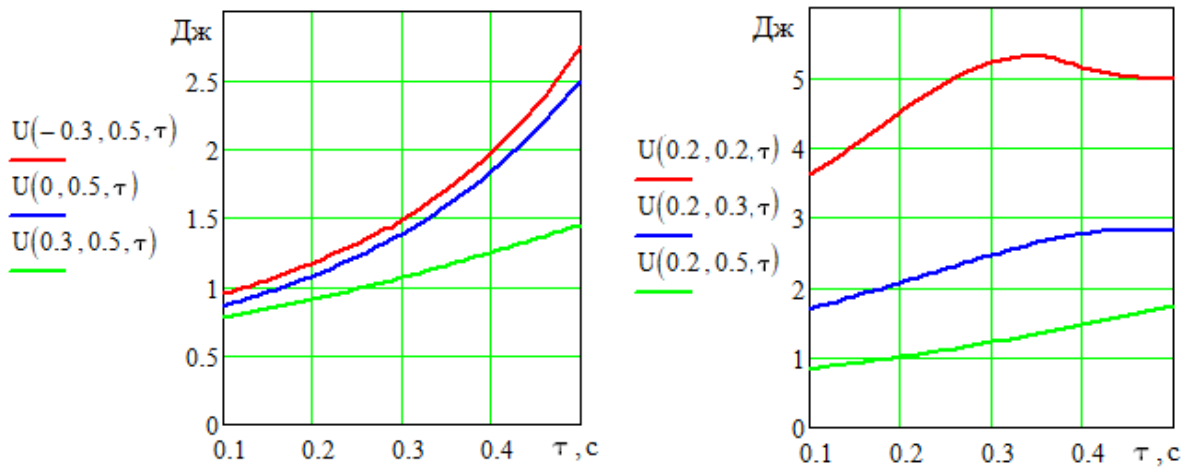


а *б*

Рис. 11. Графики зависимости затрат механической энергии от координаты x положения манипулятора при фиксированной координате y – *а* и от координаты y – при фиксированной координате x *б* на обратном ходу (s = 0,4 м, τ = 0,33 с, T = 1 с)

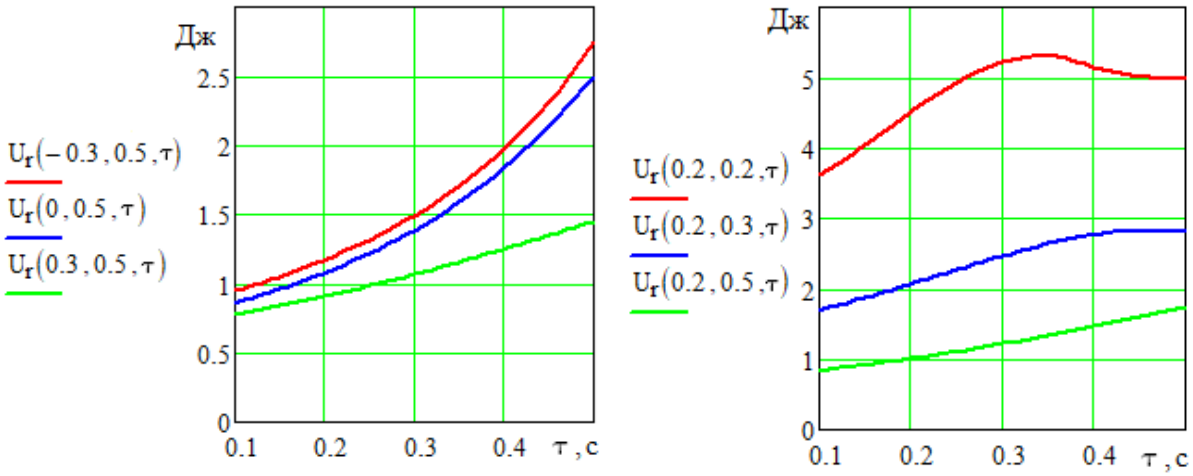
Анализ построенных графиков позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, потребление механической энергии не зависит от направления движения схвата (прямого или обратного хода) во всей области допустимых значений параметров и аргументов. Во-вторых, функция энергопотребления может иметь один или несколько минимумов. В-третьих, при принятых параметрах диапазон изменения энергопотребления достигает 1: 6.

На рисунке 12 и 13 приведены зависимости потребляемой механической энергии от времени разгона (торможения) для прямого и обратного ходов соответственно.



а *б*

Рис. 12. Графики зависимости энергозатрат на прямом ходу схвата от времени разгона (торможения) при различных координатах x манипулятора и фиксированной координате y – *а*, также при различных координатах y и фиксированной координате x – *б* (s = 0,4 м, T = 1 с)



а *б*

Рис. 13. Графики зависимости энергозатрат на обратном ходу схвата от времени разгона (торможения) при различных координатах x размещения манипулятора и фиксированной координате y – *а*, также при различных координатах y и фиксированной координате x – *б* (s = 0,4 м, T = 1 с)

На основании представленных графиков установлено следующее. Во-первых, увеличение времени разгона в зависимости от положения манипулятора может приводить как к увеличению энергозатрат, так их уменьшению. Во-вторых, диапазон изменения энергозатрат при выбранных параметрах достигает 1: 2,5.

Обсуждение

Разработанная аналитическая модель двухзвенного манипулятора позволяет эффективно оптимизировать размещение манипулятора

относительно заданной траектории схвата по критерию минимизации энергопотребления с учетом закона движения и его параметров. Эта модель в дальнейшем может быть дополнена блоками, учитывающими силы тяжести звеньев, схвата и объекта манипулирования, а также учитывающими потери в приводах. С целью снижения трудоемкости поиска оптимального положения манипулятора путем автоматизации процесса оптимизации предполагается создание компьютерной имитационной модели.

Заключение

Анализ представленных выше результатов позволяет утверждать следующее. Во-первых, размещение манипулятора робота относительно вектора перемещения при заданном времени может изменять потребляемую энергию на сотни и даже тысячи процентов. Во-вторых, полезный эффект от оптимального размещения манипулятора относительно вектора перемещения зависит от его конструкции и соотношении размеров звеньев с величиной вектора перемещения. В-третьих, предложенный подход может быть использован для исследования эффективности оптимизации размещения манипулятора по критерию минимального энергопотребления для случаев трех и более точек позиционирования.

Разработанные модели, расчеты и выводы имеют отношение исключительно к энергии, затрачиваемой на перемещение объекта и звеньев робота при воздействии инерционных нагрузок, которые в подавляющем числе случаев для современных быстродействующих роботов являются определяющими. На основании результатов исследования можно утверждать, что «эргономичная» планировка роботизированного производственного участка также актуальна, как и рабочего места обслуживающего персонала и она характеризуется количественными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assess-ment on an industrial case study. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102-111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002Современное машиностроение: Наука и образование. 2019. С. 109-123.

[2] Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots. 2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018). Atlantis Press. 2019. Pp. 115-121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21

[3] Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization. Energies. 2022. Vol. 15. No. 6. P. 2074. DOI: 10.3390/en15062074
[4] Довгополик И.С., Козина А. Простое энергоэффективное планирование пути на основе графов для артикулированных роботов-манипуляторов // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления : сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2024. С. 1690-1694.
[5] Антонов В.О., Гурчинский М.М., Петренко В.И., Тебуева Ф.Б. Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвенного манипулятора в объемном пространстве с препятствием // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. №. 1. С. 98-112.
[6] Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. Mechatronics. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326-334 DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013
[7] Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2022. Vol. 76. P. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
[8] Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137-148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009
[9] Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system. Procedia Cirp. 2014. Vol. 23. Pp. 131-136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
[10] Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion. Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395-3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
[11] Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution. Proce-dia Cirp. 2016. Vol. 44. Pp. 395-400 DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
[12] Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms. IFAC Proceedings Volumes. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132-137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
[13] Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots. Robotics

and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. – Vol. 48. Pp. 233-242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
[14] Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments. Robotica. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105-110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
[15] Pamanes-Garcia J.A. A criterion for the optimal placement of robotic manipulators. IFAC Proceedings Vol-umes. 1990. Vol. 23. No. 3. Pp. 149-153. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)52549-5
[16] Chedmail P. Synthèse de robots et de sites robotisés Modélisation de robots souples. Diss. Nantes, 1990.
[17] Pamanes G.J.A., Zeghloul S. Optimal placement of robotic manipulators using multiple kinematic criteria. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE Computer Society. 1991. Pp. 933-938. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131708
[18] Кожевников, М.М., Чумаков, О.А., Илюшин, И.Э., Юркина, А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки // Доклады Белорусского государ-ственного университета информатики и радиоэлектроники. 2021. Т. 19. №. 3. С. 49-57.
[19] Хомченко В.Г., Колтышкин А.В. Оптимизация расположения манипулятора робота относительно реа-лизуемой траектории в ртк на базе обрезного пресса // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии. 2020. С. 59-63.
[20] Чумаков О.А. Оптимизация расположения антропоморфного манипулятора // Информационные техно-логии в образовании, науке и производстве [Электронный ресурс] : материалы XI международной научно-технической конференции, Минск, 21-22 ноября 2023 г. / сост. М. Г. Карасёва. – Минск : БНТУ, 2024. С. 106-112.

A.A. Briyanskiy, A.N. Volkov, K.M. Huseynov , D.V. Shabanov

DEPENDENCE OF ENERGY CONSUMPTION OF A TWO-LINK ANGULAR MANIPULATOR ON ITS PLACEMENT RELATIVELY TO THE GRASP TRAJECTORY

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper presents a method for studying the dependence of the manipulator's energy consumption on its position relative to the working trajectory of the gripper. The mathematical model is based on a system of two

Lagrange equations of the second kind, written for an arbitrary position of the manipulator relative to the trajectory. The predominant load is taken to be the forces and moments of inertia acting on the object of manipulation, links and rotors of electric motors. Recovery of kinetic energy and losses in drives were not considered. The gripper movements were set along a rectilinear trajectory with the most common law: uniformly accelerated acceleration, uniform movement and uniformly decelerated braking. Formulas for determining the instantaneous powers of the drives are obtained by multiplying the right and left parts of the Lagrange equations by the functions of the corresponding angular velocities. The energy consumption of the cycle is determined by integrating the power functions on intervals with their positive values. The study of the model showed high efficiency in optimizing the manipulator's location relative to the gripper's movement vector according to the criterion of minimizing the energy consumed per cycle.

Key words: manipulator, displacement vector, gripper, Lagrange equations, energy consumption, optimization.

REFERENCES

[1] Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assess-ment on an industrial case study. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102-111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002Современное машиностроение: Наука и образование. 2019. С. 109-123.

[2] Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots. 2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018). Atlantis Press. 2019. Pp. 115-121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21

[3] Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization. Energies. 2022. Vol. 15. No. 6. P. 2074. DOI: 10.3390/en15062074

[4] Dovgopolik I.S., Kozina A. Simple energy-efficient graph-based path planning for articulated robotic arms, XIV Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya : sbornik nauchnyh trudov, Moskva, 17–20 iyunya 2024 goda. – Moskva: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2024. Pp. 1690-1694 (rus)

[5] Antonov V.O., Gurchinskij M.M., Petrenko V.I., Tebueva F.B. Method for planning the optimal trajectory of a three-link manipulator in a volumetric space with an obstacle, Vestnik Dage-stanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018. Vol. 45. No. 1. Pp. 98-112 (rus)

[6] Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. Mechatronics. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326-334 DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013
[7] Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2022. Vol. 76. P. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
[8] Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137-148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009
[9] Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system. Procedia Cirp. 2014. Vol. 23. Pp. 131-136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
[10] Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion. Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395-3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
[11] Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution. Proce-dia Cirp. 2016. Vol. 44. Pp. 395-400 DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
[12] Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms. IFAC Proceedings Volumes. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132-137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
[13] Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. – Vol. 48. Pp. 233-242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
[14] Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments. Robotica. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105-110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
[15] Pamanes-Garcia J.A. A criterion for the optimal placement of robotic manipulators. IFAC Proceedings Vol-umes. 1990. Vol. 23. No. 3. Pp. 149-153. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)52549-5
[16] Chedmail P. Synthèse de robots et de sites robotisés Modélisation de robots souples. Diss. Nantes, 1990.
[17] Pamanes G.J.A., Zeghloul S. Optimal placement of robotic manipulators using multiple kinematic criteria. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE Computer Society. 1991. Pp. 933-938. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131708

[18] Kozhevnikov, M.M., CHumakov, O.A., Ilyushin, I.E., YUrkina, A.A. Methodology for optimizing the placement of a robotic manipulator in the technological process of laser cutting, Doklady Belorusskogo gosu-dar-stvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki. 2021. Vol. 19. No. 3. Pp. 49-57 (rus)
[19] Homchenko V.G., Koltyshkin A.V. Optimization of the robot manipulator placement relative to the imple-mented trajectory in the robotic complex based on the trimming press, Avtomatizaciya, mek-hatronika, informacionnye tekhnologii. 2020. Pp. 59-63 (rus)
[20] Chumakov O.A. Optimization of the anthropomorphic manipulator placement, Informacionnye tekhno-logii v obrazovanii, nauke i proizvodstve [Elektronnyj resurs] : materialy XI mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Minsk, 21-22 noyabrya 2023 g. / sost. M. G. Karasyova. – Minsk : BNTU, 2024. C. 106-112 (rus)

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.867
doi:10.18720/SPBPU/2/id-137

С.В. Никитин

ВЕРИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦЕПНОГО КОНВЕЙЕРА С ГУСЕНИЧНЫМ ПРИВОДОМ



Сергей Васильевич Никитин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: sergey_nikj@mail.ru

Аннотация

Конвейеры, применяемые на предприятиях, должны обладать надежностью и долговечностью, которые закладываются еще на стадии их проектирования. Поэтому достоверное определение динамических нагрузок, являющихся существенным фактором, влияющим на указанные качества, считается важной задачей науки и техники. В данной работе представлена динамическая модель цепного грузонесущего конвейера с гусеничным приводом, проведены результаты расчета динамических нагрузок, произведена оценка их достоверности путем сравнения с результатами натурного эксперимента. Установлены взаимосвязи между параметрами дискретизации модели конвейера и достоверностью получаемых результатов расчета.

Ключевые слова: цепной конвейер, гусеничный привод, кинематика зацепления привода, динамическая модель.

Введение

Конвейеры – машины позволяющие выполнять перемещение различных грузов с большой производительностью, поэтому они являются неотъемлемыми транспортными средствами ресурсодобывающих и производственных предприятий, перерывы в работе которых часто недопустимы. Поэтому к долговечности и надежности данных машин и их элементов предъявляются высокие требования. Данные свойства этих

машин закладываются еще на стадии проектирования, когда определяются нагрузки, выполняется тяговый расчет, происходит выбор и проверочные расчеты основных комплектующих. На стадии проверочных расчетов деталей и элементов машин следует учитывать динамические нагрузки.

Динамическим нагрузкам, возникающим в конвейерах, исследуются аналитическими методами [1- 10] и проведением натурных экспериментов [10 - 12].

Аналитические методы чаще всего основаны на создании динамических моделей, описываемых системами дифференциальных уравнений, составление и решение которых является не тривиальной задачей. Кроме того, создание таких моделей требует задания параметров машины, которые неразрывно связаны с ее конструкцией.

В большинстве указанных работ [1 - 8] ограничиваются составлением моделей, а вопросы их использования и верификации, т.е. проверки на адекватность, упускаются.

В цепных конвейерах превалирующим фактором, создающим динамические возмущения является кинематика зацепления приводного элемента, звездочки или гусеничной цепи привода, с шарнирами тяговой цепи [4, 10]. При этом простая математическая модель гусеничного привода приведена только в [10], а сверки результатов, получаемых при помощи такой модели, с результатами натурного эксперимента не представлено.

Следует отметить, что гусеничный привод более сложен по конструкции, чем классический угловой с приводной звездочкой, однако он может быть установлен на любом прямолинейном участке трассы конвейера, а кинематика зацепления такова, что тяговая цепь движется более равномерно [10].

Поэтому в задачи данной работы входят: разработка динамической модели цепного конвейера с гусеничным приводом, проверка качества получаемых с ее помощью результатов и их сравнение с данными натурного эксперимента.

Методы

В качестве верификационных данных используются результаты измерений натяжения тягового органа, полученные на специальном исследовательском комплексе, включающем в себя промышленный двухприводной грузонесущий конвейер длиной 48,6 м с тяговой двухшарнирной цепью. Он был создан на и исследовался кафедре подъемно-транспортных машин СПбГПУ (старое наименование) [10].

Схема трассы грузонесущего конвейера представлена на рис.1, а). Здесь тяговая двухшарнирной цепь Д-200 с подвесками приводится в движение гусеничным приводом.

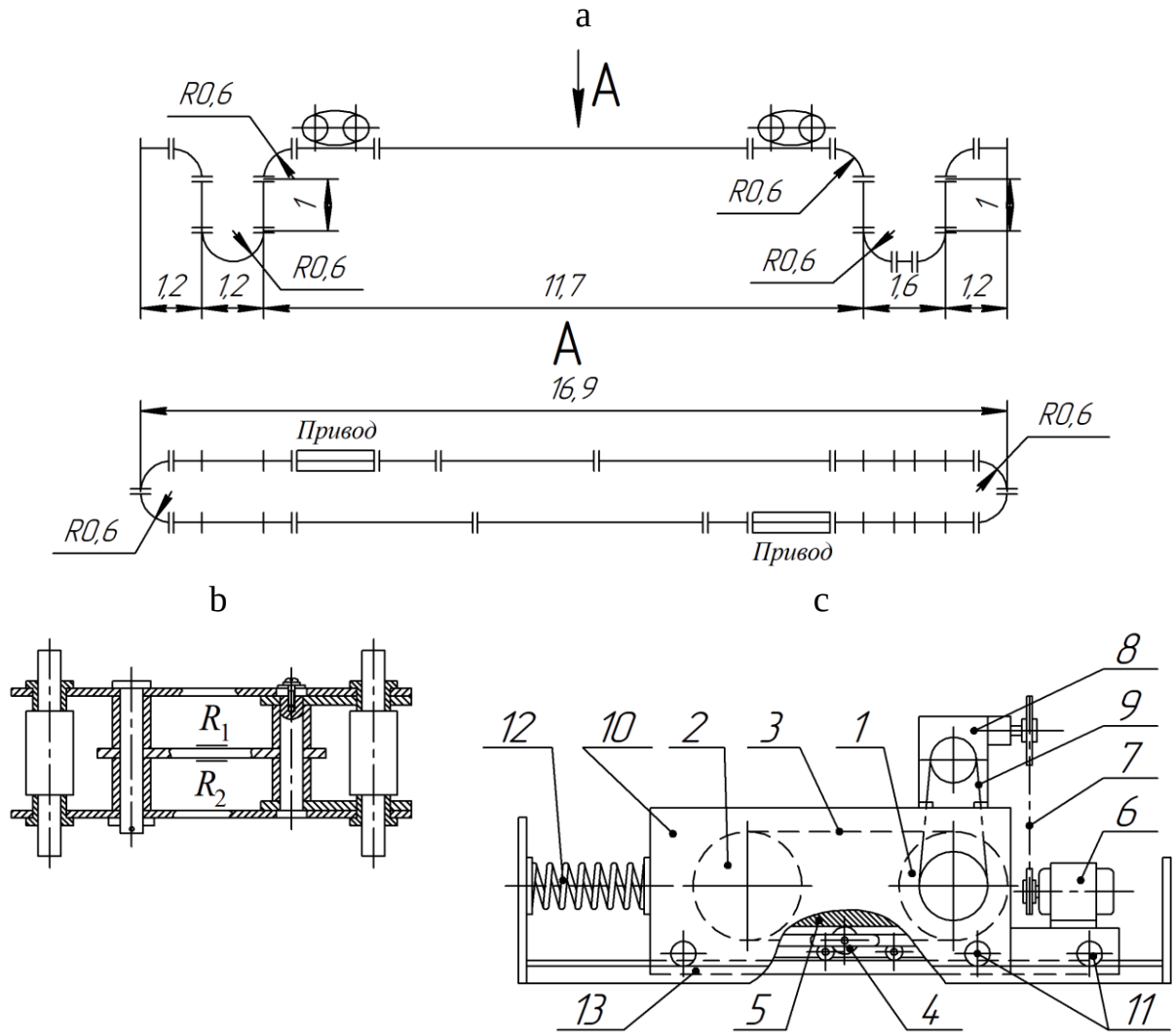


Рис. 1. Подвесной грузонесущий конвейер:
a) схема трассы конвейера; b) измерительное звено для регистрации натяжений тяговой цепи; c) гусеничный привод конвейера

Замер натяжений в тяговой цепи осуществляется методом электротензометрирования. Для одновременной записи усилий в ветвях тягового элемента использовались две тензовставки одинаковой конструкции (рис. 1, b). Тензометрические звенья вставлены в тяговую цепь на таком расстоянии друг от друга, чтобы они одновременно проходили свои приводы. Регистрация напряжений, характеризующих величину усилия натяжения тягового органа, с тензометрических мостов, осуществлялась путем записи на фотобумагу магнитоэлектрического осциллографа К12-22.

Для приведения в движение тягового элемента конвейера служит гусеничный привод (рис.1, c), который состоит из приводной (1) и

натяжной (2) звездочек, на которые надета приводная гусеничная цепь (3) с кулаками-роликами (4), перемещающаяся по упорному направляющему рельсу (5). Приводная звездочка вращается от электродвигателя (6) через цепную передачу (7), редуктор (8) и цепную передачу (9).

Механизмы гусеничного привода размещаются на подвижной раме (10), снабженной опорно-направляющими катками (11) и пружинным упором (12). Подвижная рама может перемещаться на этих катках по направляющим (13). При работе привода усилие, реактивное тяговому усилию гусеничной цепи, сжимает пружины и перемещает сдвижную раму привода. Ход рамы соответствует тяговому усилию, при превышении его допускаемого предела подвижная рама включает конечный выключатель и конвейер останавливается.

Такой привод сложнее по конструкции и дороже в изготовлении, чем звездочный, но его можно разместить в любом месте прямолинейного участка трассы, а также обеспечивается более плавное движение тяговой цепи.

На рис. 2, а) представлена схема кинематического взаимодействия кулака гусеничного привода, с прямой образующей участка контакта, с шарниром основной тяговой цепи конвейера. Вход в зацепление происходит в момент, кулак совершает вращательное движение вокруг одной из звездочек привода. Поэтому, если постоянную угловую скорость звездочки обозначить через ω, учесть направление движения кулака и шарнира тягой цепи (шарнир тяговой цепи движется вдоль горизонтальной линии, а контактирующая с ним точка кулака по дуге окружности с центром на оси звездочки), и изменение радиуса контакта относительно центра вращения звездочки, скорость V шарнира тяговой цепи будет изменяться по закону

$$V(t) = \omega(R+e)\frac{1}{\cos^2\left[\alpha - \varphi_*(t)\right]}. \quad (1)$$

При выходе кулачка на прямолинейный участок трассы гусеничной цепи линейная скорость движения кулака и приводимого им в движение шарнира тяговой цепи сравниваются

$$V(t) = \omega(R+e). \quad (2)$$

Здесь R – радиус делительной окружности звездочек привода, e – расстояние между плоскостью зацепления кулачков и осью гусеничной цепи привода; α – начальный угол зацепления, в известных конструкция находится в диапазоне от 5° до 15°; $\varphi_*(t)$ – угол поворота приводной звездочки привода, приведенный к отрезку от 0 до угла перезацепления $\varphi_{ПЗ}$, причем φ_* равно 0 в начальный момент. Угол перезацепления соответствует углу поворота приводной звездочки во время совершения

которого происходит одно перезацепление кулака гусеничной цепи с шарниром тяговой цепи $\varphi_{ПЗ} = l_{ПЗ} / (R + e)$.

Движение приводимого кулаком шарнира тяговой цепи по закону (1) происходит в течение времени $t_\alpha = \alpha / \omega$, а полное время перезацепления составляет $t_{ПЗ} = l_{ПЗ} / (\omega(R + e))$, где $l_{ПЗ}$ – шаг кулачков цепи гусеничного привода. Соответствующий закон изменения скорости и ускорения приводимого в движения шарнира тяговой цепи представлен на графике рис 2, b)

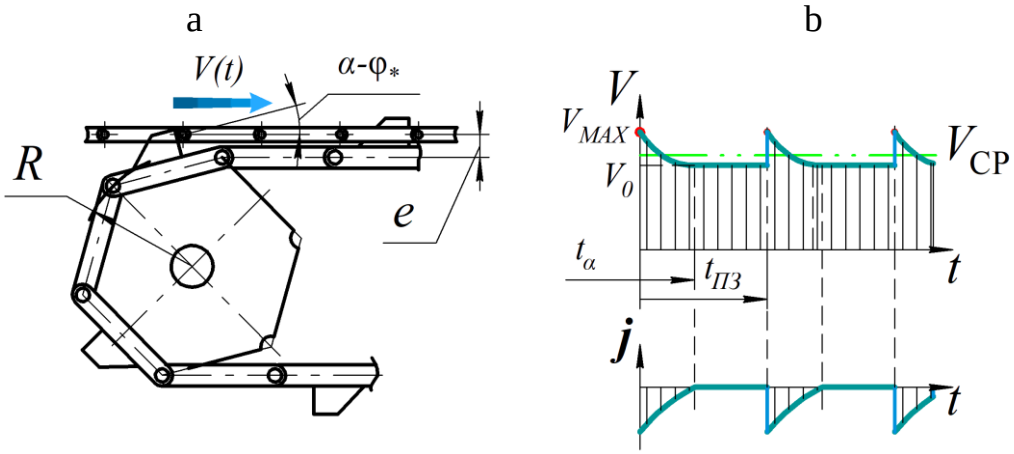


Рис. 2. Кинематика гусеничного привода
а) схема; b) графики изменения скорости и ускорения приводимого в движение шарнира тяговой цепи конвейера.

Исследуемая далее динамическая модель конвейера состоит из дискретной модели гусеничного привода, взаимодействующего с тяговым органом, представленным моделью эквивалентного упруго-вязкого стержня с распределенными параметрами [10]. Свободные колебания в упруго вязком стержне описываются уравнением Эйлера-Бернулли [10]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\eta F}{m_0} \frac{\partial^3 U}{\partial t \partial x^2}, \qquad (3)$$

где параметр ν имеет размерность и физический смысл скорости движения волны вдоль стержня, м/с^2; коэффициент η определяет уровень поглощаемой системой энергии и имеет размерность коэффициента динамической вязкости, кг·м$^{-1}$·с$^{-1}$; параметры F, m_0 соответственно имеют смысл площади поперечного сечения описываемого стержня и его погонной массы.

Численное решение уравнения в частных производных (3) осуществляется конечно-разностным методом. Применяется устойчивая неявно-явная разностная схема [13]. При этом упруго-вязкий стержень разбивается на конечное число узлов, расположенных равномерно с шагом Δx. Решением такого уравнения является табличная функция перемещений

$U_{i,t}$, где i – номер узла вдоль стержня, а t – индекс, указывающий на расчетный момент времени.

На рис. 3 представлен элемент динамической модели конвейера, состоящий из дискретной модели гусеничного привода, взаимодействующего с моделью тягового органа в его узле с номером «*dr*» (индекс времени опускается).

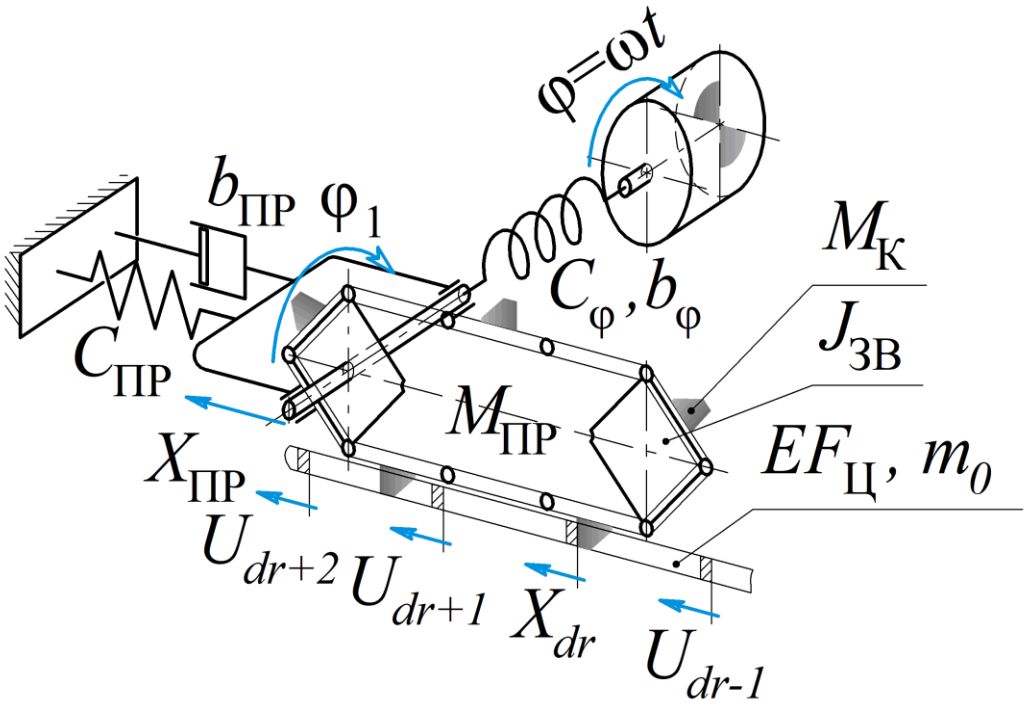


Рис. 3. Фрагмент динамической модели конвейера с гусеничным приводом

Разработанная динамическая модель исследует относительные колебания элементов тягового органа относительно средней скорости движения цепи $V_{СР}$, поэтому в уравнениях динамики не учитываются статические сопротивления его движению, а перемещение приводного узла U_{dr} должно происходить со скоростью

$$V_{dr}(t) = V(t) - V_{СР}, \qquad (4)$$

где функция $V(t)$ определяется выражениями (1) и (2).

Интегрируя выражение (4) по времени с учетом (1), (2) находят функцию относительных перемещений приводного узла

$$\begin{cases} X_{dr}(t) = -(R+e)\cdot tg\left[\alpha - \varphi_*(t)\right] + D - V_{СР}\cdot t \quad при \quad t < t_\alpha \\ X_{dr}(t) = D - V_{СР}\cdot t_\alpha + (V_0 - V_{СР})\cdot(t - t_\alpha) \qquad при \quad t_\alpha < t < t_{ПЗ} \end{cases}, \qquad (5)$$

а из условий $X_{dr}(0)=0$ и $X_{dr}(t_{ПЗ})=0$ определяются постоянная интегрирования D и средняя скорость $V_{СР}$

$$D = (R+e)\cdot tg[\alpha]\ ;\ V_{CP} = V_0\cdot\left(1 - \frac{(R+e)\cdot(tg[\alpha]-\alpha)}{l_{ПЗ}}\right), \qquad (6)$$

где $V_0 = \omega\,(R + e)$ – номинальная скорость конвейера.

Модель гусеничного привода, представленная на рис. 3 характеризуется набором обобщенных координат: $x_{ПР}$ – упругое перемещение рамы привода под действием внешних динамических сил; φ – угол поворота выходного вала редуктора; φ_1 – угол поворота приводной звездочки. Вводится угол закручивания передаточного звена $\psi = \varphi_1 - \varphi = \varphi_1 - \omega t$.

Представленная модель привода (рис. 3) учитывает: податливость металлоконструкции рамы; вращательную упругость элементов привода, а именно, возможность крутильной деформации выходного вала редуктора. Математическое описание сводится к системе из двух дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} M_{ПР} \cdot \ddot{x}_{ПР} = -C_{ПР} \cdot x_{ПР} - b_{ПР} \cdot \dot{x}_{ПР} + S \\ \left(2J_{ЗВ} + J_K\right) \cdot \ddot{\psi} = S_\tau \cdot (R + e) - C_\varphi \cdot \psi - b_\varphi \cdot \dot{\psi} \end{cases}. \qquad (7)$$

где $M_{ПР}$ – масса привода; $J_{ЗВ}$ – момент инерции звездочки; $J_К$ – суммарный момент инерции приводной цепи с кулаками; $J_{ПР}$ – момент инерции привода приведенный к выходному валу редуктора, включает в себя моменты инерции ротора двигателя, вращающихся частей редуктора; $C_{ПР}$, $b_{ПР}$ – параметры жесткости и сопротивления рамы привода; C_φ и b_φ – параметры упругости и сопротивления системы приводная цепь - кулачек; P – продольное усилие, действующее со стороны цепи; P_τ – окружное усилие, действующее со стороны цепи.

Продольное усилие Р определяется параметрами, характеризующими свойства тягового органа и деформациями системы

$$P = \frac{EF_Ц}{\Delta x} \cdot \left(X_{dr+1} - U_{dr}\right) - \frac{EF_Ц}{\Delta x} \cdot \left(X_{dr} - U_{dr-1}\right)$$

Окружное усилие является составляющей продольного и определяется выражениями:

$P_\tau = P \cdot \cos(\alpha - \varphi_*(t) + \psi(t))$ при $t < t_\alpha$,

$P_\tau(t) = P(t)$ при $t_\alpha < t < t_{ПЗ}$.

Угол φ*(t) поворота определяется соотношением:

$\varphi_*(t) = \omega \cdot t - \varphi_{ПЗ} \cdot floor\left(\varphi(t) / \varphi_{ПЗ}\right)$,

где *floor*() – функция округления до меньшего целого числа.

Учитывая динамическое изменение координат элементов привода, перемещения приводного узла (5), передающееся в качестве граничного условия в модель натяжного устройства, примут вид

$$\begin{cases} X_{dr}(t) = -(R+e)\cdot tg\left[\alpha - \varphi_* + \psi\right] + \\ \qquad +D - V_{\text{СР}}\cdot t + x_{\text{ПР}} \qquad при \;\; t < t_\alpha \\ X_{dr}(t) = -(R+e)\cdot tg\left[\psi\right] - V_0\cdot t_\alpha + D + \\ \qquad +(V_0 - V_{\text{СР}})\cdot t + x_{\text{ПР}} \;\; при \;\; t_\alpha < t < t_{ПЗ} \end{cases} \tag{8}$$

Основные параметры грузонесущего конвейера, реализованного в виде специальном исследовательском комплексе, на основе которых строится расчетная модель представлены в табл. 1. Коэффициенты, характеризующие упруго-вязкие характеристики тягового органа определяются согласно работам [10, 14, 15].

Таблица 1. Параметры моделируемого конвейера

№ п.п.	Наименование параметра	Обозначение	Значение
1	Длина трассы, м	L	48,65
2	Скорость движения конвейера, м/с	V	0,37
3	Тип тяговой цепи		Д-200
4	Шаг тяговой цепи по зацеплению, м	$t_{\text{Ц}}$	0,2
5	Жесткость одного метра цепи, Н/м	$EF_{\text{Ц}}$	15000000
6	Коэффициент поглощения энергии в тяговом органе	ψ	0,15
7	Погонная масса тягового органа совместно с грузом, кг/м	$q_{\text{Ц}}\,(m_0)$	8,4
8	Диаметр звездочки гусеничного привода, м	D	0,23
9	Расстояние между плоскостью зацепления кулачков и осью гусеничной цепи привода	e	0,06
10	Шаг зацепления шарнира цепи с зубом звездочки, м	$l_{\text{ПЗ}}$	0,4
11	Начальный угол зацепления, °	α	15
12	Координата привода на трассе, м	$X_{\text{ПР}}$	46,7 (11)
13	Масса привода, кг	$M_{\text{ПР}}$	600
14	Момент инерции приводной звездочки, Нм^2	$J_{\text{ЗВ}}$	1,6
15	Масса кулака приводной цепи, кг·м^2	$M_{\text{К}}$	3
16	Количество кулаков гусеничной цепи		12
17	Жесткость рамы привода, Н/м	$C_{\text{ПР}}$	6000000
18	Коэффициент сопротивления, Н·с/м	$b_{\text{ПР}}$	15000
19	Вращательная жесткость привода, Нм/рад	C_φ	1000000
20	Коэффициент сопротивления вращательной связи, Н·м·с/рад	b_φ	2000

Известно, что решение уравнения (3) численным явным методом [13] наиболее устойчиво если параметр $\theta = v^2\Delta t^2/\Delta x^2$ близок к 1. Используемый

при решении неявно-явный метод устойчив при значительных отклонениях параметра θ от 1. Для оценки устойчивости применяемого метода численные эксперименты проводились при различных дискретностях разбиения тягового органа Δx, и различной дискретизации по времени таким образом, чтобы параметр θ имел определенные значения. Конкретные величины дискретностей указаны в таблице 2.

Таблица 2. Дискретность по времени Δt , с, при соответствующих ей дискретности по координате Δx и параметре θ

Δx, м	**θ**			
	11,16	**2,79**	**1**	**0,698**
0,8	0,002	0,001	0,000598665	0,0005
0,4	0,001	0,0005	0,000299333	0,00025
0,2	0,0005	0,00025	0,000149666	0,000125

Так же имеется возможность при расчетах учитывать только отдельные физические характеристики привода, поэтому численные эксперименты проведены в четырех различных вариантах: без учета динамических характеристик привода, т.е. координаты выходного звена вычисляются при помощи выражений (5); с учетом упругих колебаний рамы привода; с учетом крутильных колебаний вала; с учетом колебаний как рамы, так и крутильных колебаний выходного вала привода.

Результаты

В общей сложности было выполнено 48 численных эксперимента. Время моделирования составило 3 с при дискретностях разбиения тягового органа и временной шкалы принятых согласно табл. 2. Пример полученных результатов, в виде графика динамического усилия в тяговой цепи, набегающей на привод, представлен на рис. 3. Представлены графики полученные при расчете модели с дискретностью разбиения тягового органа Δx = 0,8 м и параметром θ = 1.

a) b)

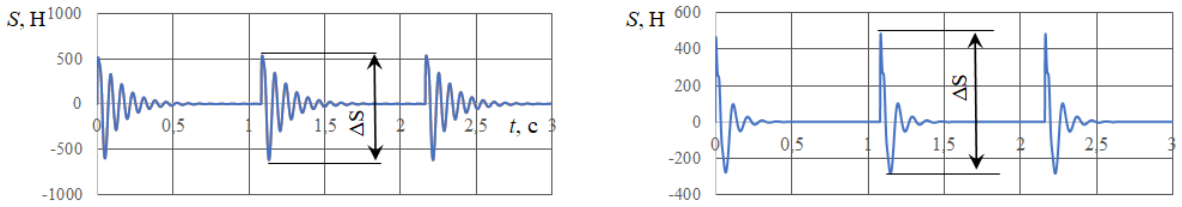


Рис. 4. Динамическое усилие S в тяговой цепи набегающей на привод
a) расчет без учета динамических характеристик привода
b) расчет с учетом колебаний рамы и крутильных колебаний выходного вала привода

Показательным параметром является размах динамического усилия ΔS (рис. 4), результаты вычисления которого представлены на графиках рис. 5.

На рис 6 представлены результаты обработки осциллограммы записи усилий в конвейере исследовательского комплекса, описанного выше. Сняты показания с двух датчиков в положениях, близких к моментам времени набегания звеньев цепи, на которых они расположены, на привод. Величины размахов динамических нагрузок найдены с учетом указанных на графиках для соответствующих датчиков тарировочных коэффициентов.

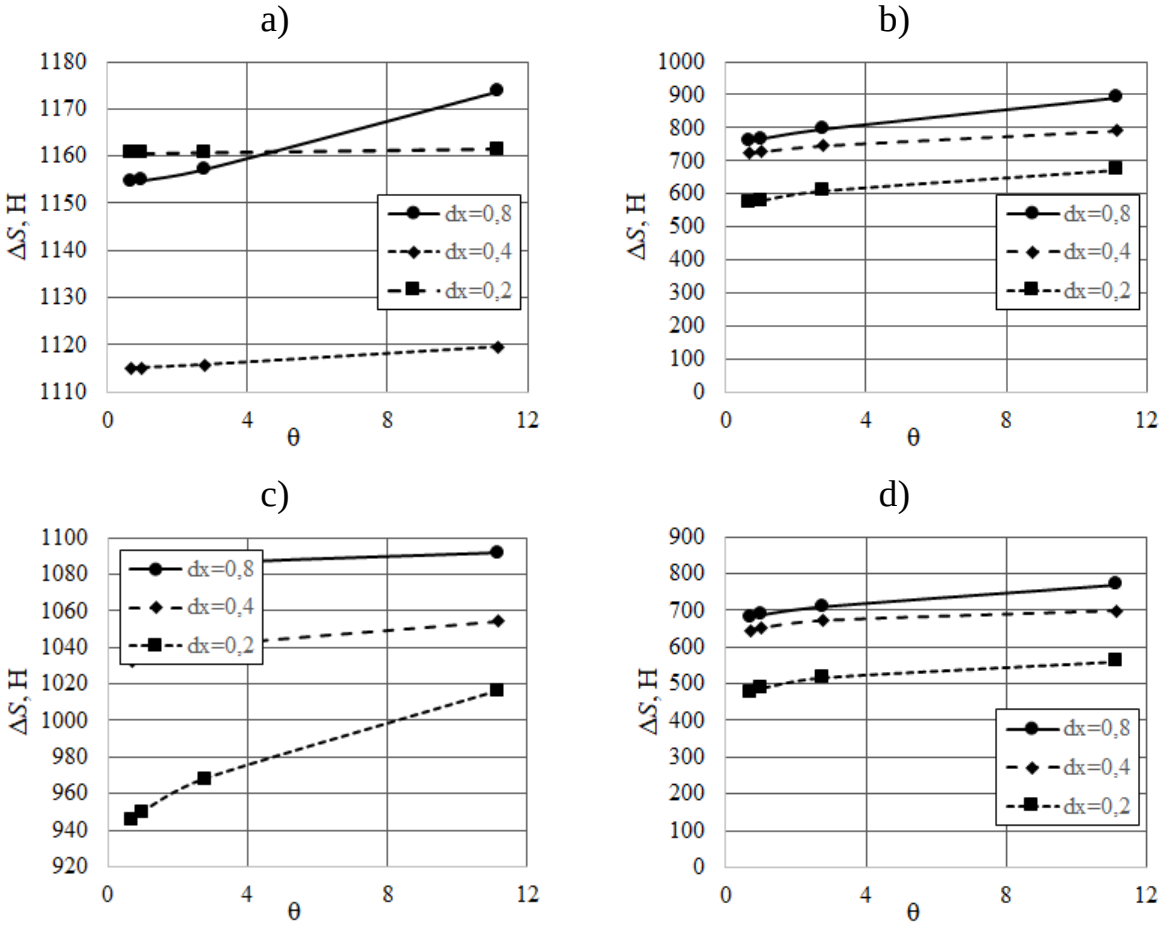


Рис. 5. Результаты расчета размаха динамического усилия ΔS в цепи тягового органа набегающего на привод при различной дискретности разбиения тягового органа Δx и различной величине параметра θ

a) эксперименты без учета динамических характеристик привода;
b) эксперименты с учетом упругих колебаний рамы привода
c) эксперименты с учетом крутильных колебаний вала привода
d) эксперименты с учетом колебаний рамы и крутильных колебаний вала привода

Обсуждение

Общая тенденция в полученных результатах говорит о том, что с ростом параметра θ увеличивается расчетное значение размаха динамического усилия ΔS.

Эксперименты, проведенные без учета динамических характеристик привода, были выполнены с целью оценки устойчивости результатов моделирования волновых процессов в тяговом органе и дальнейшего определения влияния, оказываемого включением в колебательный процесс элементов привода. Учитывая то, что результаты расчета представленные на рис. 5, a), при различных дискретностях разбиения тягового органа, максимально отличаются не более чем на 5%, а максимальное отличие результатов полученных при Δx = 0,8 м и различных значениях параметра θ составляет 1,6%, можно утверждать, что используемая при решении уравнения (3) неявно-явная схема будет давать достаточно корректные результаты. Это важно, т.к. при моделировании конвейера с различной нагрузкой на трассе параметр θ не будет постоянным для системы.

Величины размаха ΔS, полученные с учетом колебаний рамы привода, рис. 5, b) оказались на 25 – 51% меньше, чем для моделей с жесткой рамой при соответствующих параметрах дискретизации. Наибольшее снижение, 42 – 51% наблюдается для моделей с дискретностью разбиения тягового органа Δx равной 0,2 м.

В экспериментах с учетом крутильной жесткости выходного вала редуктора уменьшение размаха динамического усилия, по сравнению с моделью с жестким приводом, составляет 9 – 38 %. При этом для дискретностей 0,8 и 0,4 м уменьшение составило 9 – 12%, а для дискретности 0,2 м: 21 – 38%.

В экспериментах, где учитывались обе динамические характеристики гусеничного привода снижение размаха динамического усилия, составило 37 – 45% при Δx = 0,8 и 0,4 м и порядка 59 – 72% при Δx = 0,2 м.

Расчет динамических нагрузок в цепном конвейере с помощью представленной модели дает, при различных параметрах дискретности системы, отличающиеся результаты. Так, в экспериментах с учетом колебаний рамы привода при снижении дискретности разбиения тягового органа с 0,8 до 0,4 м приводит к снижению ΔS на 5 – 11%, а при снижении дискретности с 0,4 до 0,2 м ΔS снижается на 15 – 21%. Похожая картина наблюдается и при учете крутильных колебаний выходного вала привода, однако, здесь снижение рассчитываемых величин ΔS составляет от 3 до 9%.

Указанные различия в результатах моделирования одного и того же объекта при различных параметрах дискретизации приводят к возникновению вопроса о величине этих параметров, приводящих к

наиболее точным результатам расчета. С одной стороны, уменьшение параметра Δx должно приводить к увеличению точности определения перемещений сечений эквивалентного тяговому органу стержня. Тоже самое должно относиться к дискретности по времени Δt. Однако увеличение числа расчетов неизбежно приводит к накоплению ошибок вычислений, и отклонению результатов расчета от точного значения. С другой стороны, параметры модели конвейера в основном задаются приближенно, и не учитываются множество иных факторов, влияющих на реальные процессы в машине.

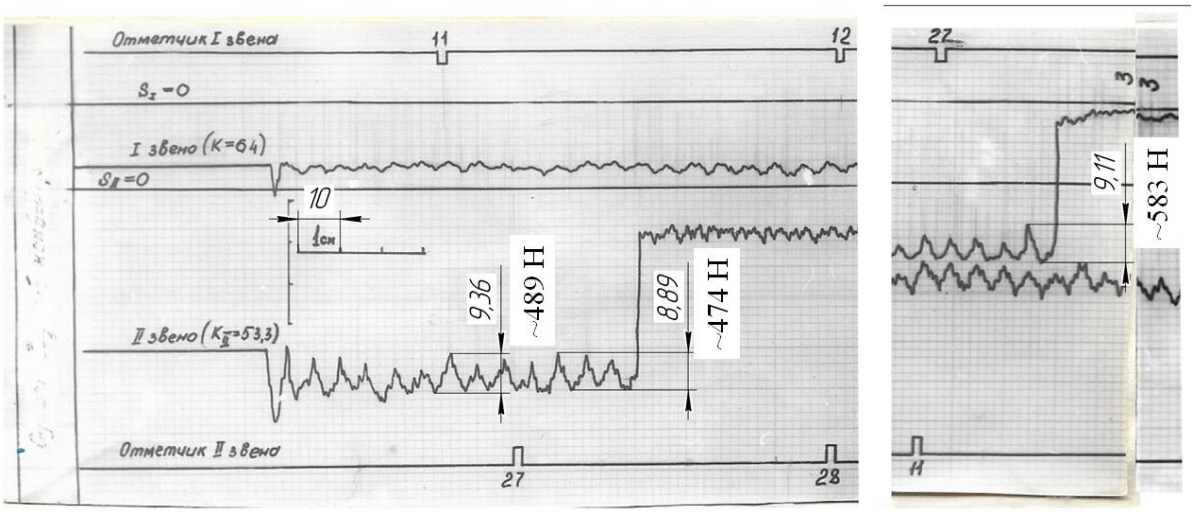


Рис. 6. Осциллограмма записи усилий в тяговой цепи грузонесущего конвейера с гусеничным приводом

На осциллограмме (рис. 6) записи усилий в тяговой цепи конвейера, модель которого была представлена выше, приводятся значения размахов колебаний усилия натяжения в точках, набегающих на привод. Величина найденных размахов составляет 583 Н в первом датчике 474, 489 Н во втором датчике. Эти значения близки к результатам расчета по моделям, которые учитывают упругие перемещения рамы привода и крутильные колебания вала при дискретности Δx = 0,2 м и параметре θ равном 1 и 0,68. Расчетная величина размаха динамического усилия в тяговой цепи, для этих случаев, соответственно равна 486 и 477 Н, что на 18% расходится с результатом измерения усилий по первому датчику и на 2,5% по второму датчику.

Так же следует отметить невозможность получения настолько близко совпадающих результатов расчетов с натурным экспериментом без адекватно заданных динамических параметров моделей. Например, заданная крутильная жесткость вала C_{φ} (рабл.2) соответствует жесткости вала диаметром 75 мм с длиной крутящегося участка 250 мм, а принятая жесткость рамы привода $C_{ПР}$ соответствует жесткости пружины 12, рис. 1.

Заключение

По итогам представленной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана динамическая модель конвейера, содержащая взаимосвязанные подмодели тягового органа и гусеничного привода. Причем продольные колебания в тяговом органе описываются уравнением в частных производных, а модель гусеничного привода представляет собой систему дискретных масс. Основным исследуемым в данной работе результатом вычисления по предложенной модели является размах динамического усилия, возникающего в тяговом элементе в месте его набегания на кулак гусеничной цепи привода.

2. Произведена оценка устойчивости решения уравнения в частных производных неявно-явным конечно-разностным методом при различных параметрах дискретизации системы по времени и пространственной координате. Исследование показало близкие результаты, менее 2% относительно наибольшего определенного значения размах динамического усилия, при всех заданных вариантах дискретизации.

3. Показано, при помощи численных экспериментов, что учет динамических характеристик привода влияет на результат, получаемый при расчете размаха динамических усилий по предложенной модели. При заданных значениях жесткости рамы привода и крутильной жесткости выходного вала редуктора привода выявлено, что: учет крутильной жесткости вала снижает размах динамического усилия на 10 – 20 % относительно модели без учета данной характеристики привода; учет продольных смещений рамы привода приводит к снижению размах динамического усилия на 25 – 51 %. Так же было выявлено влияние параметров дискретизации модели тягового органа и дискретизации по времени на получаемый результат.

4. Сравнение результатов, получаемых при помощи предложенной модели, при наименьших значениях параметров дискретизации системы, с результатами натурного эксперимента показали максимальное их расхождение на 18%. Результаты, полученные по предложенной динамической модели с большими величинами параметров дискретизации, являются завышенными на 20 – 30 %, однако их использование при проверочном расчете элементов конвейера может оказаться предпочтительней, т.к. даст дополнительный запас прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Jiang, Shoubo, Ren, Weijian, Mao, Qinghua, Zeng, Qingliang, Yu, Pengfei, Gao, Kuidong, Wang, Liang, Dynamic Analysis of the Scraper Conveyor

under Abnormal Operating Conditions Based on the Vibration and Speed Characteristics, Shock and Vibration, 2021, 8887744, 17 pages, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/8887744
[2] Polishchuk L. K. et al. Dynamics of the conveyor speed stabilization system at variable loads //Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2022. – Т. 12. – №. 2.
[3] Lodewijks G. Two decades dynamics of belt conveyor systems //Bulk Solids Handling. – 2002. – Т. 22. – №. 2. – С. 124-132.
[4] Korobko M. M. Discrete model of chain conveyor movement dynamics //Machinery & Energetics. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 89-94.
[5] Yang G. Dynamics analysis and modeling of rubber belt in large mine belt conveyors //Sensors & Transducers. – 2014. – Т. 181. – №. 10. – С. 210.
[6] Шпрехер Д. М. Универсальная компьютерная модель для исследования динамики скребкового конвейера с двухдвигательным приводом / Д. М. Шпрехер, Г. И. Бабокин, А. В. Зеленков, Д. С. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 56-64. – DOI 10.17213/0136-3360-2021-2-56-64. – EDN XGKZXB.
[7] Динамика горизонтального ленточного конвейера для сушки семян в конвейерном устройстве обработки семян физическими методами / С. С. Воложанинов, А. А. Завалий, Д. Д. Волобуев, В. С. Воложанинова // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2021. – № 28(191). – С. 53-74. – EDN DEHSXC.
[8] Ловейкин, В. С. Математическое моделирование движения скребкового транспортера / В. С. Ловейкин, Ю. А. Ромасевич, А. Е. Грушко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 9-3(20-3). – С. 317-321. – DOI 10.12737/16932. – EDN VDQFPT.
[9] Yang J., Fu S., Wang D. Dynamic simulation of startup-characteristics of scraper conveyor based AMEsim. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)
[10] Смирнов В.Н. Подвесные конвейеры. Теория расчета, прогнозирование тенденций развития. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. - 267 с.
[11] Jiang S. et al. Dynamic properties of chain drive in a scraper conveyor under various working conditions //Machines. – 2022. – Т. 10. – №. 7. – С. 579.
[12] Świder J., Herbuś K., Szewerda K. Dynamic analysis of scraper conveyor operation with external loads //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 94. – С. 01009.
[13] Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2004.

[14] Никитин С.В. Расчетное определение упруго-вязких параметров конвейерных цепей // Научно технические ведомости СПбГПУ. – 2014. № 1: Наука и образование. – Санкт-Петербург: издательство СПбГПУ. – 2014. с. 156 – 163.
[15] Никитин, С. В. Учет диссипации энергии в тяговом элементе в динамической модели цепного конвейеров / С. В. Никитин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 748-763. – EDN HSWHHJ.

S.V.Nikitin

VERIFICATION OF THE DYNAMIC MODEL OF A CHAIN CONVEYOR WITH A CATERPILLAR DRIVE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Conveyors used at enterprises must be reliable and durable, which are laid down at the design stage. Therefore, reliable determination of dynamic loads, which are a significant factor influencing the specified qualities, is considered an important task of science and technology. This paper presents a dynamic model of a chain load-bearing conveyor with a caterpillar drive, the results of calculating dynamic loads are carried out, and their reliability is assessed by comparing them with the results of a full-scale experiment. The relationships between the discretization parameters of the conveyor model and the reliability of the calculation results are established.

Key words: chain conveyor, caterpillar drive, drive engagement kinematics, dynamic model.

REFERENCES

[1] Jiang, Shoubo, Ren, Weijian, Mao, Qinghua, Zeng, Qingliang, Yu, Pengfei, Gao, Kuidong, Wang, Liang, Dynamic Analysis of the Scraper Conveyor under Abnormal Operating Conditions Based on the Vibration and Speed Characteristics, Shock and Vibration, 2021, 8887744, 17 pages, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/8887744
[2] Polishchuk L. K. et al. Dynamics of the conveyor speed stabilization system at variable loads //Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2022. – Т. 12. – №. 2.

[3] Lodewijks G. Two decades dynamics of belt conveyor systems //Bulk Solids Handling. – 2002. – Т. 22. – №. 2. – С. 124-132.
[4] Korobko M. M. Discrete model of chain conveyor movement dynamics //Machinery & Energetics. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 89-94.
[5] Yang G. Dynamics analysis and modeling of rubber belt in large mine belt conveyors //Sensors & Transducers. – 2014. – Т. 181. – №. 10. – С. 210.
[6] Sprecher D. M., Babokin G. I., Zelenkov A.V., Ovsyannikov D. S. Universal computer model for studying the dynamics of a scraper conveyor with a twin-motor drive // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Electromechanics. – 2021. – Vol. 64, No. 2. – pp. 56-64. – DOI 10.17213/0136-3360-2021-2-56-64. – EDN XGKZXB.
[7] Dynamics of a horizontal belt conveyor for drying seeds in a conveyor device for processing seeds by physical methods / S. S. Volozhaninov, A. A. Zavaliy, D. D. Volobuev, V. S. Volozhaninova // News of agricultural science of Taurida. – 2021. – № 28(191). – Pp. 53-74. – EDN DEHSXC.
[8] Левейкин, В. С. Математическое моделирование движения гребковского транспортера / В. С. Левейкин, Е. А. Ромаскевич, А. Е. Гурько // Акту–альные направление научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. - Т. 3, № 9-3(20-3). – С. 317-321. – DOI 10.12737/16932. – НОМЕР редакции VDQFPT.
[9] Yang J., Fu S., Wang D. Dynamic simulation of startup-characteristics of scraper conveyor based AMEsim. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)
[10] Smirnov V.N. Suspended conveyors. Calculation theory, forecasting of development trends. - St. Petersburg: Publishing house of SPbGPU, 2006. - 267 p.
[11] Jiang S. et al. Dynamic properties of chain drive in a scraper conveyor under various working conditions //Machines. – 2022. – Т. 10. – №. 7. – С. 579.
[12] Świder J., Herbuś K., Szewerda K. Dynamic analysis of scraper conveyor operation with external loads //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 94. – С. 01009.
[13] Formalev V.F., Reviznikov D.L. Numerical methods. Moscow: FIZMATLIT, 2004.
[14] Nikitin S.V. Computational determination of elastic-viscous parameters of conveyor chains // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Pedagogical University. - 2014. No. 1: Science and Education. – St. Petersburg: SPbGPU Publishing House. – 2014. pp. 156 – 163.
[15] Nikitin, S. V. Accounting for energy dissipation in a traction element in a dynamic model of chain conveyors / S. V. Nikitin // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2021. – No. 10. – pp. 748-763. – EDN HSWHHJ.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 66.042.88
doi:10.18720/SPBPU/2/id-138

М.А. Падалка[1], Д.К. Щеглов[2]

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ



[1]Максим Александрович Падалка,
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(812)4957704, E-mail: padalkamaksim@mail.ru



[2]Дмитрий Константинович Щеглов,
АО «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод»,
канд. техн. наук, доцент, почетный машиностроитель,
Тел.: (812)6655661, E-mail: _dk@bk.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы моделирования термодинамических процессов, происходящих в тепловых аккумуляторах на основе фазового перехода. Предложена математическая модель теплового аккумулятора, базирующаяся на ряде допущений. Для проверки корректности математической модели проведен ряд экспериментов над теплоаккумулирующим веществом со схожими условиями моделирования, исходными данными и допущениями. Сравнение результатов эксперимента и расчета показали корректность предлагаемого научно-методического аппарата с учетом выдвигаемых допущений.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, технологическая система, фазовый переход, тепловой процесс, теплоаккумулирующее вещество.

Введение

С начала освоения космоса одной из важнейших задач стало обеспечение необходимого теплового режима технологических систем, в том числе орбитальных. Еще с середины XX века были сделаны определённые научные заделы в области теплотехники, которыми пользуются и сегодня [13]. А именно разработаны различные способы обеспечения теплового режима в условиях космического пространства.

В настоящее время существует большое количество теплообменных аппаратов разных типов и принципов действия. У каждого типа есть свои особенности эксплуатации и области применения. Температурные диапазоны эксплуатации также различны. Одни теплообменные аппараты могут работать в нескольких средах, другие только в одной среде, например, в космосе [15].

К системам охлаждения с фазовым переходом относятся тепловые аккумуляторы. Тепловым аккумулятором называют устройство, предназначенное для аккумулирования тепловой энергии путем фазового перехода теплоаккумулирующего вещества с целью обеспечения требуемого теплового режима системы [1].

В данной статье выделяются основные факторы, влияющие на термодинамические параметры технологических систем охлаждения с фазовым переходом, производится выбор допущений для математического моделирования теплового аккумулятора, описывается эксперимент над теплоаккумулирующим веществом в камере тепла/холода для обеспечения различных условий эксплуатации и проверки корректности полученной математической модели.

Методы

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе сформирована математическая модель теплового аккумулятора, работающего на основе фазового перехода. На втором этапе проведен ряд экспериментов на тепловом и термодинамическом макетах в камере тепла и холода при температурах от минус 60°С до плюс 60°С и избыточном давлении теплоносителя с целью проверки прочности и герметичности теплообменника, визуального изучения взаимодействия теплообменника тепловых аккумуляторах (ТА) с теплоаккумулирующим веществом (ТАВ). На третьем этапе проведена валидация математической модели с экспериментом. Выявлены факторы, которые необходимо учитывать при формирования облика тепловых аккумуляторов.

Основные допущения, принятые при составлении математической модели системы тел, содержащей ТАВ:

– выделенные отдельные тела системы являются изотермичными;

– тепловые проводимости, теплофизические свойства тел и теплоносителей и мощность источников энергии не зависят от температуры [8];

– тепловое взаимодействие тел с ТАВ осуществляется только через корпус ТА или его составные части [3];

– корпус ТА и масса ТАВ представляются в виде эквивалентных изотермических пластин конечной толщины, размеры которых в плане определяются суммарной площадью соприкосновения (контакта) между собой, а толщина, соответственно, массой корпуса и ТАВ [7];

– теплоперенос, происходящий в ТАВ, описывается уравнениями для одномерной модели с эквивалентными параметрами, учитывающими реальные размеры и форму устройства [2, 9].

Уравнение сохранения энергии для i-го тела представлено в виде [1]:

$$(cm)_{i\neq k}\frac{dT_i}{d\tau} = P_i + \sigma_{ci}(T_c - T_i) + \sum_{j=1}^{n}\sigma_{ji}\left(T_j - T_i\right) + \sigma_{ki}(T_k - T_i) + \sigma_{\text{конв.г}}(T_\text{г} - T_i) \quad (1)$$

где c_i – удельная теплоемкость;

m_i – масса;

T_i – температура;

τ – время;

P_i – рассеиваемая мощность i-го тела;

i,j – номера в системе;

n – количество всех тел;

k – порядковый номер корпуса ТА;

σ_{ci}, σ_{ji}, σ_{ki} – тепловые проводимости i-го тела с окружающей средой, между телами i, j, k;

$\sigma_{\text{конв.г}}$ – тепловая проводимость между газом (жидкостью) и i-м телом системы при принудительной циркуляции или естественной конвекции;

$T_\text{г}$ – средняя объемная температура газа или жидкости.

Уравнение сохранения энергии для корпуса k, который контактирует с ТАВ:

$$(cm)_k\frac{dT_k}{d\tau} = P_k + \sigma_{ck}(T_c - T_k) + \sum_{i=1}^{n}\sigma_{jk}\,(T_i - T_k) + \sigma_{\text{конв.г}}(T_\text{г} - T_k) + Q_{\text{ТАВ}\,k} \quad (2)$$

где $Q_{\text{ТАВ}\,k}$ – количество теплоты, поглощенное или выделенное ТАВ.

Составляющее $Q_{\text{ТАВ}\,k}$ учитывает факторы переноса теплоты между ТАВ и корпусом ТА, а также взаимодействие с окружающей средой и источниками энергии.

В общем случае:

$$\mathrm{Q_{ТАВ\,k}} = \pm\int_{\tau_1}^{\tau_2}\int_{\mathrm{S_{k(ж,т)}}}\frac{\lambda_{\text{ж(т)}}\,\partial \mathrm{T_{ж(т)}}\,\mathrm{dS_k}\,\mathrm{d\tau}}{\mathrm{dn}} \quad (3)$$

где $S_{k(\text{ж})}$, $S_{k(\text{т})} = f(\tau)$ – полные площади соприкосновения жидкой и твёрдой фаз ТАВ с корпусом ТА;

λ – коэффициент теплопроводности;

τ – время;

S_k – площадь поверхности контакта между корпусом и ТАВ;

n – нормаль к поверхности;

T – температура;

ж, т – жидкое и твёрдое состояние вещества.

В тепловом аккумуляторе ТАВ в процессе осуществления теплопереноса и в зависимости от времени может находится в двухфазном состояниях: жидкое – твердое при плавлении, твердое – жидкое при затвердевании и однофазном: при нагреве (в твердом) и охлаждении (в жидком) до и после достижения фазопереходных температур по объему ТАВ [12].

На этом этапе математического моделирования необходимо ввести еще одно допущение: внутренние процессы, происходящие в ТАВ, носят одномерный характер [10]. Такое допущение упростит доступность математической модели для практического применения при формировании облика и составных частей теплового аккумулятора. Тогда возможно заменить истинные температурные кривые по толщине ТАВ на приближенные аналоги в виде параболических зависимостей по толщине ТАВ. Таким образом, получены дифференциальные уравнения 1-го порядка.[5] Следовательно, величину $Q_{\text{ТАВ}\,k}$ в уравнении (1), которая будет функцией координат границы раздела фаз $\xi(\tau)$, представляется в двух видах. При идеальном контакте ТАВ со стенкой ТА:

$$Q_{\text{ТАВ ж(т)}} = \frac{\lambda_{\text{ж(т)}} n_{\text{ж(т)}} S_k}{\xi_{\text{ж(т)}}} (T_{\text{кр}} - T_k) \tag{4}$$

При наличии зазора между ТАВ и ТА:

$$Q_{\text{ТАВ ж(т)}} = \frac{\lambda_{\text{ж(т)}} n'_{\text{ж(т)}} S_k}{\xi_{\text{ж(т)}} + \frac{\lambda_{\text{ж(т)}} n'_{\text{ж(т)}}}{K_{\text{заз}} S_k}} (T_{\text{кр}} - T_k) \tag{5}$$

где $T_{\text{кр}}$ – температура фазового перехода на границе фаз;

n – показатель степени параболы в уравнениях описывающих профиль температур по толщине слоя ТАВ;

$K_{\text{заз}}$ – коэффициент теплопередачи в зазоре между корпусом и ТАВ.

Толщина расплавленного слоя рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\xi_{\text{пл}}}{d\tau} = \frac{\frac{\lambda_{\text{ж}} n_{\text{ж}}}{\xi}(T_{\text{кр}} - T_k)\frac{c_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}\xi}{n_{\text{ж}}+1} - \frac{c_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}}{n_{\text{ж}}+1}\xi\frac{dT_k}{d\tau}}{\frac{c_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}}{n_{\text{ж}}+1}(T_{\text{кр}} - T_k) + \rho_{\text{ж}} r + \frac{c_{\text{т}}\rho_{\text{т}}(T_{\text{кр}} - T_{\text{т}}R_0)(R-\xi)2n_{\text{т}}}{(R-\xi_0)(n_T+1)}} \tag{6}$$

где $\xi_{\text{пл}} = \xi_{\text{ж}}$.

$$\frac{d\xi_{\text{затв}}}{d\tau} = \frac{\frac{\lambda_{\text{т}} n'_{\text{т}}}{\xi}(T_{\text{кр}} - T_k) + \frac{c_{\text{т}}\rho_{\text{т}}\xi dT_k}{n'_{\text{т}}+1\ d\tau}}{\frac{c_{\text{т}}\rho_{\text{т}}}{n'_{\text{т}}+1}(T_{\text{кр}} - T_k) + \rho_{\text{т}} r + \frac{c_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}(T_{\text{ж}}R_0 - T_{\text{кр}})(R-\xi)2n'_{\text{ж}}}{(R-\xi_0)(n'_{\text{ж}}+1)}} \tag{7}$$

где $\xi_{\text{затв}} = \xi_{\text{т}}$;

r – скрытая теплота фазового превращения;

$\xi_0(d\tau)$ – начальная толщина слоя ТАВ (определение по формуле Стефана);

$T_{\text{т}R_0}$, $T_{\text{ж}R_0}$ – температура твердой и жидкой фазы ТАВ при ξ_0 и τ_0 на адиабатической границе внутри вещества;

$\text{с}_\text{ж}$, $\text{с}_\text{т}$, $\rho_\text{ж}$, $\rho_\text{т}$ – удельные теплоемкости и плотности жидкой и твердой фаз ТАВ.

Условие идеального контакта ТАВ с ТА

$$\text{Т}_\text{к} = \text{Т}_\text{ж}|_{\text{X}=0} = \text{Т}_\text{т}|_{\text{X}=0} \quad (8)$$

Значения n определены экспериментальным образом и приняты в некоторых диапазонах. Например, $n_\text{ж} = 1.5 - 3$, $n_\text{т} = 1$ [4]. В данном случае температура тела равна средней объемной температуре жидкого или твердого ТАВ. В этом случае используется параболический закон, так как процесс нагрева или охлаждения ТАВ играет второстепенную роль. Уравнения теплового баланса записаны в двух видах. Для твердого ТАВ:

$$(cm)_\text{т} \frac{dT_{\text{т}V}}{d\tau} = \sigma_{\text{к}-\text{т}}(T_\text{к} - T_{\text{т}S}) = Q_{\text{ТАВ т}} \quad (9)$$

для жидкого ТАВ:

$$(cm)_\text{ж} \frac{dT_{\text{ж}V}}{d\tau} = \sigma_{\text{к}-\text{ж}}(T_\text{к} - T_{\text{ж}S}) = Q_{\text{ТАВ ж}} \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{к}-\text{т}} = \frac{\lambda_\text{т}}{X_V} S_k = \frac{1}{1-1/(1+n)^{1/n}} \frac{\lambda_\text{т}}{R} S_k \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{к}-\text{ж}} = \frac{\lambda_\text{ж}}{X_V} S_k = \frac{1}{1-1/(1+n)^{1/n}} \frac{\lambda_\text{ж}}{R} S_k \quad (12)$$

$$X_V = \left[1 - \frac{1}{(1+n)^{1/n}}\right] \quad (13)$$

где $\sigma_{\text{к}-\text{т}}$, $\sigma_{\text{к}-\text{ж}}$ – тепловые проводимости между корпусом и ТАВ в твердом или жидком состояниях;

$T_{\text{т}S}$, $T_{\text{ж}S}$ – поверхностная температура слоя ТАВ в твердом или жидком состояниях;

X_V – координата по толщине слоя ТАВ, которая соответвует его средней объемное температуре $\bar{T}_V$;

R – толщина слоя ТАВ.

Математическая модель предусматривает, что через тепловой аккумулятор от источника энергии проходит теплоноситель [14]. Таким образом образуется замкнутый контур:

$$(cm)_\text{г} \frac{dT_\text{г}}{d\tau} \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\text{конв}i}(T_i - T_\text{г}) \quad (14)$$

где $\text{с}_\text{г}$, $m_\text{г}$ – удельная и масса теплоносителя замкнутого контура.

Для сокращения времени расчета создана программа для определения параметров тепловых аккумулятора по представленной математической модели.

Для выполнения эксперимента создано два макета. Макет тепловой (МТ) предназначен для изучения поведения и взаимодействия ТАВ с металлическими элементами макета при температурах в камере тепла и

холода от минус 60 °С до плюс 60 °С, а также визуального изучения мест инициирования кристаллизации при охлаждении и протаивания при нагревании.

Макет теплогидравлический (МТГ) предназначен для проведения испытаний в камере тепла и холода при температурах от минус 60 °С до плюс 60 °С и избыточном давлении теплоносителя 0,6 МПа (6 кгс/см^2) с целью: проверки прочности и герметичности теплообменника, визуального изучения взаимодействия теплообменника ТА с ТАВ и определения гидравлического сопротивления теплообменника ТА.

В состав теплового макета входят: полость для размещения ТАВ с перегородками. Корпус, перегородки и прутки выполнены из металла.

Корпус теплового макета изготовлен из металла в виде ванны с номинальными значениями размеров 246х93х50 мм и толщиной стенок 2 мм. Внутри теплового макета установлены металлические перегородки из алюминиевого сплава с номинальными значениями размеров 93х50 мм, в нижней части макета расположены стальные трубки с номинальным значением длины 230 мм и номинальным значением диаметра 5 мм, проходящие сквозь перегородки и имитирующие каналы прокачки теплоносителя. В качестве ТАВ используется гексадекан по ГОСТ 12525-85.

В состав МТГ входят: корпус, представляющий собой полость для размещения ТАВ и теплообменника ТА; теплообменник ТА с выходами (штуцерами) для подключения к контуру теплоносителя; элементы крепления макета к приспособлению для размещения в камерах тепла и холода; приспособления для заправки ТАВ.

Теплообменник состоит из двух коллекторов, соединенных 36 трубками с номинальным значением внутреннего диаметра 3,0 мм с толщиной стенки 0,2 мм. На трубки установлены 80 металлических тонкостенных перегородок (рёбер) из алюминиевого сплава толщиной 0,3 мм, а также 8 металлических перегородок для крепления трубок в корпусе. На одном из коллекторов установлены 2 штуцера для подключения к гидравлической системе.

Макет теплового аккумулятора выполнен герметичным и выдерживает максимальное избыточное давление не более 0,6 МПа (6 кгс/см^2). В качестве ТАВ в МТГ используется гексадекан по ГОСТ 12525-85. В качестве теплоносителя используется «Тосол–А65М» ТУ 6-57-95-95.

Цель испытаний – изучение поведения и взаимодействия ТАВ с металлическими элементами МТ при температурах в камере тепла и холода (КТХ) от минус 60°С до плюс 60°С (определение степени адгезии гексадекана к металлам при замораживании), определение температур теплоносителя на входе в тепловой аккумулятор и на выходе, а также

визуальное определение мест инициирования кристаллизации при охлаждении и протаивания при нагревании.

Результаты

Результаты наблюдений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ход эксперимента

Время	Температура в камере	Производимые действия и результаты наблюдений
09:00	+15 °C	Металлическая емкость с жидким гексадеканом и погруженными в него трубками (12Х18Н10Т), имеющая температуру 21 °C помещена в камеру.
09:10	+15 °C	Началась кристаллизация вблизи металлических стенок и трубок.
9:30	+15 °C	Жидкость по всей поверхности кристаллизовалась с образованием зернистой структуры и не гладкой поверхности.
09:30	+15 °C	Камера переведена в режим охлаждения до минус 60 °C с темпом охлаждения около 2 градусов в минуту.
11:36	минус 60 °C	Гексадекан в металлической емкости полностью кристаллизовался, образовав твердую структуру
11:39		Емкость достали из камеры. Извлечение вмерзших в гексадекан металлических трубок потребовало значительных усилий. Структура гексадекана твердая, имеются пустоты.
11:40	минус 60 °C	Камера переведена в режим нагрева до 60 °C с темпом нагрева около 9 градусов в минуту.
11:50	около 0 °C	Емкость установлена в камеру.
11:55	около 20 °C	Гексадекан начал таять вблизи металлических стенок емкости и трубок.
12:05	+60 °C	Гексадекан продолжает таять, на поверхности вещество полностью растаяло, на дне продолжает оставаться твердая однородная масса.
12:30	+60 °C	Гексадекан полностью растаял, на дне образовались капли (предположительно из влаги, поступившей с воздухом при переводе камеры из режима минус 60 °C к нагреву до 60 °C, и сконденсировавщейся на холодных поверхностях).

В ходе испытаний была успешно выполнена циклограмма температурного режима. Изучено поведение и взаимодействие ТАВ с металлическими МТ. На рисунках 1 и 2 показаны некоторые этапы эксперимента.



Рис. 1. Макет температуре минус 60 °С



Рис. 2. Макет температуре +60 °С

Макет подключён к теплогидравлической экспериментальной установке и помещён в КТХ при температуре (20±5) ºС. Гидравлический контур был заполнен теплоносителем. расход теплоносителя задается в диапазоне от 0,05 до 0,194 л/с.

КТХ включается на режим охлаждения последовательно ступенями с шагом 20 ºС до температуры минус 60 ºС с выдержкой на каждой ступени не менее 10 мин. В рамках испытаний шаг снижения температуры и время выдержки увеличены ввиду большой тепловой инерции тепловой энергетической установки (см. рисунок 3).



Рис. 3. Макет теплового аккумулятора в камере тепла и холода

Регистрировались следующие величины:

- расход теплоносителя через теплообменник;
- температура теплоносителя на входе и выходе теплообменника;
- давление на входе и выходе теплообменника.

В результате получено гидравлическое сопротивление макетов при различных значениях расхода и температуры теплоносителя. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ход эксперимента с теплогидравлической экспериментальной установкой

Время	Режим	Температура в камере, °С	Расход, л/с	Температура теплоносителя, °С		Давление теплоносителя, МПа	
				вход	выход	вход	выход
11:45		22,0	0,099	36,4	36,2	0,089	0,060
11:50		22,0	0,098	36,7	36,5	0,091	0,061
11:55		22,0	0,150	37,5	37,3	0,103	0,047
12:05	Q_{max}	22,0	0,194	38,3	38,2	0,121	0,042
12:10	Выкл. насос	22,0	0,0	38,7	38,6	0,068	0,075
12:15		22,0	0,0	33,7	33,4	0,046	0,053
12:20	Охл. до 0 ºС	20,1	0,0	32,9	32,7	0,044	0,051
12:52	Повыш. давления	0,5	0,0	25,2	25,7	0,120	0,126
13:10		0,5	0,0	25,2	25,7	0,069	0,076
13:10	Вкл. насос	0,0	0,180	25,0	24,4	0,135	0,039
13:15		0,0	0,181	24,9	24,5	0,135	0,041
13:20	Охл. до –20 ºС	5,3	0,182	25,7	25,3	0,138	0,046
13:35		-17,2	0,182	25,8	25,2	0,140	0,047
13:45		-19,7	0,180	24,4	23,8	0,137	0,042
14:20		-20,0	0,177	22,0	21,4	0,136	0,038

14:22	Охл. до –40 ºС						
14:30		-32,0	0,176	21,0	20,3	0,135	0,035
14:35		-37,0	0,174	20,0	19,2	0,134	0,032
14:50		-40,0	0,171	17,2	16,4	0,132	0,025
15:00		-39,9	0,170	16,1	15,3	0,133	0,024
15:15		-39,7	0,168	15,0	14,2	0,134	0,024
15:20	Охл. до –60 ºС	-45,0	0,168	14,5	13,6	0,135	0,023
15:25		-49,7	0,166	13,8	12,8	0,135	0,021
15:30		-53,7	0,165	12,8	11,8	0,135	0,019
15:40		-58,5	0,161	10,8	9,7	0,136	0,015
15:45		-59,3	0,159	9,8	8,7	0,137	0,014
16:15		-59,8	0,155	7,2	5,9	0,142	0,012
16:30		-59,6	0,154	6,8	5,5	0,144	0,013
16:35	Уменьш. Q	-59,6	0,100	7,3	5,3	0,090	0,015
16:40		-59,6	0,100	7,7	5,7	0,088	0,014
16:45		-59,7	0,100	8,0	6,0	0,088	0,015
16:46		-59,8	0,090	8,4	6,2	0,079	0,017
16:50		-59,8	0,050	9,6	5,4	0,057	0,029
16:55		-59,9	0,050	9,8	5,7	0,058	0,030
17:00	Выкл. насос	-59,9	0,0	9,9	5,4	0,034	0,042

Результаты теоретических и экспериментальных исследований тепловых процессов в технологических системах охлаждения с фазовым переходом продемонстрировали высокую степень согласованности между результатами математического анализа и результатами испытаний (см. рисунок 4).

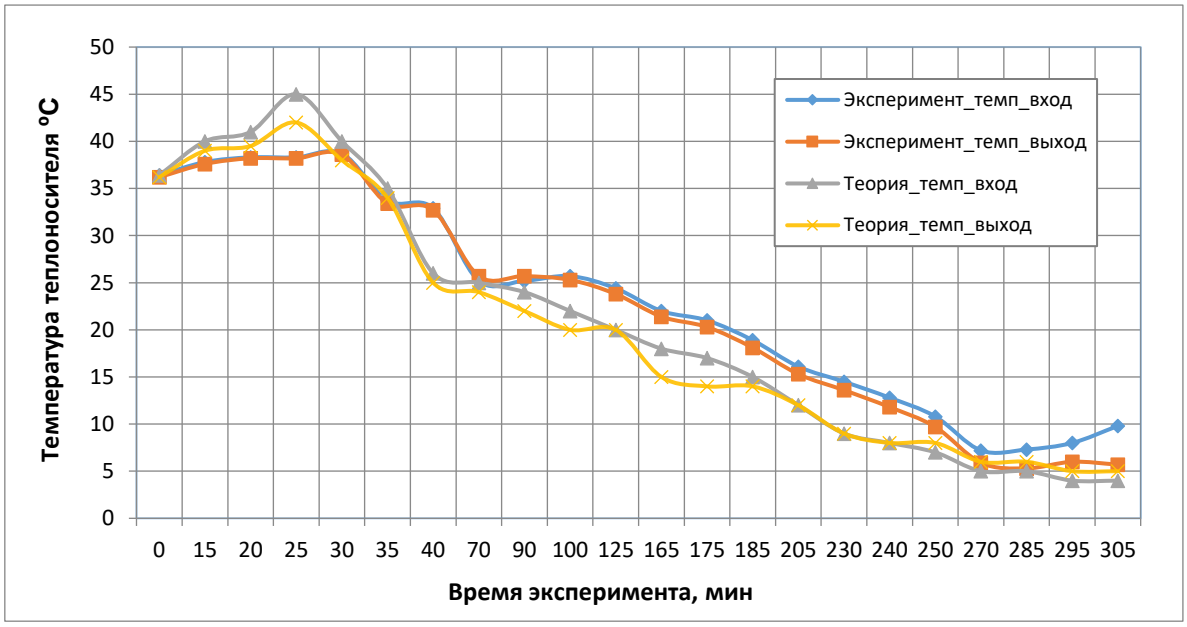


Рис. 4. Результаты математического моделирования и эксперимента

Обсуждение

Использование математической модели теплового аккумулятора, основанной на решении уравнений теплопроводности с учётом скрытой теплоты фазового перехода, позволяет адекватно изложить основные закономерности теплообмена.

Валидация математической модели проведена путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными измерениями температур теплоносителя на входе и на выходе из теплового аккумулятора, температурных полей и скорости фазового перехода рабочего вещества в различных режимах охлаждения (см. рисунок 4).

Небольшие расхождения в результатах наблюдаются при окончании фазопереходных процессов, что, связано с теплообменом со стенкой теплового аккумулятора [6].

Таким образом, проведенная валидация подтверждает применимость разработанной математической модели для моделирования тепловых процессов в тепловых аккумуляторах.

Заключение

В результате проведённого исследования выполнено практическое подтверждение математической модели теплового аккумулятора как технологической системы охлаждения с фазовым переходом. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало хорошую сходимость результатов. Разработанная математическая модель теплового аккумулятора позволила количественно описать динамику теплообмена с учётом скрытой теплоты плавления, теплопроводности и фазовых превращений.

Дальнейшие исследования планируется направить на проведение более подробных вычислительных экспериментов для различных теплоаккумулирующих веществ и оценку влияния выбора ТАВ на облик системы охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Алексеев В.А., Малоземов В.В. Проектирование тепловых аккумуляторов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. 92 с.

[2] Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. – М.: Энергия, 1975.

[3] Muhammad T. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. 2023. International Journal of Thermofluids. pp. 18-23.
[4] Lee S., Kim H. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. 2023. Energy and Buildings. pp. 112-121.
[5] Waseem A., Xinyu H., Wenhao W., Zibin L., Asif M., Ruqiang Z. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications. 2018. Energy & Environmental Science. pp. 1392-1424.
[6] Shchukina E.M., Graham M., Zheng Z., Shchukin D.G. Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. 2018. Chemical Society Reviews. pp. 4156-4175.
[7] Морозов М.М., Лебедев Н.Н., Рациональное использование тепла: тепловые аккумуляторы. 2023. Энергосбережение. Т. 25, Выпуск 4, С. 12-18.
[8] Дмитриев А.А., Орлова Т.Т. Новые фазопереходные материалы для теплового аккумулирования. 2020. Известия вузов. Энергетика. Т. 63, выпуск 5, С. 55-62.
[9] Кузнецов С.С., Иванова А.А. Анализ энергетической эффективности тепловых аккумуляторов с теплоаккумулирующими материалами фазового перехода. 2017. Теплоэнергетика Т. 54, выпуск 5, С. 45-52.
[10] Фецов С.С., Луценко Н.А. Численный анализ влияния геометрии боковых стенок на эффективность тепловых аккумуляторов на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами. 2020. Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13, № 2. С. 189-204.
[11] Лекомцев П.Л., Калугин К.С. Исследование процессов теплопередачи в тепловых аккумуляторах с фазовым переходом теплоаккумулирующего материала при работе под воздействием ультразвукового поля. 2021. Вестник НГИЭИ. № 9 (124). С. 28-37.
[12] Милёхин М.И., Умеренков Е.В. Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина. 2024. Известия Юго-Западного государственного университета. № 28(3). С. 36-49.
[13] Кухтин А.В., Денисов А.М. Математическая модель теплового аккумулятора в режиме отвода кратковременных тепловых потоков высокой мощности от элементов КА. Труды Всероссийской НПК «Современные проблемы улучшения ТТХ РКТ, ее создания, испытаний и эксплуатации» СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 711 с.
[14] Борщев Н.О. Определение эффективной тепловой проводимости тепловых аккумуляторов методами пара метрической идентификации. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2024, № 1, С. 101-109. doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-101-109

[15] Кухтин А.В., Денисов А.М, Девяткина Т.Ю. Практические рекомендации по разработке системы обеспечения теплового режима космического аппарата. 2018. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. С. 113-123.

M.A. Padalka[1], D.K. Shcheglov[2]

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL PROCESSES IN TECHNOLOGICAL COOLING SYSTEMS WITH PHASE TRANSITION

[1]Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St Petersburg, Russia
[2]Obukhov Plant, St. Petersburg, Russia

Abstract

The article considers the issues of thermodynamic processes occurring in heat accumulators (HA) based on phase transition. A mathematical model of a heat accumulator with a number of assumptions is presented. To verify the correctness of the mathematical model, a number of experiments were conducted on a heat-accumulating substance (HAS) with similar modeling conditions, initial data and assumptions. Comparison of the experimental and calculation results showed the correctness of the proposed scientific and methodological apparatus taking into account the assumptions put forward.

Keywords: heat accumulator, technological system, phase transition, thermal process, heat-accumulating substance.

REFERENCES

[1] Alekseev V.A., Malozemov V.V. Design of heat accumulators: Textbook. – M.: MAI-PRINT Publishing House, 2008. – 92 p.
[2] Alekseev V.A. Cooling of electronic equipment using melting substances. – M.: Energiya, 1975
[3] Muhammad T. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. 2023.International Journal of Thermofluids. pp. 18-23
[4] Lee S., Kim H. Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. 2023. Energy and Buildings. pp. 112-121
[5] Waseem A., Xinyu H., Wenhao W., Zibin L., Asif M., Ruqiang Z. Nanoconfined phase change materials for thermal energy applications.2018. Energy & Environmental Science. pp. 1392–1424

[6] Shchukina E.M., Graham M., Zheng Z., Shchukin D.G. Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. 2018. Chemical Society Reviews pp. 4156–4175
[7] Morozov M.M., Lebedev N.N., Rational use of heat: heat accumulators. 2023. Journal "Energy Saving", Vol.: 25, Issue 4, Pp. 12–18
[8] Dmitriev A.A., Orlova T.T. New phase-transition materials for heat storage. 2020. Journal: News of universities. Power engineering. Volume: 63, issue: 5, pp. 55–62
[9] Kuznetsov S.S., Ivanova A.A. Analysis of energy efficiency of heat accumulators with phase-change heat-accumulating materials. 2017. Journal: Thermal Power Engineering Vol.54, issue 5, pp. 45-52
[10] Fetsov S.S., Lutsenko N.A. Numerical analysis of the influence of side wall geometry on the efficiency of heat accumulators based on granular materials with phase transitions. 2020. Computational Continuous Media Mechanics. - 2020. - Vol. 13, No. 2. - P. 189-204
[11] Lekomtsev P.L., Kalugin K.S. Study of heat transfer processes in heat accumulators with phase transition of heat-accumulating material during operation under the influence of an ultrasonic field. 2021. Bulletin of NGIEI. No. 9 (124). P. 28–37
[12] Milekhin M.I., Umerenkov E.V. Phase-change heat accumulators based on paraffin. 2024. Bulletin of the South-West State University 28(3): 36-49
[13] Kukhtin A.V., Denisov A.M. Mathematical model of a heat accumulator in the mode of removing short-term high-power heat flows from spacecraft elements // Proceedings of the All-Russian Scientific and Production Complex “Modern Problems of Improving the Performance Characteristics of Rocket and Spacecraft, Its Creation, Testing and Operation” St. Petersburg: A.F. Mozhaisky All-Russian Space Agency, 2013. 711 p.
[14] Borshchev N.O. Determination of effective thermal conductivity of heat accumulators by parametric identification methods. News of higher educational institutions. Mechanical Engineering, 2024, No. 1, pp. 101–109, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-101-109
[15] Kukhtin A.V., Denisov A.M., Devyatkina T.Yu. Practical recommendations for the development of a spacecraft thermal management system. 2018. Tula State University News. Technical sciences. 2018. pp. 113-123

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 53.089.6: 550.380.87
doi:10.18720/SPBPU/2/id-139

А.Д. Перечесова[1], И.И. Калапышина[2], П.А. Сергушин[3]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ МАГНИТОМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ОБСЕРВАТОРИИ



[1]Анна Дмитриевна Перечесова,
Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)961-0020, E-mail: perechesova@gmail.com.



[2]Ирина Ивановна Калапышина,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911) 713-7772, E-mail: weir521@yandex.ru.



[3]Павел Анатольевич Сергушин
Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921) 382-4143, E-mail: spa@izmiran.spb.ru

Аннотация

В статье представлена разработанная технологическая система калибровки трёхкомпонентных магнитных датчиков на базе магнитно-ионосферной обсерватории СПбФ ИЗМИРАН [1], [2]. Описаны методы измерения основных метрологических характеристик магнитометра (коэффициент преобразования, диапазон измерения, АЧХ/АФЧХ, порог чувствительности, смещение нуля, шумы, температурный дрейф) с использованием трёхкомпонентной колечной системы Гельмгольца и программных средств сбора данных. Показана эффективность работы комплекса в условиях естественного магнитного поля (~50 000 нТл) и индустриальных помех с учётом требований ГОСТ [3] и мировых практик калибровки [4]. Полученные результаты подтверждают соответствие

метрологических характеристик датчиков заявленным требованиям и возможности применения описанной методики в геофизических исследованиях.

Ключевые слова: магнитометр, обсерваторская калибровка, система Гельмгольца, арамидный торсионный подвес

Введение

Трёхкомпонентные (векторные) магнитометры используются для точных измерений индукции магнитного поля Земли в геофизике, геологии и магнитной картографии. Созданный в СПбФ ИЗМИРАН магнитометр магнитостатического типа [5] обеспечивает регистрацию векторных компонент поля в диапазоне рабочих частот 0–0,5 Гц и разрешающей способностью порядка десятых долей нТл. Для получения достоверных результатов необходимо экспериментально определить его метрологические характеристики и учесть отклонения характеристик реального датчика от расчётных значений (смещение нуля, линейность, неортогональность каналов и т.д.). Проблема калибровки усложняется работой в условиях естественного поля (~50 000 нТл) и индустриальных электромагнитных помех.

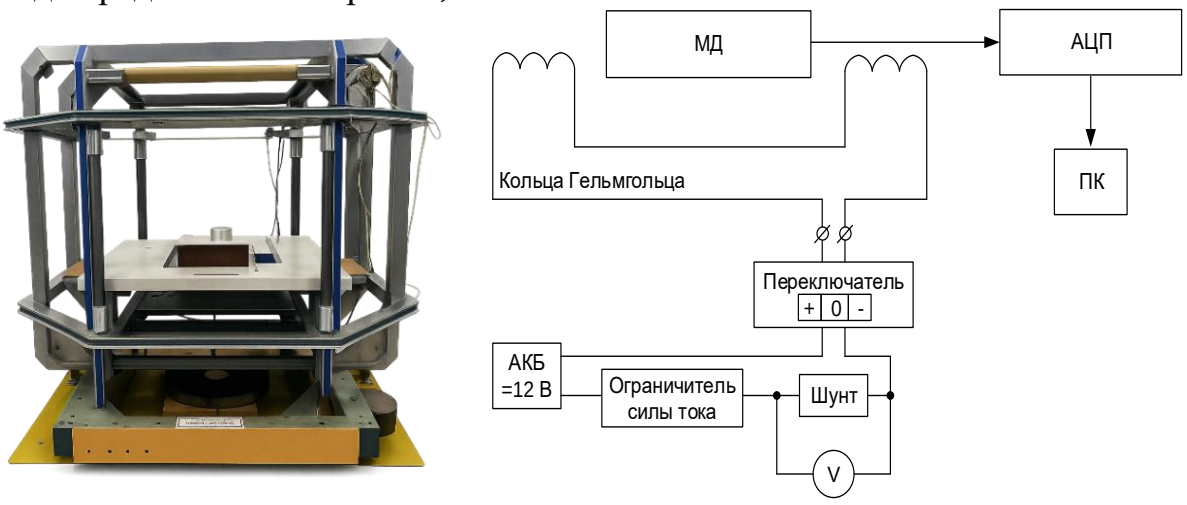
Согласно государственным стандартам, порядок проведения поверок магнитометрических средств задаётся, в частности, ГОСТ [3], [6]. В мировой практике для калибровки магнитометров часто используются специальные лабораторные установки с трехкомпонентными системами колец Гельмгольца [4]. «Клетки Гельмгольца» (Helmholtz cage) обеспечивают контролируемое однородное поле по трём осям и применяются в университетах и обсерваториях (Россия, Финляндия, Польша, США, Индия, Нидерланды и др.). При этом часто используется совместная работа векторных датчиков с эталонными скалярными магнитометрами для повышения точности калибровки [4].

Настоящая работа объединяет и расширяет результаты ранее разработанных методик калибровки трехкомпонентного магнитометра [7]. Предложена интегрированная технологическая система – программно-аппаратный комплекс на базе магнитно-ионосферной обсерватории СПбФ ИЗМИРАН, включающая испытательный стенд с трехкомпонентной колечной системой Гельмгольца, систему компенсации внешнего поля и средства автоматизированного сбора данных. В таких условиях удаётся проверять метрологические характеристики датчиков непосредственно в естественном поле, соблюдая требования точности и стабильности измерений [3].

Методы

Испытания проводились на примере трехкомпонентного магнитостатического магнитометра разработки СПбФ ИЗМИРАН. В основе датчика – магнитная система на торсионном подвесе, обеспечивающая детектирование проекций вектора магнитного поля по трем взаимно-ортогональным осям (D, Z, H). Для компенсации положения магнитов в датчике используется отрицательная обратная связь: сигнал датчика усиливается и подаётся на катушки обратной связи, создавая компенсационное поле [8].

Основной испытательный стенд (рис. 1, *a*) представляет собой трёхкомпонентную колечную систему Гельмгольца (каждая плоскость – пара квадратных катушек размером 1000×1000 мм), смонтированную на немагнитном сейсморазвязанном постаменте. На площадке в центре колечной системы расположен калибруемый датчик. Система спроектирована так, чтобы внутри кольца обеспечивалось однородное магнитное поле в диапазоне частот 0–10 Гц. На стенде реализована функция активной компенсации фонового поля Земли и помех: внешнее поле автоматически компенсируется (особенно для низких частот), что позволяет более точно задавать измеряемое поле. Структурная схема испытательного стенда представлена на рис. 1, *b*.



a *b*

Рис. 1. Испытательный стенд внешний вид (*a*): трёхкомпонентная колечная система Гельмгольца на сейсморазвязанном постаменте и структурная схема испытательного стенда (*b*): магнитный датчик, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер, Кольца Гельмгольца габаритом, аккумуляторная батарея, ограничитель силы тока (блок сопротивлений), шунт (резистор прецизионный), вольтметр, переключатель (полярности)

При калибровке датчика последовательно оценивались следующие характеристики:

• Коэффициент преобразования (чувствительность) – измерялся как отношение выходного сигнала датчика к напряжению на опорном шунте при подаче известного тока в катушку соответствующей компоненты.

• Диапазон измерения индукции – определялся путём пошагового увеличения тока в катушках до видимого насыщения вектора датчика. Граница диапазона равна значению поля при насыщении.

• АЧХ/АФЧХ – амплитудно-частотная характеристика определялась отношением выходных сигналов датчика к сигналам на опорном шунте на разных частотах (обычно 0,01–1 Гц); фазочастотная – как относительная задержка выходного сигнала датчика.

• Порог чувствительности – определяется как минимально различимый уровень сигнала (обычно порядка 0,1 нТл).

• Смещение нуля – измерялось методом разворота оси датчика на 180°: ожидаемое изменение сигнала сравнивалось с известным значением компоненты поля в этой точке. Разброс значений нуля после калибровки должен был быть минимальным (менее нескольких сотен нТл в наших измерениях).

• Дрейф нуля по температуре – оценивался как изменение выходного сигнала при стабилизации рабочей температуры датчика: по данным дрейф нуля составлял порядка ±10 нТл/°С.

• Уровень собственных шумов – определялся как среднеквадратичное отклонение сигнала датчика в магнито-спокойный интервал (либо в экранированном помещении), при отсутствии внешних возмущений.

Для практической оценки шумов была применена методика дифференциальной записи сигналов двух одинаковых датчиков. С целью исключения влияния помех оба датчика располагали параллельно на постаменте и подключали к АЦП с синхронной записью сигналов в течение ~24 часов. Из записанных данных выбирались ночные интервалы с наименьшими помехами (обычно 2–5 ч ночи по местному времени). После этого вычислялось СКО разности сигналов двух датчиков, что давало значение уровня собственных шумов. Проверочное требование – СКО шумов по модулю в полосе рабочих частот не превышает 0,1 нТл. Сбор данных и обработка проводились с помощью разработанного в СПбФ ИЗМИРАН ПО.

Важным элементом комплекса является программное обеспечение, позволяющее автоматизировать генерацию команд источника тока, сбор сигналов с датчика и проведение вычислений метрологических параметров. Для привязки измерений к внешним стандартам при необходимости может использоваться эталонный скалярный магнитометр (плотностный магнитометр или Overhauser-магнитометр) по методикам мировых обсерваторий.

Результаты и обсуждение

Проведённые измерения подтвердили выполнение заданных метрологических требований. Полученные значения основных характеристик датчика составили: диапазон измеряемых индукций – ±70 000 нТл, полоса рабочих частот – 0,005–0,5 Гц, коэффициент преобразования по осям ~100–110 ед./нТл, смещение нулей – в пределах ±2500 нТл, СКО шумов – до 0,1 нТл, температурный дрейф нуля – ±10 нТл/°С. Эти результаты укладываются в заданные технические условия и соответствуют характеристикам аналогичных отечественных и зарубежных систем.

Полученные АЧХ в полосе 0,005–0,5 Гц оказались практически плоскими (амплитуда на краях диапазона отличается от значения на 0,01 Гц не более чем на ±2%. Наблюдавшиеся погрешности Линеаризованные по частоте были малы. Смещение нуля после калибровки фактически выравнивалось (среднее смещение ≈0 нТл), а разброс по осям не превышал указанных в табл. 1 ±2500 нТл. Шумы датчика, полученные методом синхронной записи и вычитания (разностный метод), не превышали 0,1 нТл RMS по модулю. Этот уровень соответствует мировым показателям для магнитостатических вариометров и позволяет фиксировать колебания поля порядка 0,2–0,3 нТл.

Таким образом, итоговые калибровочные коэффициенты и характеристики демонстрируют требуемую точность: например, средний коэффициент преобразования ~105 ед./нТл и приводимое разбросы по каналам, а шумовая характеристика не превышает критических значений. Для визуализации результатов используются графики зависимости выходных сигналов от задаваемого тока, АЧХ и др., подтверждающие линейность и стабильность измерения.

Сравнение наших результатов с мировым опытом показало хорошее соответствие. Описанная методика опирается на распространённый подход к калибровке векторных магнитометров с помощью трехкомпонентных колец Гельмгольца [4]. Например, аналогичная система в Индии (Alibag Observatory) после модернизации служит национальным калибровочным комплексом для наземных и космических магнитометров. В других странах широко используются коммерческие и университетские «Helmholtz cage» для отладки и поверки датчиков [4]. Важно отметить, что большинство подобных установок рассчитаны на калибровку в условиях компенсации земли, тогда как разработанный нами комплекс эффективно работает непосредственно в реальном поле с применением активной компенсации. Это позволяет учесть возможные эффекты нестабильности фонового поля и обеспечить калибровку в среде обсерватории.

Система питания и электроники датчиков обеспечила стабильность работы: колебания питающего напряжения не сказывались на измерениях (изменение вывода при колебаниях питания <0,01% благодаря стабилизированному источнику). Использование современного АЦП с разрешением 24 бит позволило реализовать указанные пределы чувствительности (1300 нТл/ед. АЦП) при шуме <0,1 нТл. Программное обеспечение обеспечивало синхронность каналов и автоматическое масштабирование сигналов, что совпадает с требованиями к параллельной регистрации многоканальных магнитометров.

Полученные результаты удовлетворяют государственным стандартам: методика и полученные параметры соответствуют поверочной схеме измерений магнитной индукции ГОСТ 8.030-2013. Достигнутые шумовые характеристики и стабильность нулей укладываются в требования стандарта. Калибровочную лабораторию планируется аттестовать по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 (требования к компетентности калибровочных лабораторий) [6], что повысит доверие к результатам измерений.

С учётом вышеизложенного, разработанная система калибровки МД признана эффективной. Она позволяет операторам магнитометрических обсерваторий получать достоверные метрологические данные о сенсорах при относительно невысокой трудоёмкости процедуры. Подход демонстрирует гибкость: анализ и автоматизация процессов (подбор оптимальных точек калибровки, оценка равномерности поля) обеспечивают воспроизводимость результатов.

Заключение

Разработана и реализована технологическая система калибровки трёхкомпонентных магнитных датчиков на базе обсерватории СПбФ ИЗМИРАН. В состав системы входят специализированный стенд с трехосной системой Гельмгольца, средства компенсации фонового поля и автоматизированное ПО.

Предложенная методика обеспечивает измерение основных метрологических характеристик магнетометра: коэффициента преобразования, диапазона индукций, АЧХ/АФЧХ, смещения нуля, температурного дрейфа и шумов (включая их разностную оценку). Результаты калибровки были подтверждены на практике – диапазон ±70 кнТл, шум ≤0,1 нТл, температурный дрейф ~10 нТл/°С.

Показано, что описанная технология соответствует современным метрологическим требованиям и стандартам: калибровка проводится с учётом ГОСТ 8.030-2013 [3] и рекомендаций международных практик (IAGA, INTERMAGNET) [4].

Практическое значение работы заключается в обеспечении высокоточной калибровки магнитометров в реальных условиях обсерватории. Предложенные решения – активная компенсация поля, новая автоматизация измерений, оптимизация условий регистрации – позволяют повысить качество геомагнитных наблюдений и снизить систематические погрешности.

В дальнейшем планируется расширить систему автоматического анализа данных и верификации калибровочных коэффициентов, а также применить её для калибровки других типов векторных магнитометров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006 – № 28. – С. 173-174.

[2] Копытенко Ю.А., Петрищев М.С., Сергушин П.А, Леваненко В.А., Перечесова А.Д., Устройство для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов // Заявка на патент РФ №2012140673/12(065633), МПК D07B3/00, D04C3/00, приоритет от 18.09.2012 г.

[3] ГОСТ 8.030–2013. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции. – М.: ИПК Изд-ва стандартов, 2013.

[4] Mahavarkar P., John J., Dhapre V., Dongre V., Labde S. Tri-axial square Helmholtz coil system at the Alibag Magnetic Observatory: upgraded to a magnetic sensor calibration facility // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. – 2018. – V.7. – P.143–149.

[5] Коробейников А.Г., Перечесова А.Д., Калапышина И.И., Леваненко В.А., Гатчин Ю.А., Федосовский М.Е., Поляков В.И. Применение полимерных материалов при разработке торсионов применяемых в высокочувстви тельных системах измерения низкочастотных магнитных полей // XXIV Всероссийская конференция "Структура и динамика молекулярных систем". Сб. Структура и динамика молекулярных систем. под ред. Щербиной А.А. – 2017. – С. 46-54.

[6] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2019.

[7] Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1979. — 320 с.: ил.

[8] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // Key Engineering Materials. 2010. T. 437. C. 621-624.

A.D. Perechesova[1], I.I. Kalapyshina[1,2], P.A. Sergushin[1]

TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR OBSERVATORY CALIBRATION OF MAGNETOMETERS

[1]Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, Russia;
[2]ITMO University, Russia.

Abstract

The article presents the developed technological system for calibration of three-component magnetic sensors. It's based on the magnetic-ionospheric observatory of the Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial [1], [2]. The methods for measuring the main metrological characteristics of the magnetometer (conversion coefficient, measurement range, frequency response/amplitude-frequency response, sensitivity threshold, zero offset, noise, temperature drift) using a three-axis Helmholtz ring system and data collection software are described. The efficiency of the complex under conditions of a natural magnetic field (~50,000 nT) and industrial interference is shown, taking into account the requirements of GOST [3] and world calibration practices [4]. The obtained results confirm the compliance of the metrological characteristics of the sensors with the stated requirements and the possibility of using the described technique in geophysical research.

Key words: magnetometer, observatory calibration, Helmholtz system, aramid torsion bar

REFERENCES

[1] Sergushin P.A. Magnetovariometer as a means of measuring magnetic fields // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2006 – No. 28. – P. 173-174.
[2] KopytenkoYu., Petrishchev M., Sergushin P., Levanenko V., Perechesova A. Device to making instrument sensitive element torsion suspensions // patent RF №2519888, D07B3/00, 20.06.2014, No17
[3] GOST 8.030–2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. State hierarchy scheme for means measuring magnetic flux

density, magnetic flux, magnetic moment and gradient of magnetic flux density. – M.: IPC Publishing Standards, 2013.
[4] Mahavarkar P., John J., Dhapre V., Dongre V., Labde S. Tri-axial square Helmholtz coil system at the Alibag Magnetic Observatory: upgraded to a magnetic sensor calibration facility // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. – 2018. – V.7. – P.143–149.
[5] Korobnikov A.G., Perechesova A.D., Kalapyshina I.I., Levanenko V.A., Gatchin Yu.A., Fedosovsky M.E., Polyakov V.I. Application of polymeric materials in the development of torsions used in highly sensitive systems for measuring low-frequency magnetic fields // XXIV All-Russian Conference "Structure and Dynamics of Molecular Systems". Collection. Structure and Dynamics of Molecular Systems. edited by Shcherbina A.A. - 2017. - P. 46-54.
[6] GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
[7] Afanasyev Yu.V., Studentsov N.V., Khorev V.N., Chechurina E.N., Shchelkin A.P. Means of measuring magnetic field parameters L.: Energy, Leningrad Branch, 1979. - 320 p.
[8] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor // Key Engineering Materials. 2010. T. 437. C. 621-624.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 624.014:539.43
doi:10.18720/SPBPU/2/id-140

С.А. Соколов[1], А.А. Грачев[2]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ



[1]Сергей Алексеевич Соколов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 376-30-16, E-mail: sokolov_sa@spbstu.ru.



[2]Алексей Андреевич Грачев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905) 263-85-54, E-mail: Grachev_aa@spbstu.ru

Аннотация

Работа направлена на развитие методов прогнозирования сопротивления усталости и повышения надежности элементов металлических конструкций машин. Предложена методика расчета скорости развития усталостной трещины под действием циклического нагружения. В настоящее время основной методический подход к решению этой проблемы строится на использовании уравнения Пэриса, параметры которого определяются экспериментально. В данной работе показано преимущество перехода к использованию модифицированного уравнения Пэриса и предложена методика аналитического определения его параметра. В основе методики лежит допущении о дискретном развитии усталостной трещины и расчете количества циклов, необходимых для каждого скачка, с использованием уравнения Коффина-Мэнсона. Результаты расчета по предлагаемой методике подтверждаются сопоставлением с массивом экспериментальных данных.

Ключевые слова: усталость металлов, циклическое нагружение, развитие усталостной трещины, уравнение Пэриса, коэффициент интенсивности напряжений, пластическая деформация.

Введение

Усталостное повреждение характерно для металлических конструкций и деталей механизмов интенсивно эксплуатируемых машин. Оно состоит из двух стадий: накопления внутренних повреждений до возникновения макротрещины и развития этой трещины до опасного размера или полного разрушения. В реально работающей машине первую стадию определить, практически, невозможно. На второй стадия трещину можно обнаружить при техобслуживании машины. Если длительность второй стадии превышает интервал между техобслуживанием и ремонтами, то в процессе эксплуатации остается время для анализа ситуации и проведения ремонта. В противном случае произойдет внезапное разрушение детали или конструкции. Длительность развития усталостной трещины, как количество циклов нагружения, в течение которых возникшая усталостная трещина вырастет от начального размера до максимального безопасного размера, называют остаточным ресурсом. Возможность прогнозировать остаточный ресурс на стадии проектирования позволяет планировать частоту обследований и обуславливает живучесть и безопасность сооружения или машины.

Для вычисления остаточного ресурса необходима модель зависимости скорости развития трещины от параметров нагружения. Прогнозирование скорости развития усталостной трещины описывается в терминах механики разрушения. График зависимости скорости развития усталостной трещины от размаха, или максимального, или эквивалентного значения коэффициента интенсивности напряжений называется кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР) [1–5]. Эта зависимость получается экспериментально путем испытания образцов с трещиной при циклическом нагружении. Такая процедура весьма затратна, так как требует системных испытаний достаточно крупных образцов в условиях циклического нагружения.

Для дальнейшего анализа и инженерного применения КДУР описывается аналитической зависимостью, параметры которой определяются экспериментально [6,7]. В данной работе проанализирована форма представления кинетической диаграммой усталостного разрушения и предложена методика аналитической оценки параметров КДУР для сталей, используемых для металлических конструкций машин.

Методы

Многочисленные испытания деталей с трещинами при циклическом нагружении показали, что зависимость скорости развития усталостной

трещины $v = da/dn$ от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{I} в логарифмических координатах в большинстве случаев имеет вид S-образной кривой [1,3]. В качестве аргумента этой зависимости в разных работах принимается максимальное или эквивалентное значение КИН, однако наиболее удобным для инженерного применения оказалось использование размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{I}.

Расчетный размах КИН $\Delta K = \Delta K_{max} - \Delta K_{min}$ вычисляется как [1,2]

$$\Delta K = \xi_K \Delta\sigma\sqrt{\pi a}\,.$$

Здесь ξ_K – безразмерный коэффициент, зависящий от формы детали, и характера ее нагружения; $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$; $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$ – максимальное и минимальное значения номинального напряжения в детали. Если минимальное напряжение оказывается отрицательным (сжимающим), то принимается $\sigma_{\min} = 0$. При этом в запас надежности игнорируется тот факт, что закрытие трещины происходи при некотором напряжении $\sigma_{\min} > 0$.

Форма КДУР $v = f\left(\Delta K_{\mathrm{I}}\right)$ мало зависит от коэффициента асимметрии цикла нагружения, но искажается, если испытания проводятся в коррозионной среде или размер трещины весьма мал. Экспериментально полученный график зависимости $v = f\left(\Delta K_{\mathrm{I}}\right)$ в логарифмических координатах включает три области (рис. 1, I, II, III): нелинейную зону малых скоростей, прилегающую к граничному значению КИН ΔK_{th}, центральную линейную область и зону интенсивного развития, которая заканчивается предельным значением ΔK_c, при котором происходит разрушение детали. Есть множество вариантов описания всего графика в области $\Delta K_{th} < \Delta K_{\mathrm{I}} < \Delta K_{\mathrm{c}}$ [6, 7 и др.], но в инженерной практике чаще используется уравнение Пэриса, которое описывает только среднюю область графика. Распространение этого выражение на область малых скоростей (рис. 1, кривая 2) дает завышенную скорость развития трещины и идет в запас надежности оценки остаточного ресурса. Занижение скоростей в области интенсивного развития трещины мало влияет на оценку живучести изделия и компенсируется снижением предельного значения ΔK_c.

Уравнение Пэриса, описывающее центральную часть этой диаграммы, имеет вид [2, 3, 7]

$$v_a = \Phi_K \Delta K_{\mathrm{I}}^q\,. \qquad (1)$$

Дефектность этой формы записи заключается в том, что в ней присутствует величина Φ_K, которая, во-первых, имеет корреляционную связь с показателем q [6], а, во-вторых, имеет переменную размерность

$\left[\text{м}^{1-0{,}5q}\text{МПа}^{-q}\right]$. Величина, размерность которой зависит от погрешности определения показателя степени q, лишена физического смысла.

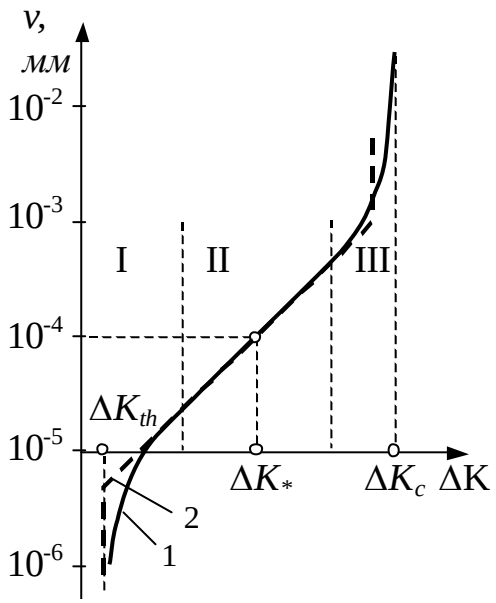


Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

В связи с этим значительно правильнее записать то же выражение в форме модифицированного уравнения Пэриса [7, 8]

$$v_a = \frac{da}{dn} = V_* \left(\frac{\Delta K_{\text{I}}}{\Delta K_*} \right)^q , \qquad (2)$$

где $V_* = 10^{-7}$ м/цикл; $\Delta K_* = \sqrt[q]{\dfrac{V_*}{\Phi_K}}$ – параметр уравнения, равный значению размаха КИН, при котором скорость развития трещины $v_a = V_*$ (рис.1).

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что для широкого диапазона сталей показатель степени q = 2,5 – 3,5, поэтому в нормативных документах обычно принимается q = 3 [9, 10]. Значение параметра ΔK_* имеет существенный разброс и изменяется в диапазоне от 18 до 45 МПа√м.

Количество циклов, в течение которых трещина подрастет от начального размера a_0 до конечного a_1 можно вычислить, проинтегрировав выражение (2), как

$$N_a = \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{V_*} \left(\frac{\Delta K_*}{\Delta K_{\text{I}}} \right)^q da . \qquad (3)$$

Используя этот алгоритм, можем оценить, на сколько существенно влияет погрешность определения параметров q и ΔK_* на результат расчетной оценки долговечности детали с трещиной. Так, например,

вычислим количество циклов, в течение которых краевая трещина в полосе шириной B = 200 мм подрастет от 5 мм до 30 мм при действии регулярного нагружения по отнулевому циклу с размахом напряжений $\Delta\sigma$ = 120 МПа. Варьирование показателя q в диапазоне q = 2,5 – 3,5 при ΔK_* = 25 МПа$\sqrt{\text{м}}$ приводит к изменению расчетной долговечности N_a на 15 – 40%. Изменение ΔK_* в указанном интервале от 18 до 45 МПа$\sqrt{\text{м}}$ при q = 3 приводит к изменению расчетной долговечности от 2 до 12 раз. Этот пример показывает, что значение параметра ΔK_* очень существенно влияет на оценку живучести конструкции с трещиной, поэтому необходимо иметь достаточно надежную оценку данной величины.

Экспериментальное определение ΔK_* сопряжено с определенными трудностями и требует специального оборудования для циклического нагружения образца и измерения усталостной трещины. Данная работа посвящена разработке методики прогнозирования параметра ΔK_* для сталей, применяемых в сварных металлических конструкциях. Для подтверждения методики использованы результаты испытаний различных образцов, приведенные в научно-технической литературе.

Предлагаемая методика расчетного определения параметра ΔK_* строится на базе следующих положений:

1. Эксперименты показывают, что скорость продвижение трещины на среднем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения составляет 10^{-5} – 10^{-3} мм/цикл. То есть за цикл трещина продвигается на расстояние, меньшее, чем размер зерна стали. Такой процесс не может быть равномерным по всему фронту, поэтому будем считать, что развитие усталостной трещины происходит дискретно [11, 12]. То есть за Δn циклов в некоторой малой области перед вершиной трещины накапливается критическое повреждение и трещина продвигается на расстояние Δa. Размер Δa должен быть достаточно большим, чтобы к нему можно было применять свойство материала, полученные по стандартным методикам, то есть с учетом всех статистических закономерностей влияния ориентации и границ зерен, химической неоднородности и дефектов его структуры. С другой стороны он должен быть не более размера зоны, в которой происходит циклически изменяющиеся пластические деформации. С учетом того, что размер зерна строительных сталей составляет 5 – 30 мкм можно предположить, что Δa должен быть не меньше 0,1 – 0,2 мм.

2. Количество циклов, достаточных для продвижения трещины на Δa, можно вычислить по уравнения Коффина-Мэнсона, пренебрегая слагаемым, описывающим повреждение от упругой составляющей, то есть [11, 13]

$$\Delta\varepsilon_p^u \Delta n = C\,. \qquad (4)$$

Здесь $\Delta\varepsilon_p$ – размах интенсивности пластической деформации в вершине трещины. По результатам экспериментальных исследований показатель степени u = 1,4-1,7 [11, 13].

Постоянная C характеризует предельную деформацию материала при однократном нагружении. С учетом объемности напряженного состояния материала в вершине трещины определим ее по методике Н.А.Махутова как [13]

$$C = -0,5 D_e \ln(1-\psi).$$

Здесь ψ – относительное сужение при разрыве, которое для строительных сталей составляет ψ = 0,6 – 0,7. Коэффициент D_e учитывает влияние объемности напряженного состояния и в зависимости от степени концентрации напряжений составляет D_e = 0,14 – 0,60 [13]. При весьма малых размерах пластической зоны в вершине усталостной трещины реализуется напряженное состояние близкое к плоской деформации, поэтому примем D_e = 0,2. С учетом этого получим C = 0,09 – 0,12, в дальнейших расчетах используем значение C = 0,1.

3. При сравнительно малых значениях КИН, при которых происходит развитие усталостной трещины, пластическая зона в вершине трещины весьма мала и пластические деформации контролируются окружающим упругим полем деформаций. Интенсивность пластических деформаций в области размером Δa, расположенной перед вершиной трещины можно определить по формуле [8, 13]

$$\varepsilon_p == \gamma \frac{\sigma_т}{E}\left(\frac{K_I}{\sigma_т\sqrt{\pi\Delta a}}\right)^2. \qquad (5)$$

Для определения коэффициента γ_1 проанализируем результаты конечно-элементного расчета растянутой полосы шириной b, толщиной t с краевой трещиной длиной a (рис. 2, а). Использовались три модели с размерами: №1 b = 100 мм, t = 16 мм, a = 20 мм, №2 b = 400 мм, t = 20 мм, a = 10 мм №3 b = 400 мм, t = 20 мм, a = 40 мм. Размер конечных элементов в области вершины трещины в модели 1 составлял 0,1 мм, а в моделях 2 и 3 – 0,17 мм (рис. 2, а, условно показан фрагмент сетки). Расчет выполнен по алгоритму нелинейной статики (NLStatic) при $\sigma_т$ = 300 МПа.

На этих моделях определены значения интенсивности пластической деформации в самом нагруженном элементе перед вершиной трещины (рис. 2, а, позиция 1). Расчет показал, что процесс развития пластических деформаций при нагружении полосы с трещиной, реализованный методом конечных элементов, может быть приближенно описан выражением (5) при коэффициенте γ = 0,15 (рис. 2, б, кривые 2 для модели 1 и 3 – для моделей 2 и 3).

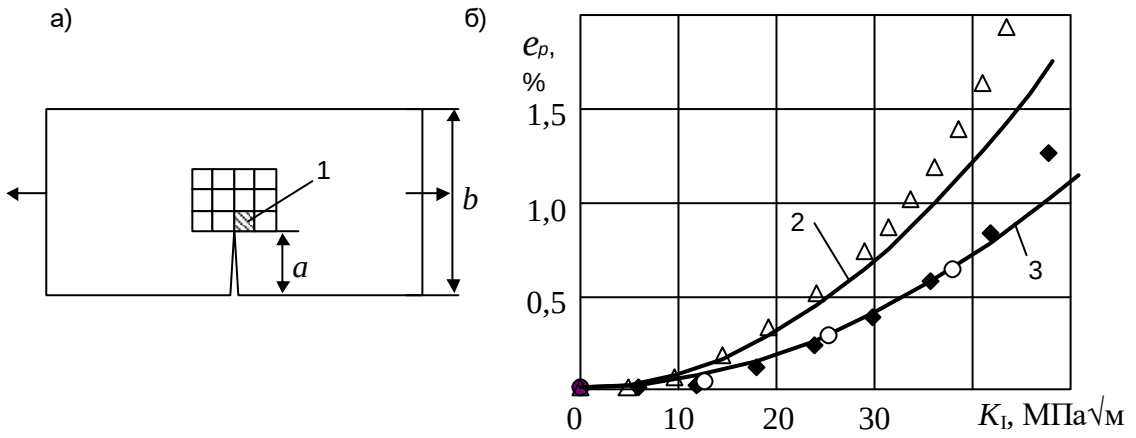


Рис. 2. Схема модели (а) и графики зависимости пластической деформации от значения КИН (б). Δ, ♦, o – модели №1, 2 и 3

4. Количество циклов, необходимых для создания усталостного повреждения в зоне Δa найдем, подставив (5) в выражение (4) и заменив максимальные значения пластической деформации и КИН на размахи, при этом получится

$$\Delta n = \frac{C}{\Delta \varepsilon_p^u} = \frac{C\left(\pi \Delta a E \sigma_т\right)^u}{\gamma^u \Delta K_I^{2u}}.$$

Следовательно, скорость развития усталостной трещины

$$v_a = \frac{\Delta a}{\Delta n} = \frac{\gamma^u \Delta K_I^{2u} \Delta a}{C\left(\pi \Delta a E \sigma_т\right)^u}. \qquad (6)$$

В этом выражении получена зависимость $v_a = f\left(\Delta K_I^{2u}\right)$, где $2u = 2{,}8 - 3{,}4$. Это соответствует экспериментально подтвержденному интервалу значений показателя q в выражении (2). Данное обстоятельство позволяет в рамках предлагаемой модели считать, что параметр Δa практически не зависит от ΔK_I.

Выражение (6) дает возможность сделать аналитическую оценку параметра ΔK_*. Согласно (2) при $\Delta K_I = \Delta K_*$ скорость развития трещины составляет V_*. Следовательно, из (6) найдем

$$\Delta K_* = \left(\frac{C V_*}{\Delta a}\right)^{\frac{1}{2u}} \sqrt{\frac{\pi E \sigma_т \Delta a}{\gamma}}. \qquad (7)$$

Результаты

Для проверки зависимости (7) использованы экспериментальные данные о параметрах кинетической диаграммы усталостного разрушения.

В литературных источниках, как правило, результаты исследования процессов развития усталостных трещин представляют в форме параметров уравнения Пэриса (1). В данной работе по значениям параметров Φ_K и q, полученным из литературных источников, вычислялось значение ΔK_*(2). Для обработки выбирались результаты испытания сталей с пределом текучести $\sigma_т \le 600$ МПа, которые используются или могли бы использоваться в сварных металлических конструкциях машин. Все результаты испытаний получены при циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии R = 0 – 0,2. Массив полученных данных приведен в таблице 1. На рис. 3 расчетные графики зависимости $K_* = f\left(\sigma_т\right)$ при Δa = 0,1 (кривая 1) и Δa = 0,2 (кривая 2) сопоставлены с результатами экспериментальной оценки параметра K_*.

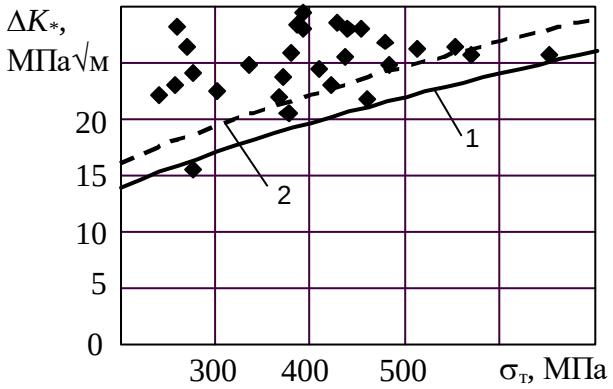


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta K_* = f\left(\sigma_т\right)$ по формуле (7) (кривые 1 и 2) и результаты экспериментального определения параметра ΔK_* (♦, таблица).

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований скорости распространения усталостных трещин в сталях

№	Марка стали	Предел текучести, МПа	ΔK_*, МПа√м	m	Источник
1.	Техническое железо	240	22,0	2,9	[14]
2.	30ХГСТ	550	26,3	3,5	[14]
3.	Ст3сп	275	15,5	2,4	[14]
4.	09Г2С	334	24,8	2,8	[14]
5.	10ХСНД	452	27,9	2,9	[14]
6.	16Г2АФ	481	24,8	2,8	[14]
7.	1020	275	24,0	3.0	[15]

8.	S355	390	28,0	3,5	[16]
9.	S355	419	30,1	3,6	[17]
10.	S690	766	21,9	2,9	[17]
11.	A	378	25,8	3,4	[18]
12.	B	510	26,2	3,6	[18]
13.	C	385	28,4	3,2	[18]
14.	Q345qC	458	24,0	2,7	[19]
15.	16MnR	370	23,7	3,4	[20]
16.	2.25Cr1Mo	478	26,8	2,9	[20]
17.	2.25Cr1MoV	568	25,6	2,6	[20]
18.	S235	258	28,2	3,4	[21]
19.	S355	390	29,3	3,1	[21]
20.	C45	650	25,7	3,5	[21]
21.	EH36	435	25,5	3,3	[22]
22.	HPS	438	28,0	3,3	[23]
23.	350WT	365	21,8	3,0	[23]
24.	Tubular Steel	426	28,5	3,2	[24]
25.	ABS-C	269	26,4	3,0	[25]
26.	Mild Steel	300	29,8	4,39	[26]
27.	Ст3	255	22.4	3,7	[27]
28.	15ХСНД	300	24.5	3,5	[27]
29.	BS986	375	20,4	3,1	[28]

Обсуждение

Представленные данные показывают, что зависимость (7) при $\Delta a = 0{,}1$ мм удовлетворительно описывает нижнюю границу разброса значений этого параметра для сталей с пределом текучести $\sigma_т \leq 600$ МПа. Стали более высокой прочности имеют более сложный химический состав и структуру, поставляются в термообработанном виде и обычно отличаются меньшей пластичностью. Они требуют более индивидуального подхода к оценке циклической трещиностойкости, и предлагаемые зависимости на них не распространяются.

Заключение

Показано, что в инженерных приложениях для прогнозирования периода развития усталостной трещины более рационально использовать модифицированное уравнение Пэриса, а не его авторскую форму. Представленные результаты показывают, что нижняя граница разброса параметра модифицированного уравнения Пэриса для сталей с пределом

текучести $\sigma_т \leq 600$ МПа может быть определена с достаточной точностью с помощью предлагаемой методики.

Для инженерной оценки остаточного ресурса элементов конструкции целесообразно использовать зависимость (3), в которое подставлять значение параметра ΔK_*, вычисленное по выражению (7) при $\Delta a = 0{,}1$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / М.: / Физматлит. 2006. 328 с.

[2] Крыжевич Г.Б. Механика разрушения металлических конструкций. /СПб. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 2021. 184 с.

[3] J.M.Barsom, S.T.Rolfe. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics. Second Edition. 1987. 628 p.

[4] T. Yokobori. Theory of particle transport phenomena during fatigue and timedpendent fracture of materials based on mesoscale dynamics and their practical applications. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 96, N 9 (2020). http://dx.doi.org/10.2183/pjab.96.029

[5] Никитин И. С., Бураго Н. Г., Никитин А. Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения. Прикладная математика и механика 2022, том 86, № 2, с. 257–271.

[6] Ромвари П., Тот Л. Анализ закономерностей распространения усталостных трещин в металлах. Проблемы прочности. 1980, №12, с. 18-28.

[7] Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. –Киев: Наук. думка. Т.4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.В., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. –1990. 680 с.

[8] Соколов С.А. Критерии работоспособности металлических конструкций машин. Проектирование с применением МКЭ / СПб.: Страта, 2023. – 202 с.

[9] British Standard BS 7910:2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI 2007.

[10] BS 7608:2014 Guide to fatigue design and assessment of steel products. The British Standards Institution. 2014.

[11] Циклическая деформация и усталость металлов. В 2-х т. Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / Трощенко В.Т. Хамаза Л.А., Покровкский В.В. и др. Под ред. Трощенко В.Т. – Киев: Наук. Думка, 1985. –216 с.

[12] Циклическая деформация и усталость металлов. В 2-х т. Т.2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / Трощенко В.Т. Хамаза Л.А., Покровкский В.В. и др. Под ред. Трощенко В.Т. – Киев: Наук. Думка, 1985. –224 с.
[13] Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. /Н.А.Махутов, –Новосибирск: Наука, 2005. –Ч.1: Критерии прочности и ресурса. –494 с.
[14] Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. –Киев: Наук. думка. Т.4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.В., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. –1990. 680 с.
[15] S.E.Ferreira, J.T.Pinho de Castro, M.A.Meggiolaro Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip. International Journal of Fatigue. 103 (2017), pp. 557-575.
[16] B. Pedrosa, J. Correia, G. Lesiuk, C. Rebelo, M. Veljkovic. Fatigue crack growth modelling for S355 structural steel considering plasticity-induced crack-closure by means of UniGrow model. International Journal of Fatigue. 164 (2022), pp. 107-120.
[17] A.M.P. de Jesus, R.Matos, B.F.C. Fontoura, C. Rebelo, L.S. da Silva, M. Veljkovic. A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades. Journal of Constructional Steel Research. 79 (2012), 140-150.
[18] Y. Hyodo, M. Yuga, Y. Kurihara, T-H. Doan, T. Sakimoto, Y. Murakami, K. Gotoh, T. Tagawa. Improvement of Fatigue Crack Propagation Property in Low. ISIJ International, Vol. 63 (2023), No. 10, pp. 1738–1746.
[19] L. Ke, Y. Li, C. Li, Z. Feng, F. Zhu, L. Liang, S. Mei. Experimental and probabilistic study of fatigue crack growth behavior of steel Q345qC under different stress ratios. Social Science Research…, August 2023. Engineering, Materials Science. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4387404
[20] Z. Gao, W. Sun, Y. Wang, F. Zhang. Fatigue crack growth properties of typical pressure vessel steels at high temperature. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18). Beijing, China, August 7-12, 2005. Pp. 1754-1761.
[21] H.A.Richard, M. Sander, Ermuedungsriss. Erkennen, sicher beutreilen, vermeiden. 2. Auflage. Springer. 2012. 259 p.
[22] Q. Zhu, P. Zhang, X. Peng, L. Yan, G. Li. Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of EH36 TMCP Steel. Materials 2021, 14, 6621. https://doi.org/10.3390/ma14216621
[23] H. Chen, R.G. Driver. Fatigue Resistance of High Performance Steel. Structural Engineering Report 258. Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada. 2005.
[24] S. Shankare Gowda Fatigue crack propagation in tubular steel of offshore structures. Rakenteiden Nekaniikka, Vol. 18 No. 4. 1985, s. 3 – 18.

[25] Barsom J.M. Fatigue-crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. Journal of engineering for Industry. 1971. Vol. 93. Series B, No. 4. Pp.1190-1196.
[26] C. L. Chow, C. W. Woo and k. T. Chung. Fatigue crack propagation in mild steel. Engineering Fracture Mechanics. 1986. Vol. 24, No. 2, pp. 233-241.
[27] Труфяков В.И., Кныш В.В., Михеев П.П., Кузьменко А.З. Зависимость скорости развития усталостной трещины от асимметрии цикла. Проблемы прочности, 1987, № 3, с.5-7.
[28] Maddox S.J. Fatigue Crack propagation data obtained from parent plate, weld metal and HAZ in structural steels. Welding Research Intren. Vol. 4, № 1, 1974, p. 36-60.

S.A. Sokolov, A.A. Grachov

PREDICTION OF FATIGUE CRACK DEVELOPMENT RATE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The work is aimed at the development of methods for predicting fatigue resistance and enhancing the reliability of elements of metal structures of machines. A methodology for calculating the rate of fatigue crack development under the action of cyclic loading is proposed. At present, the main methodological approach to solving this problem is based on the use of the Paris equation, the parameters of which are determined experimentally. This paper illustrates the advantage of transitioning to the use of the modified Paris equation and proposes a technique for analytical determination of its parameter. The proposed method is based on the assumption of discrete fatigue crack development and calculation of the number of cycles required for each jump using the Coffin-Manson equation. The validity of the proposed methodology is confirmed by a comparison of the results with an array of experimental data.

Key words: metal fatigue, cyclic loading, fatigue crack development, Paris equation, stress intensity coefficient, plastic deformation.

REFERENCES

[1] Babichev D.T., Lebedev S.Yu. A new methodology of kinematic analysis Matvienko Yu.G. Models and criteria of destruction mechanics / M.: / Fizmatlit. 2006. 328 p.

[2] Kryzhevich G.B. Mechanics of destruction of metal structures. /St. Petersburg. FSUE "Krylov State Scientific Center". 2021. 184 p.
[3] J.M.Barsom, S.T.Rolfe. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics. Second Edition. 1987. 628 p.
[4] T. Yokobori. Theory of particle transport phenomena during fatigue and timedpendent fracture of materials based on mesoscale dynamics and their practical applications. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 96, N 9 (2020). http://dx.doi.org/10.2183/pjab.96.029
[5] Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A.D. Damage and fatigue failure of structural elements in various cyclic loading modes. Applied Mathematics and Mechanics 2022, volume 86, No. 2, pp. 257-271.
[6] Romvari P., Toth L. Analysis of patterns of fatigue crack propagation in metals. Problems of durability. 1980, No. 12, pp. 18-28.
[7] Fracture mechanics and strength of materials: Reference. manual: 4 volumes / Under the general editorship. Panasyuk V.V. – Kiev: Nauk. dumka, vol. 4.: Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials / Romaniv O.V., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. -1990. 680 p.
[8] Sokolov S.A. Criteria for the operability of metal structures of machines. Design using FEM / St. Petersburg: Strata, 2023. 202 p.
[9] British Standard BS 7910:2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI 2007.
[10] BS 7608:2014 Guide to fatigue design and assessment of steel products. The British Standards Institution. 2014.
[11] Cyclic deformation and fatigue of metals. In 2 volumes, vol. 1. Low-cycle and multi-cycle fatigue of metals / Troshchenko V.T. Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. et al. Edited by Troshchenko V.T. – Kiev: Nauk. Dumka, 1985. -216 p.
[12] Cyclic deformation and fatigue of metals. In 2 volumes Vol.2. Durability of metals taking into account operational and technological factors / Troshchenko V.T. Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. et al. Edited by Troshchenko V.T. – Kiev: Nauk. Dumka, 1985. -224 p.
[13] Makhutov N.A. Structural strength, resource and technogenic safety: In 2 parts /N.A.Makhutov, Novosibirsk: Nauka, 2005. – Part 1: Criteria of strength and resource. -494 p .
[14] Fracture mechanics and strength of materials: Reference. manual: 4 volumes / Under the general editorship. Panasyuk V.V. – Kiev: Nauk. dumka, vol. 4.: Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials / Romaniv O.V., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. -1990. 680 p.
[15] S.E.Ferreira, J.T.Pinho de Castro, M.A.Meggiolaro Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip. International Journal of Fatigue. 103 (2017), pp. 557-575.

[16] B. Pedrosa, J. Correia, G. Lesiuk, C. Rebelo, M. Veljkovic. Fatigue crack growth modelling for S355 structural steel considering plasticity-induced crack-closure by means of UniGrow model. International Journal of Fatigue. 164 (2022), pp. 107-120.
[17] A.M.P. de Jesus, R.Matos, B.F.C. Fontoura, C. Rebelo, L.S. da Silva, M. Veljkovic. A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades. Journal of Constructional Steel Research. 79 (2012), 140-150.
[18] Y. Hyodo, M. Yuga, Y. Kurihara, T-H. Doan, T. Sakimoto, Y. Murakami, K. Gotoh, T. Tagawa. Improvement of Fatigue Crack Propagation Property in Low. ISIJ International, Vol. 63 (2023), No. 10, pp. 1738–1746.
[19] L. Ke, Y. Li, C. Li, Z. Feng, F. Zhu, L. Liang, S. Mei. Experimental and probabilistic study of fatigue crack growth behavior of steel Q345qC under different stress ratios. Social Science Research…, August 2023. Engineering, Materials Science. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4387404
[20] Z. Gao, W. Sun, Y. Wang, F. Zhang. Fatigue crack growth properties of typical pressure vessel steels at high temperature. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18). Beijing, China, August 7-12, 2005. Pp. 1754-1761.
[21] H.A.Richard, M. Sander, Ermuedungsriss. Erkennen, sicher beutreilen, vermeiden. 2. Auflage. Springer. 2012. 259 p.
[22] Q. Zhu, P. Zhang, X. Peng, L. Yan, G. Li. Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of EH36 TMCP Steel. Materials 2021, 14, 6621. https://doi.org/10.3390/ma14216621
[23] H. Chen, R.G. Driver. Fatigue Resistance of High Performance Steel. Structural Engineering Report 258. Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada. 2005.
[24] S. Shankare Gowda Fatigue crack propagation in tubular steel of offshore structures. Rakenteiden Nekaniikka, Vol. 18 No. 4. 1985, s. 3 – 18.
[25] Barsom J.M. Fatigue-crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. Journal of engineering for Industry. 1971. Vol. 93. Series B, No. 4. Pp.1190-1196.
[26] C. L. Chow, C. W. Woo and k. T. Chung. Fatigue crack propagation in mild steel. Engineering Fracture Mechanics. 1986. Vol. 24, No. 2, pp. 233-241.
[27] Trufiakov V.I., Knysh V.V., Mikheev P.P., Kuzmenko A.Z. Dependence of the fatigue crack development rate on cycle asymmetry. Problems of Strength, 1987, No. 3, pp.5-7.
[28] Maddox S.J. Fatigue Crack propagation data obtained from parent plate, weld metal and HAZ in structural steels. Welding Research Intren. Vol. 4, № 1, 1974, p. 36-60.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.81
doi:10.18720/SPBPU/2/id-141

В.М. Третьяков

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ. ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ



Владимир Михайлович Третьяков, Ковровская государственная технологическая академия имени Дегтярева, Россия, г. Ковров
Тел.: (49232) 4-20-33, E-mail: tretykov.kovrov@list.ru

Аннотация

Технологичность и эффективность эксплуатации изделий зависят от совершенства их конструкций. Конструкция во многом предопределяется методами конструирования. Для решения задач конструирования предлагаются три основных инструмента: матрицы подвижностей, узлы сопряжения и модели промежутков между составными частями изделия. По мнению автора, эти инструменты позволят приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкций. Применение предложенных инструментов иллюстрируется на примере разработки принципов действия винтовых механизмов.

Ключевые слова: конструирование, узел сопряжения составной части, матрица подвижностей, структурная модель, геометрический элемент составной части, фрагмент геометрического тела составной части, модель промежутка между составными частями.

Введение

Эффективному управлению развитием конструкций изделий машиностроения мешает непрерывно растущее разнообразие их составных частей [1]. Для повышения эффективности отечественного машиностроения и осуществления его цифровизации необходимо перейти от процесса конструирования в виде «придумывания» конструкции, к формализованному процессу. В данной работе для решения задач конструирования предлагается три

инструмента: матрицы подвижностей, узлы сопряжения составных частей (СЧ), и модели промежутков между СЧ изделия. По мнению автора, эти инструменты позволят приблизиться к решению задачи формализации процесса разработки конструкции. Первый этап процесса разработки изделия заключается в определении его принципа действия. Для механизмов и машин принцип действия принято оформлять в виде кинематической схемы. Для ее разработки используются матрицы подвижностей и структурные модели, учитывающие узлы сопряжения СЧ.

Материалы и методы

Основные инструменты конструирования

1. *Матрицы подвижностей*, *структурные уравнения* в алгебраической и матричной форме:

Структурное уравнение в матричной форме, приведенное в [2], имеет вид:

$$WQ_m = W_{m-1} + W^u_{M(m-1)} + H_{\Sigma m} - W^u_{Mm} - W_{Mm} - F, \qquad (1.1)$$

где WQ_m – матрица структурных свойств (подвижностей и избыточных связей) кинематической цепи, полученной формированием m-го замкнутого контура, она содержит описание подвижностей всего механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая контур с номером m, и избыточных связей, возникших только в контуре под номером m;

W_{m-1} – матрица общих подвижностей начального механизма, входящего в замкнутый контур под номером m, которая содержит подвижности всего начального механизма, полученного замыканием всех контуров начиная с первого, включая и контур с номером $(m-1)$;

$H_{\Sigma m} = \sum_{i=1}^{p^m} H_i$ – суммарная матрица подвижностей в кинематических парах, образованных вновь введенными составными частями (СЧ) при формировании замкнутого контура под номером m;

$H_i = \begin{vmatrix} t_x & r_x \\ t_y & r_y \\ t_z & r_z \end{vmatrix}$ - матрица подвижностей i -ой кинематической пары,

где t_x, t_y, t_z – переменные, равные 1 при наличии поступательных подвижностей (движений) вдоль осей X, Y, Z и 0 в противном случае;

r_x, r_y, r_z – переменные, принимающие значение 1 при наличии вращательных подвижностей (движений) вокруг осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае;

p^m - число кинематических пар, образованных вновь введенными СЧ при формировании замкнутого контура под номером m;

n_m - число подвижных СЧ вновь введенных при формировании m -го замкнутого контура механизма;

$F = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица свободного замыкания контура (матрица подвижностей свободного твердого тела).

Более подробная информация о матрицах подвижностей и их использовании приведена в [2].

2. *Узлы сопряжения* СЧ и производные от них. *Узел сопряжения* - совокупность фрагментов (точек, линий, поверхностей) СЧ, используемых для обмена материальными потоками с другим объектом при заданном их относительном положении; *геометрический элемент* (ГЭ) составной части - геометрическое место всех положений узла сопряжения на ее поверхности, *структурные модели СЧ*, учитывающие узлы сопряжения. На рис. 1.1 справа приведена структурная схема винтового механизма (см. [3]) с обозначениями исполнений (охватываемое «-», охватывающее «+») узлов сопряжения. Здесь h, p, r – обозначение винтовой, поступательной и вращательной кинематических пар. Эта структурная модель легко трансформируется в более простую путем слияния вершин, соответствующих узлам сопряжения одной СЧ, в одну вершину, представляющую в модели данную СЧ (модель расположена слева на рис. 1.1). Более подробная информация об узлах сопряжения и их использовании приведена в [4]. В обозначении узлов первый индекс указывает номер СЧ, которой принадлежит узел сопряжения. Второй индекс - номер СЧ, с которой сопрягается узел, или номер узла в структуре узлов СЧ, которой он принадлежит. Первый вариант обозначения облегчает составление структурных схем и уравнений соединения узлов сопряжения. Для механизма, показанного на рисунке уравнения соединений имеют вид: $a_{01} + a_{10} = 0$, $a_{12} + a_{21} = 0$, $a_{20} + a_{02} = 0$.



Рис. 1.1. Структурные модели винтового механизма

ГЭ отличаются формой и размерами, которые зависят от геометрических характеристик узлов сопряжения, относительного

перемещения СЧ, а также от величины перемещения узла сопряжения по телу СЧ. На рис. 1.2 показано условное изображение вариантов исполнений («охватываемое» и «охватывающее») ГЭ составных частей, образующих винтовую пару. Они представляют собой винтовые поверхности. У узла сопряжения и образованного им ГЭ исполнения («охватывающее» или «охватываемое») одинаковы. Штриховка показывает с какой стороны от ГЭ располагается тело СЧ. Один вариант соответствует случаю, когда узел сопряжения и ГЭ совпадают, например, при отсутствии перемещения узла сопряжения по СЧ. Второй вариант, когда ГЭ и узел отличаются, например, при наличии перемещения узла по СЧ. Будем использовать символ l - для обозначения исполнения ГЭ, которое получено перемещением сформировавшего его узла сопряжения по СЧ и это перемещение увеличивает размеры ГЭ по сравнению с размерами узла (hl, $-hl$ на рис. 1.2). Если движение узла сопряжения по ГЭ отсутствует или оно не отражается на геометрических параметрах последнего, то будем использовать символ s, например, hs, $-hs$ (рис. 1.2).

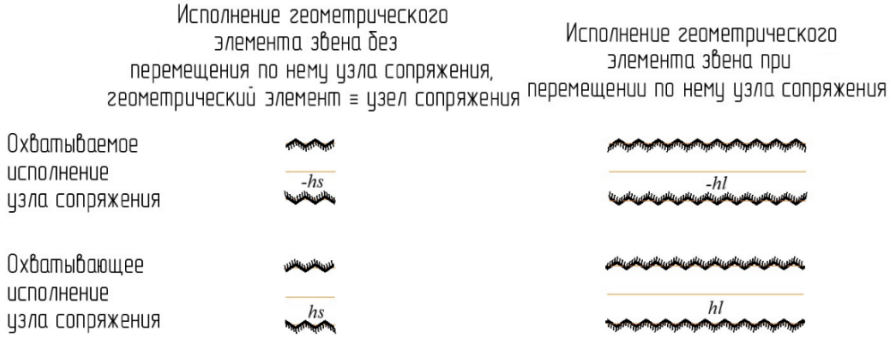


Рис. 1.2. Варианты исполнений резьбовых ГЭ

В реальной конструкции ГЭ является частью определенного *фрагмента геометрического тела* СЧ. Толщина фрагмента должна быть достаточной для обеспечения требуемой прочности и жесткости создаваемого соединения. С другой стороны, между данным фрагментом геометрического тела СЧ и элементами конструктивного контекста, в котором она находится, должны быть не нулевые промежутки. Возникает необходимость иметь *модели промежутков* между СЧ [5]. Сам ГЭ должен находиться в непосредственном контакте с ГЭ другой СЧ через их узлы сопряжения.

На рис. 1.3 показаны узлы сопряжения и полученные на их основе ГЭ ($-hs$, hs, $-hl$, hl), а также фрагменты геометрических тел СЧ для создания винтовых кинематических пар. Там же приведены модели промежутков, обеспечивающие отсутствие прямого контакта нерабочих поверхностей фрагментов геометрических тел с объектами окружающей среды. Не «закрытым» промежутками остается только сам ГЭ. В силу того, что в винтовой паре СЧ являются симметричными относительно оси вращения, на

рисунке показаны только те части узлов сопряжения, ГЭ, фрагментов геометрических тел и моделей промежутков, которые расположены выше оси вращения.

В одномерном пространстве, в котором рассматривается движение винтовых механизмов, размеры ГЭ вдоль оси X учтены их исполнениями

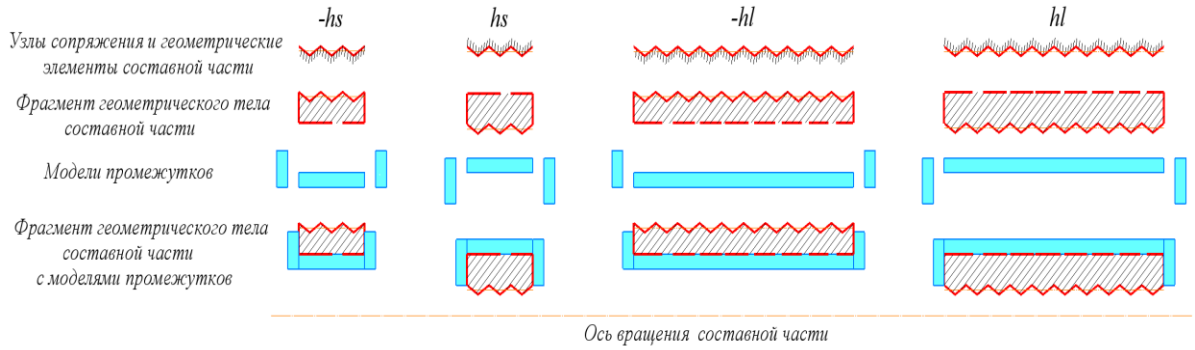


Рис. 1.3

вида l и s. Рассматривая расположение (координаты) узлов сопряжения и ГЭ вдоль оси X (рис. 1.1), будем учитывать два основных варианта их относительного положения на СЧ: первый – проекции ГЭ на ось X пересекаются (в том числе, одна внутри другой), второй - проекции ГЭ на ось не пересекаются (в том числе, рядом друг с другом). Примеры двух вариантов размещения резьбовых ГЭ на СЧ приведены на рис. 1.4.

Основные параметры геометрии узлов сопряжения (ГЭ). Для ГЭ и формирующего его узла сопряжения a_{ij}, введем *основной параметр геометрии* D_{ij}, влияющий на его размеры и, как следствие, на размещение ГЭ на СЧ. В качестве примеров таких параметров могут служить средний диаметр резьбы, диаметр вала и т.п.

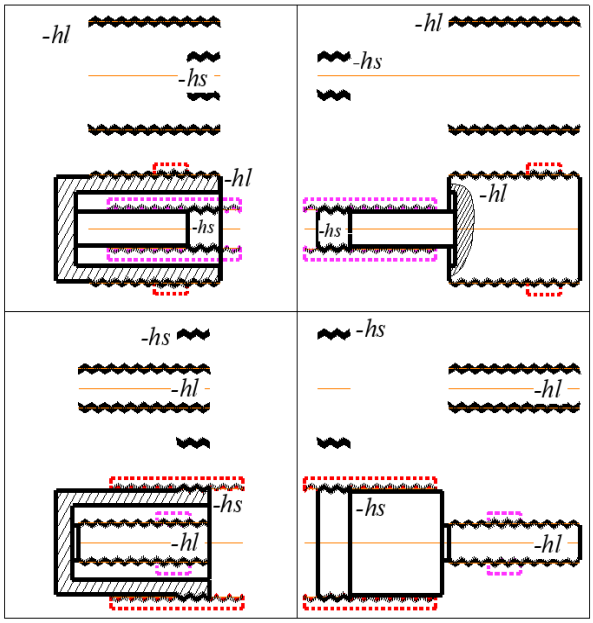


Рис. 1.4. ГЭ и их положение на СЧ

Для СЧ, содержащих два ГЭ в направлении перпендикулярном оси X будем учитывать два варианта соотношения основных параметров геометрии: для первого $D_{ij} > D_{ik}$, для второго $D_{ij} < D_{ik}$. Они показаны на рис. 1.4 как в виде отдельных ГЭ, так и ГЭ в составе СЧ. На рисунках штриховыми линиями показаны элементы конструктивного контекста: ГЭ внешних СЧ.

Результаты

Применим указанные инструменты для поиска вариантов принципа действия винтовых механизмов, предназначенных для преобразования винтового, вращательного и поступательного движений. На рис. 1.1 приведена схема механизма, наиболее часто используемого для преобразования вращательного движения в поступательное.

Определение принципов действия

Механизм, показанный на рис. 1.1, функционирует, по терминологии А.И. Смелягина [6], *в одномерном* $\mathrm{M}=1$ *двух подвижном* $\mathrm{П}=2$ *пространстве*. Поэтому в используемых ниже матрицах подвижностей его кинематических пар две нижних строки не заполняются. Далее матрица подвижностей кинематической пары будет иметь вид: $H = |t_x \quad r_x|$.

В механизмах подобного вида могут использоваться одноподвижные кинематические пары трех видов: винтовая (h), поступательная (p) и вращательная (r). Их матрицы подвижностей:

$$H_h = |t_x \quad r_x = \neg t_x| \vee |t_x = \neg r_x \quad r_x| = |1 \quad 0| \vee |0 \quad 1|,$$
$$H_p = |1 \quad 0|, H_r = |0 \quad 1|. \qquad (1.2)$$

Одноподвижная винтовая кинематическая пар B, связывающая винт 1 и гайку 2, является основной в процессе преобразования входного вращательного движения в выходное поступательное. Возникает вопрос какую составляющую винтового движения (вращательную или поступательную) выбрать в качестве ее подвижности. Даже в случае, представленном на рис. 1.1, выбор не очевиден. При наличии нескольких винтовых пар ситуация еще более сложная. Поэтому при синтезе принципов действия винтовых механизмов, желательно обойтись без назначения конкретных подвижностей винтовым парам.

Применим алгебраическое структурное уравнение $w = 2n - p_1$ [6] для определения подвижностей винтовых механизмов. Механизмы данного вида содержат два подвижных звена $n = 2$ и три одноподвижные кинематических пары, накладывающие одну связь на соединяемые звенья, $p_1 = 3$: $w = 2n - p_1 = 2 \cdot 2 - 3 = 1$. Имея одну общую подвижность данный механизм не должен содержать местных подвижностей звеньев. Если местные подвижности появляются, то вместе с ними появляются и избыточные связи в том же количестве. В создаваемых конструкциях трехзвенных механизмов местные подвижности и избыточные связи должны отсутствовать.

При определении местной подвижности звена предполагаем, что все связанные с ним звенья неподвижны и считаем их единой стойкой (рис. 1.5).

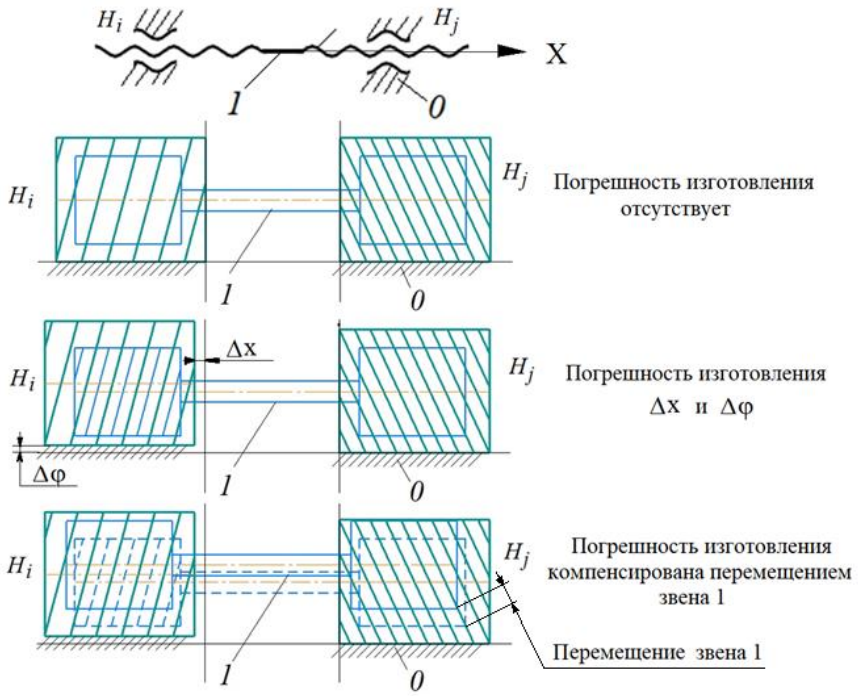


Рис. 1.5. Звено с винтовыми парами $(h;h)$, представленными в виде развертки

Матрицу местных подвижностей двупарного звена получим по формуле (1.1): $W_M = H_i + H_j - F$. Варианты двупарных звеньев определяются видами используемых кинематических пар. В таблице 1.1 их девять. Если обе кинематические пары H_i и H_j вращательные, то: $W_M = |0 \quad 1| + |0 \quad 1| - |1 \quad 1| = |-1 \quad 1|$. Полученный результат показывает, что в этом случае имеется избыточная связь: отсутствует поступательное движение вдоль оси X. Устранить ее можно заменив одну вращательную кинематическую пару на поступательную. Для двух поступательных пар избыточная связь вызвана отсутствием вращательной подвижности вокруг оси X. Устраняется она аналогично.

Если обе кинематические пары винтовые и углы наклона резьбы винтовых пар H_i и H_j не равны, то конструкция подвижностей не имеет, а также не имеет и избыточных связей. На рис. 1.5 показано, как за счет смещения звена 1 вдоль резьбы компенсируются погрешности изготовления. Избыточная связь будет иметь место только при равенстве углов наклона винтовых линий и одинаковом направлении резьбы.

В таблице 1.1 приведены структурные свойства двупарных звеньев с разными наборами кинематических пар. Для вариантов конструкций с номерами 3 – 6 местные подвижности и избыточные связи отсутствуют. Для двупарных звеньев обе кинематические пары должны быть винтовыми или различного вида. В этом случае для них выполняется соотношение:

$H_i + H_j - F = |0 \quad 0|$. Данное условие будем использовать при синтезе вариантов кинематических схем винтовых механизмов.

Структурные свойства конструкции по рис. 1.1 определяется по формуле (1.1): $WQ = H_A + H_B + H_C - F$. Звено 1 образует кинематические пары A и B. Для него представим это уравнение в виде $WQ = (H_A + H_B - F) + H_C$. Для звена 2: $WQ = H_A + (H_B + H_C - F)$. В обоих случаях выражения в скобках равны $|0 \quad 0|$. Отсутствие действий с матрицами позволяет не назначать конкретные подвижности винтовым парам, а подвижность механизма определяется подвижностью либо входной, либо выходной пары.

Таблица 1.1. Матрицы структурных свойств двупарных звеньев

№	Наименования кинематических пар устройства	Матрицы			Зависимости для дальнейшего использования
		Кинематической пары H_i	Кинематической пары H_j	Структурных свойств	
1	Обе вращательные $(r;r)$	$\|0 \quad 1\|$	$\|0 \quad 1\|$	$\|-1 \quad 1\|$	-
2	Обе поступательные $(p;p)$	$\|1 \quad 0\|$	$\|1 \quad 0\|$	$\|1 \quad -1\|$	-
3	Поступательная и вращательная $(p;r)$, $(r;p)$	$\|1 \quad 0\|$	$\|0 \quad 1\|$	$\|0 \quad 0\|$	$H_p + H_r - F = \|0 \quad 0\|$
4	Обе винтовые $(h;h)$,	$\|t_{Ax} = \neg r_{Ax} \quad r_{Ax}\|$	$\|t_{Bx} = \neg r_{Bx} \quad r_{Bx}\|$	$\|0 \quad 0\|$	$H_h + H_h - F = \|0 \quad 0\|$
5	Вращательная и винтовая $(r;h)$, $(h;r)$,	$\|0 \quad 1\|$	$\|t_{Bx} = \neg r_{Bx} \quad r_{Bx}\|$	$\|0 \quad 0\|$	$H_r + H_h - F = \|0 \quad 0\|$
6	Поступательная и винтовая $(p;h)$, $(h;p)$	$\|1 \quad 0\|$	$\|t_{Bx} = \neg r_{Bx} \quad r_{Bx}\|$	$\|0 \quad 0\|$	$H_p + H_h - F = \|0 \quad 0\|$

Для определения вариантов принципов действия формируется таблица 1.2. В первом ее столбце указаны кинематические пары звена 1. Первый элемент, расположенный в скобках, соответствует паре A, второй – паре B. В третьей строке приведены виды кинематических пар звена 2. Первый элемент в скобках показывает вид кинематической пары B, второй – вид кинематической пары C.

В таблице 1.2 единицами отмечены пары звеньев, которые позволяют получить кинематическую цепь без местных подвижностей и избыточных связей. Последнее обеспечено использованием звеньев, с кинематическими парами под номерами 3 – 6 из таблицы 1.1. Отбор вариантов осуществляется на основе следующих условий. У пары звеньев, определяющих ячейку с единицей: 1) хотя бы одно звено образует, по крайней мере, одну винтовую кинематическую пару; 2) последний элемент набора кинематических пар, указанного в столбце 1, тождественен первому элементу набора, указанному в 3-ей строке, так как речь идет об одной и той же кинематической паре B.

Таблица 1.2. Пары звеньев для трехзвенных винтовых механизмов

Кинем.пары $(A;B)$ звена 1	Кинематические пары $(B;C)$ звена 2 по таблице 1.1							
	3	3	4	5	5	6	6	
	$(p;r)$	$(r;p)$	$(h;h)$	$(r;h)$	$(h;r)$	$(p;h)$	$(h;p)$	Сумма
$(p;r)$				**1**				**1**
$(r;p)$						**1***		**1**
$(h;h)$,			**1**		***1***		**1****	**3**
$(r;h)$			***1***		~~**1**~~		***1***	**3**
$(h;r)$		**1**		**1**				**2**
$(p;h)$			**1****		***1***		~~**1**~~	**3**
$(h;p)$	**1***					**1**		**2**
Сумма	**1**	**1**	**3**	**2**	**3**	**2**	**3**	**15**

В таблице 1.3 приведены подвижности кинематических пар, параметры звеньев и кинематические характеристики устройств, построенных на основе пар звеньев, отмеченных пятнадцатью единицами таблицы 1.2. Формула (*a*) заимствована из справочного пособия [3]. Остальные формулы получены из нее с учетом параметров резьбы винтовых пар, приведенных в шестом столбце таблицы. В этих формулах h_A, h_B и h_C – шаги резьбы в винтовых парах пар A, B и C, которые имеют знак плюс в случае правой резьбы и знак минус для левой резьбы. Для вращательной кинематической пары используется параметр $h=0$, для поступательной - $h\to\infty$.

В таблице 1.2 пары единиц идентичные по оформлению (звездочки, курсив, подчеркивание) показывают пары подвижных звеньев одного и того же обратимого механизма. В таблице 1.3 они выделены цветом и одинаковым номером.

Два варианта кинематических цепей, соответствующие номерам 9 и 10 в таблице 1.3, не осуществляют преобразования вида движения или его параметров, а только передают движение от входного звена к выходному. Они не соответствуют определению механизма, которое дает теория механизмов и машин. Эти замкнутые кинематические цепи теряют подвижность при изменении неподвижного звена. Им соответствуют зачеркнутые единицы в таблице 1.2. Из этого следует, что правило отбора вариантов наборов кинематических пар двупарных звеньев простого винтового механизма, должно относится ко всем его звеньям включая стойку*: все двупарные звенья не должны образовывать две поступательные или две вращательные кинематических пар*. Полученные результаты отличаются от данных работы [7], где речь идет о 17 вариантах механизмов.

Таблица 1.3.

№ цепи	Кин. пара звена 0 / Кинематические пары звена 1 / Входная кин. пара $H_A = W$	Кинематические пары звена 2 / H_B	Кин. пара звена 0 / Выходная кин. пара $H_C = W$	Параметры звеньев и их движения: Входное движение	Параметры кинематич. пар	Выходное движение
1	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq h_B \neq h_C \neq 0$	$\varphi_2 = \frac{(h_A - h_B)}{(h_C - h_B)} \varphi_1$, $s_2 = \frac{h_C}{h_A} \frac{(h_A - h_B)}{(h_C - h_B)} s_1$, $s_2 = h_C \frac{(h_A - h_B)}{(h_C - h_B)} \frac{\varphi_1}{2\pi}$ (a)
2	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq 0, h_B \to \infty$, $h_C \neq 0$	$\varphi_2 = \varphi_1, s_2 = \frac{h_c}{h_A} s_1$, $s_2 = h_C \frac{\varphi_1}{2\pi}$
3	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 = 0$, $s_1 \neq 0$	$h_A \to \infty$, $h_B \neq h_C \neq 0$	$s_2 = \frac{h_C}{(h_C - h_B)} s_1$, $\varphi_2 = \frac{2\pi}{h_C - h_B} s_1$
	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq h_B \neq 0$, $h_C \to \infty$	$\varphi_2 = 0$, $s_2 = (1 - \frac{h_B}{h_A}) s_1$
4	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $r_{Cx} = \neg t_{Cx}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq 0$, $h_B = 0$, $h_C \neq 0$	$\varphi_2 = \frac{h_A}{h_C} \varphi_1$, $s_2 = s_1$
5	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = 0$	$h_A = 0$, $h_B \neq h_C \neq 0$	$\varphi_2 = \frac{(-h_B)}{(h_C - h_B)} \varphi_1$, $s_2 = \frac{-h_c h_B}{(h_C - h_B)} \frac{\varphi_1}{2\pi}$
	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq h_B \neq 0$, $h_C = 0$	$\varphi_2 = \frac{(h_A - h_B)}{(-h_B)} \varphi_1$, $s_2 = 0$
6	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = 0$	$h_A = 0, h_B \to \infty$, $h_C \neq 0$,	$\varphi_2 = 0$, $s_2 = h_C \frac{\varphi_1}{2\pi}$
	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq 0, h_B \to \infty$, $h_C = 0$	$\varphi_2 = \varphi_1$, $s_2 = 0$
7	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 = 0$, $s_1 \neq 0$	$h_A \to \infty, h_B \neq 0$, $h_C = 0$	$\varphi_2 = \frac{-2\pi}{h_B} s_1$, $s_2 = 0$
	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = 0$	$h_A = 0, h_B \neq 0$, $h_C \to \infty$	$\varphi_2 = 0$, $s_2 = -h_B \frac{\varphi_1}{2\pi}$
8	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Ax} & r_{Ax} \end{vmatrix}$, $t_{Ax} = \neg r_{Ax}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = h_A \frac{\varphi_1}{2\pi}$	$h_A \neq 0, h_B = 0$, $h_C \to \infty$	$\varphi_2 = 0$, $s_2 = s_1$
	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Cx} & r_{Cx} \end{vmatrix}$, $t_{Cx} = \neg r_{Cx}$	$\varphi_1 = 0$, $s_1 \neq 0$	$h_A \to \infty, h_B = 0$, $h_C \neq 0$	$\varphi_2 = \frac{2\pi}{h_C} s_1$, $s_2 = s_1$
9	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_p = \begin{vmatrix} 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 = 0$, $s_1 \neq 0$	$h_A \to \infty, h_B \neq 0$, $h_C \to \infty$	$\varphi_2 = 0$, $s_2 = s_1$
10	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$H_h = \begin{vmatrix} t_{Bx} & r_{Bx} \end{vmatrix}$, $t_{Bx} = \neg r_{Bx}$	$H_r = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\varphi_1 \neq 0$, $s_1 = 0$	$h_A = 0, h_B \neq 0$, $h_C = 0$	$\varphi_2 = \varphi_1$, $s_2 = 0$

Применим структурные уравнения и модели при модернизации телескопической винтовой передачи (рис. 1.6). Обозначим структурные свойства изделия-прототипа n_n, p_{1n}, w_n, а модернизированного изделия n_u, p_{1u}, w_u. Их структурные уравнения имеют вид: $w_n = 2n_n - p_{1n}$ и $w_u = 2n_u - p_{1u}$. Вычтем из первого второе:

$$w_n - w_u = 2n_n - 2n_u - p_{1n} + p_{1u}. \quad (1.3)$$

Обозначим: $\Delta w = w_n - w_u, \Delta n = n_n - n_u.$ (1.4)

Из (1.3) с учетом (1.4) найдем: $p_{1u} = p_{1n} + \Delta w - 2\Delta n.$ (1.5)

Последнюю формулу будем использовать для определения числа кинематических пар (связей) модернизированной конструкции.

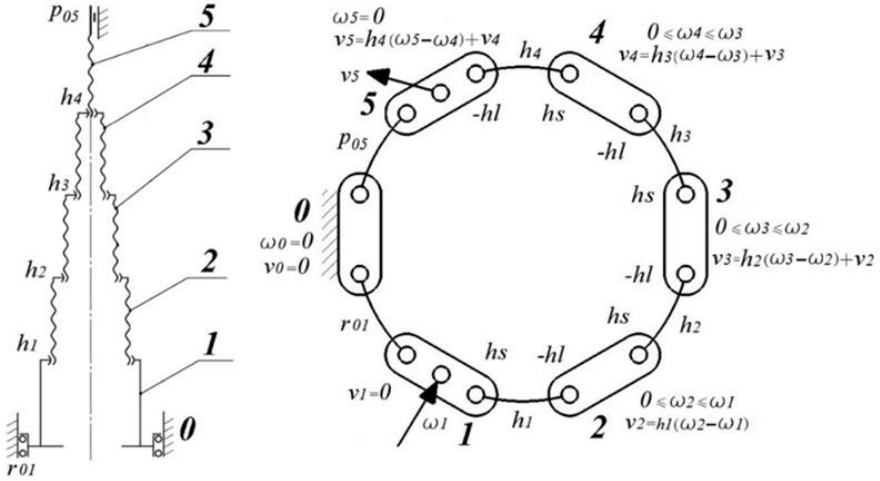


Рис. 1.6. Механизм, принятый за прототип

По формуле $w = 2n - p_1$ найдем подвижность механизма, изображенного на рис. 1.6: $n = 5$, $p_1 = 6$ и $w = 2 \cdot 5 - 6 = 4$.

Скорость v_5 поступательного перемещения выходного звена 5 зависит от скорости вращения ω_1 входного звена 1 и скоростей вращения остальных подвижных звеньев. Значение v_5 определим по формуле:

$$v_5 = -h_4\omega_4 + h_3(\omega_4 - \omega_3) + h_2(\omega_3 - \omega_2) + h_1(\omega_2 - \omega_1). \quad (1.6)$$

Двигатель задает только скорость $\omega_1 = \omega$ звена 1. Скорости вращения звеньев 2, 3 и 4 могут принимать разные значения в пределах, показанных на рис. 1.6. Если принять, что шаги резьбы одинаковы во всех винтовых парах и равны h_1, то скорость поступательного движения звена 5 будет равна $v_5 = -h_1\omega$. При неравенстве шагов резьбы скорость выходного звена и момент движущих сил переменны. Это усложняет управление механизмом и снижает его надежность. Для устранения этих недостатков механизм должен иметь не 4 подвижности, а только одну. Считаем что число звеньев в новом одноподвижном механизме не изменится, поэтому $n_и = 5$, $w_и = 1$, а $\Delta w = 3$, $\Delta n = 0$. По (1.5) получим $p_{1u} = 6 + 3 - 2 \cdot 0 = 9$.

Чтобы получить одну подвижность в механизм-прототип необходимо ввести три новые кинематические пары (связи).

Выражение (1.6) показывает, что звенья с 2 по 5 движутся поступательно. Для их одновременного движения скорости вращения каждых двух звеньев, образующих винтовую кинематическую пару, должны отличаться. Для кинематической пары h_4 скорость 5 звена $\omega_5 = 0$, поэтому $\omega_4 \neq 0$. Для кинематической пары h_3 скорость 4 звена $\omega_4 \neq 0$, поэтому примем $\omega_3 = 0$. И так далее для 2 звена $\omega_2 \neq 0$, а для 1 звена примем $\omega_1 = 0$. Звенья 1 и 3 не должны иметь вращательного движения. Таким образом, звено 1 не вращается и не совершает поступательного движения, поэтому оно становится составной частью стойки (на рис. 1.7 такая схема, расположенная слева вверху). Движения звеньев 2 и 4 винтовые, а 3 и 5 поступательные. Подвижность такого механизма равна $n = 4$, $p_1 = 5$ и $w = 2 \cdot 4 - 5 = 3$. По формуле (1.5) легко убедится, что для уменьшения его подвижности до одной единицы требуется ввести две связи (кинематические пары).

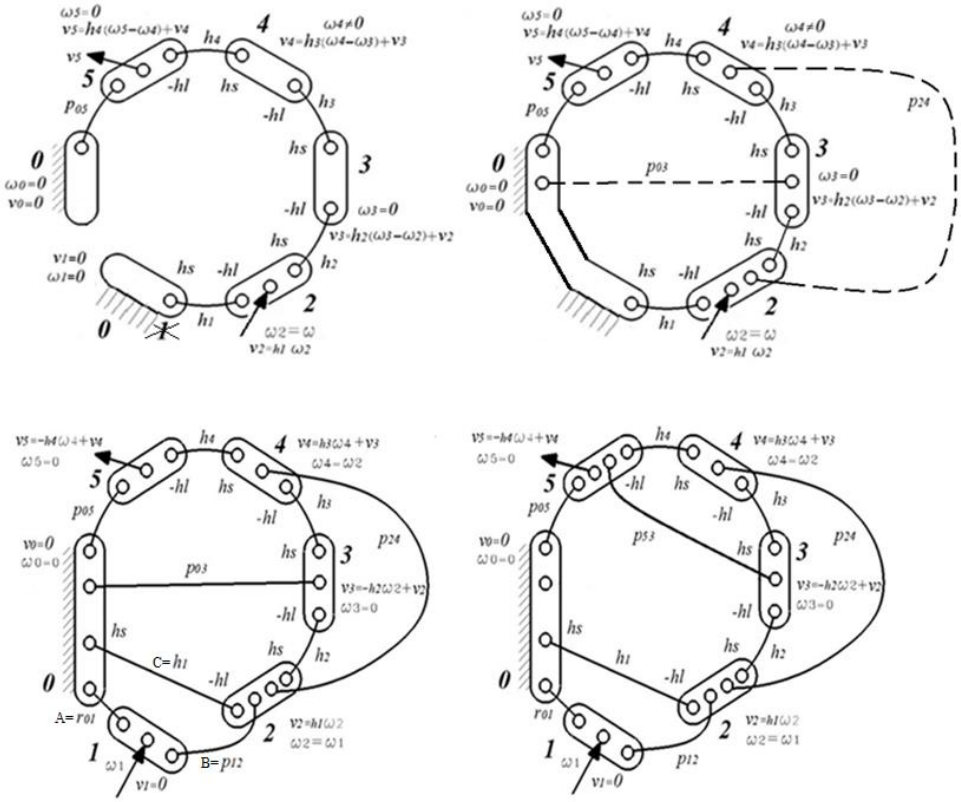


Рис. 1.7

Чтобы получить требуемые соотношения угловых скоростей звеньев ($\omega_2 = \omega_4 \neq 0$ и $\omega_3 = 0$), необходимо связать звено 3 со стойкой, а звено 4 с звеном 2. Требуемые связи показаны пунктиром на схеме справа в верхней части рис. 1.7. Звенья 2, 3, 4, 5 совершают поступательные перемещения друг относительно друга и относительно стойки, поэтому любые попарные

связи между ними, ограничивающие их относительные вращательные движения, должны допускать поступательное перемещения. Эти связи реализуются поступательными кинематическими парами. Для указанных звеньев это p_{03} и p_{24}. Для полученного варианта механизма формула для определения скорости выходного звена $v_5 = -h_4\omega_4 + h_3\omega_4 - h_2\omega_2 + h_1\omega_2$ получается из (1.6) при $\omega_1 = \omega_3 = 0$. Если $\omega_2 = \omega_4 = \omega$, шаги резьбы на всех звеньях одинаковы, а направления резьбы с четными и нечетными номерами противоположны, то скорость звена 5: $v_5 = -4h_1\omega$. Полученный результат показывает, что в этом случае все четыре винтовые пары работают одновременно. Полное перемещение выходного звена 5 обеспечивают поступательные перемещения звеньев 2, 3, 4 и 5.

Звено 2 совершает винтовое движение, а двигатель вращательное. В соответствии с таблицей 1.3 такое преобразование входного (вращательного) движения в выходное (винтовое) можно осуществить механизмами с номерами 5 и 6. Выбираем механизм с номером 6 так как он содержит только одну винтовую пару (вариант с номером 5 тоже возможен). На основании этого в схему механизма добавляем входное звено 1, связанное вращательной кинематической парой r_{01} со стойкой и поступательной p_{12} с звеном 2. Схема приведена слева внизу на рис. 1.7. Возможен второй вариант фиксации звена 3 от вращения - соединение его поступательной кинематической парой p_{53} с звеном 5. Вариант схемы приведен справа внизу на рис. 1.7.

На рис. 1.8 показан возможный вариант конструкции, реализующей первый вариант структурной схемы модернизированного механизма. С учетом значительных относительных поступательных перемещений требуемые связи между звеньями 2 и 4, а также 3 и 0 реализуются с помощью дополнительных звеньев 6 и 7 через поступательные кинематические пары.

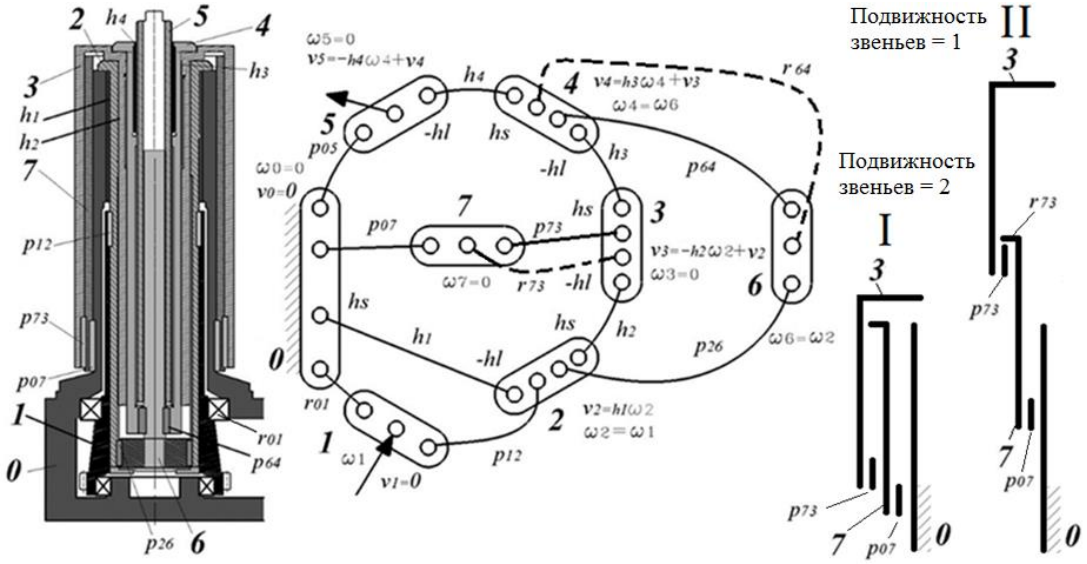


Рис. 1.8

Второй способ модернизации прототипа с целью уменьшения числа подвижностей заключается в разделении каждого из звеньев, совершающих винтовое движение, на два звена: винт и гайку. Винты совершают поступательное движение, гайки – вращательное со скорость равной ω_1. В модернизированном механизме будет на три звена больше, а подвижность его равна единице. Найдем необходимое число связей в новом варианте механизма: $n_n = 5$, $p_{1n} = 6$, $w_n = 4$. $n_и = 8$, $w_и = 1$, а $\Delta w = 3$, $\Delta n = -3$ и по (1.5) получим $p_{1u} = p_{1n} + \Delta w - 2\Delta n = 6 + 3 - 2 \cdot (-3) = 15$. Структурная модель механизма и его конструктивная схема приведены на рис. 1.9. Винты дополнительно попарно связаны тремя поступательными кинематическими парами. И гайки тоже. Винт и гайка каждого разделенного двупарного звена (а их три) связаны вращательными кинематическими парами.

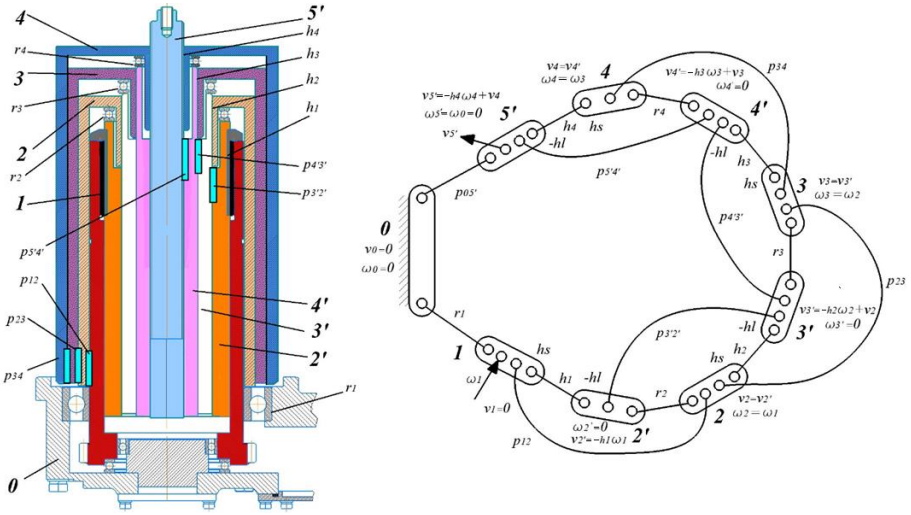


Рис. 1.9

Выводы

1. Узел сопряжения - базовое конструкторское понятие. Узлы сопряжения могут быть применены в структурных моделях на любом уровне разукрупнения изделия.

2. Матрицы подвижностей и структурные уравнения позволяют определить принципы действия механизма и их возможные модификации, а также минимальное число СЧ и виды их соединений.

3. При совместном использовании узлы сопряжения и матрицы подвижностей позволяют сформировать геометрические элементы, являющиеся главной составляющей конструкции СЧ [8].

4. Структурная модель, учитывающая узлы сопряжения, трансформируется в более простую путем слияния вершин, соответствующих узлам сопряжения одной СЧ, в одну вершину, представляющую в модели

данную СЧ. Это позволяет применять, например, при поиске вариантов процессов сборки уже разработанные методы [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Базров Б.М. Описание изделия структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференция, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 35-40. – EDN ESSQGW.

[2] Третьяков В.М. Матричный метод структурного анализа и синтеза механизмов // Современное машиностроение: Наука и образование. 2022. №11. С. 137- 150.

[3] Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 томах. Т.III. Рычажно-кулачковые, … . – 2-е изд., переработанное. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с.

[4] Третьяков В. М. Применение узлов сопряжения при проектировании изделий / В.М. Третьяков // Современное машиностроение: Наука и образование. - 2014.- №4. - С. 443- 453. EDN SMNKLZ.

[5] Третьяков В.М. Способ моделирования многокомпонентных изделий в компьютерных системах двух- и трехмерного проектирования. Патент на изобретение №2622211 заявитель и патентообладатель АО «ВНИИ «Сигнал» - №2014125774; заявл. 25.06.2014; опубл. 13.06.2017, Бюл. №17.

[6] Смелягин А.И. Структура механизмов и машин: Учеб. Пособие: - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. -308 с.

[7] Гнездилов В.К., Дворников Л.Т. Анализ полного многообразия пространственных винтовых механизмов // Международный журнал экспериментального образования. 2010. №8. С.141-142.

[8] Третьяков В.М. Формирование простых кинематических пар на основе узла сопряжения «точка» // Теория механизмов и машин. 2015, №2, том 13, С.46-61.

[9] Божко, А. Н. Оптимизация стратегии геометрического анализа в автоматизированных системах проектирования / А. Н. Божко, В. Э. Ливанцов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 825-840. – DOI 10.20537/2076-7633-2024-16-4-825-840. – EDN BOZFJW.

V.M. Tretyakov

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. PART 1. DEFINITION OF THE PRINCIPLE OF OPERATION

V.A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy, Russia

Abstract

The manufacturability and operational efficiency of products depend on the perfection of their designs. The design is largely determined by the design methods. To solve the design problems, three main tools are offered: mobility matrices, coupling nodes and gaps between the components of the product. According to the author, these tools will allow us to get closer to solving the problem of formalizing the process of "inventing" constructions. The application of the proposed tools is illustrated by the example of the development of the principles of operation of screw mechanisms.

Keywords: construction, coupling node, mobility matrix, structural model, geometric element, fragment of the geometric body of the component, model of the gap between the components.

REFERENCES

[1] Bazrov B.M. Description of the product by a structured set of modules / B.M. Bazrov, M.L. Heifetz // Innovations in mechanical engineering: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, November 26-29, 2019 / Edited by V.Y. Blumenstein. - Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2019. - pp. 35-40. - EDN ESSQGW. (rus.).

[2] Tretyakov, V.M. Matrix method of structural analysis and synthesis of mechanisms (in Russian) // Modern Engineering: Science and Education. 2022. №11. pp. 137- 150. (rus.).

[3] Artobolevskiy I.I. Mechanisms in modern engineering: Reference manual. In 7 volumes. T.III. Lever-cam, ... - 2nd edition, revised. - Moscow: Nauka. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature, 1979. - 416 p. (rus.).

[4] Tretyakov, V. M. Application of mating nodes in product design / V. M. Tretyakov // Modern Engineering: Science and Education. -2014.- №4. - pp. 443- 453. EDN SMNKLZ. (rus.).

[5] Tretiakov V.M. Method of modeling multi-component products in computer systems of two- and three-dimensional design. Patent for invention №2622211 applicant and patentee JSC “VNII ‘Signal’ - №2014125774; applied. 25.06.2014; published 13.06.2017, Bulletin No. 17. (rus.).

[6] Smelyagin A.I. Structure of mechanisms and machines: Textbook: - Novosibirsk: Izd-v. NSTU, 2002. 308 p. (rus.).
[7] Gnezdilov, V.K.; Dvornikov, L.T. Analysis of the complete variety of spatial screw mechanisms // International Journal of Experimental Education. 2010. №8. pp. 141-142. (rus.).
[8] Tretyakov, V.M. Formation of the simple kinematic pairs on the basis of the conjugation node “point” // Theory of mechanisms and machines. 2015, No. 2, Vol. 13, pp. 46-61. (rus.).
[9] Bozhko, A. N. Optimization of the geometrical analysis strategy in the automated design systems / A. N. Bozhko, V. E. Livantsov // Computer research and modeling. - 2024. - T. 16, № 4. - pp. 825-840. - DOI 10.20537/2076-7633-2024-16-4-825-840. - EDN BOZFJW. (rus.).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.81
doi:10.18720/SPBPU/2/id-142

В. М. Третьяков

КОНСТРУИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. ПОСТРОЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ



Владимир Михайлович Третьяков, Ковровская государственная технологическая академия имени Дегтярева, Россия, г. Ковров
Тел.: (49232) 4-20-33, E-mail: tretykov.kovrov@list.ru

Аннотация

Для решения задач конструирования предлагаются три инструмента: матрицы подвижностей, узлы сопряжения и модели промежутков между составными частями изделия. По мнению автора, эти инструменты позволят формализовать решение некоторых задач процесса конструирования. Применение предложенных инструментов иллюстрируется на примере разработки конструкций трехзвенных винтовых механизмов.

Ключевые слова: конструирование, узел сопряжения, структурная модель, геометрический элемент составной части, фрагмент геометрического тела составной части, модель промежутка между составными частями.

Введение

Профессор Л.В. Лось считает, что совершенство структур машин и приборов имеет преимущественное значение для технологичности и в значительной мере предопределяется методами конструирования [1]. Появление автоматизированных систем проектирования не снижает актуальности исследований по формализации описания конструкций, что способствует расширению применения САПР. Методы конструирования отстают в своем развитии от успехов электроники и вычислительной техники. Причиной отставания Л.В. Лось считает «отсутствие общей теории структуры конструкций, способной объединить в строгую систему научные

и прикладные результаты, дать эффективные методы получения изделий с заданными свойствами» [1]. Для преодоления отставания он предложил аксиоматическую теорию структуры изделий, основанную на сформированной им системе аксиом. Однако из автореферата его диссертации не понятно позволяет ли предложенная система аксиом разрабатывать конструкции деталей. Подавляющее большинство терминов, используемых в аксиомах, не относятся к понятиям, определяющим геометрию конструкции. Содержание термина, который может быть отнесен к геометрии изделий, - «первичный элемент» в автореферате, не раскрыто.

В диссертации И. А. Баркова [2] предложено использовать для создания интеллектуальных САПР декларативной конструкторской семантики. Метод семантического конструирования предполагает, что при синтезе конструкции «основной операцией является сопоставление конструкторскому имени n, обозначающему некоторый объект, набора свойств и особенностей. Носителем свойств и особенностей является конструкторское понятие» [3]. Объем используемых конструкторских понятий определяет общность построенных на этой основе конструкторских теорий.

Принципы, общие правила и методика конструирования рассмотрены в [4]. В ней, с одной стороны, даны самые общие положения теории конструирования, а с другой, приведено множество примеров конструктивных решений из разных отраслей машиностроения. Однако, не раскрыта сущность процесса «придумывания» конструкции. Не показано как решается главная задача конструктора [5] — «придумать» конструкцию.

По мнению автора данной работы, «придумывание» конструкции осуществляется с помощью трех основных инструментов: матриц подвижностей, узлов сопряжения и моделей промежутков между составными частями изделия. Они являются самыми общими понятиями, отражающими то что присуще любым конструкциям. Эти инструменты позволят приблизиться к решению задачи формализации процесса конструирования.

Результаты

Выбор принципа действия механизма

В качестве иллюстрации процесса конструирования решим задачу разработки механизма, преобразующего винтовое движение в винтовое. Его структурная схема показана на рис. 2.1. СЧ его далее называем звеньями.

Кинематические характеристики зададим требуемым поступательным перемещением второго звена $S_2 = H$, а также передаточным отношением в

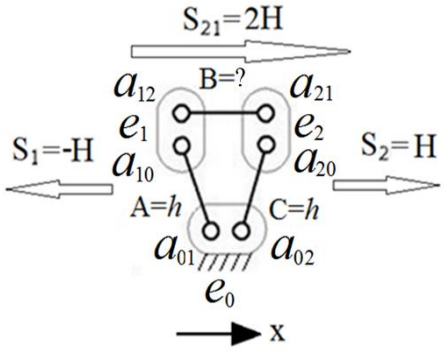


Рис. 2.1

виде описания составляющих вращательного $u_\varphi = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 2$ и поступательного движения $u_S = \frac{S_1}{S_2} = -1$.

Для определения принципа действия механизма обратимся к таблице 1.3 из статьи «Конструирование изделий машиностроения. Часть 1. Определение принципа действия». Механизм, преобразующий винтовое движение в винтовое, должен иметь, как минимум, две винтовые кинематические пары, образованные стойкой. В соответствии с таблицей винтовое движение в винтовое преобразуют механизмы под номерами 1, 2 и 4. С учетом выражений, приведенных в таблице 1.3, получим уравнения, позволяющие определить требуемые параметры резьбы звеньев винтовых пар. Для механизма под номером 1 с тремя винтовыми парами:

$$u_\varphi = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{(h_C - h_B)}{(h_A - h_B)} = 2, \quad u_S = \frac{S_1}{S_2} = \frac{h_A}{h_C}\frac{(h_C - h_B)}{(h_A - h_B)} = -1. \qquad (2.1)$$

Из (2.1) найдем соотношение шагов винтовых пар B и C с A: $h_C = -2h_A$, $h_B = 4h_A$. Таким образом, получаем следующие исходные данные для конструирования: $S_{10} = -H$, $S_{20} = H$, $h_B = 4h_A$, $h_C = -2h_A$, w –длина ГЭ вида hs, которая совпадает с длиной сформировавшего его узла сопряжения. Длина w ГЭ и шаг резьбы h_A выбираются из условия прочности. Относительное перемещение звеньев 1 и 2 механизма:

$$S_{21} = S_{20} - S_{10} = H - (-H) = 2H. \qquad (2.2)$$

С помощью остальных двух механизмов обеспечить заданные кинематические свойства невозможно. Поэтому конструируем изделие звенья которого содержит по два резьбовых геометрических элемента (ГЭ).

Конструкции винтовых механизмов зависят от конструкций их звеньев, поэтому сначала рассмотрим возможные конструкции двупарных звеньев, которые в них используются. Варианты звеньев зависят от примененных кинематических пар и исполнений их ГЭ. Виды применяемых кинематических пар: $\{h, p, r\}$. Исполнения их ГЭ: $\{hs, -hs,\ hl, -hl,\ ps, -ps,\ pl, -pl,\ rs, -rs\}$, где l (длинное), s (короткое) исполнения ГЭ. Шаги и направление резьбы не учитываем, поэтому, например, звено, имеющее *внешнюю* правую резьбу с шагом 2 (ГЭ $-hl$) *и внутреннюю* правую резьбу с шагом 4 мм (ГЭ hs), считаем эквивалентным звену,

имеющему *внешнюю* левую резьбу с шагом 10 (ГЭ $-hl$) и *внутреннюю* правую резьбу с шагом 5 мм (ГЭ hs).

Возможные варианты двупарных звеньев, обусловленные видами кинематических пар и исполнениями (охватывающее или охватываемое, а также l или s) их ГЭ, приведены в таблице 2.1. При ее заполнении принято, что двупарные звенья, отличающиеся только перестановкой ГЭ, идентичны, например, $(hs, hl) = (hl, hs)$ или $(-hs, hl) = (hl, -hs)$.

Таким образом учет вариантов исполнений ГЭ приводит к появлению 42 вариантов двупарных звеньев трехзвенных винтовых механизмов. Если при оценке разнообразия конструкций звеньев учитывать два варианта относительного расположения ГЭ на составной части и соотношения вида $D_{ij} > D_{ik}$ и $D_{ij} < D_{ik}$ их основных геометрических параметров, то, например, возможное разнообразие двупарных звеньев с двумя резьбовыми ГЭ, увеличится с 10 (таблица 2.1) до 32 (рис. 2.2).

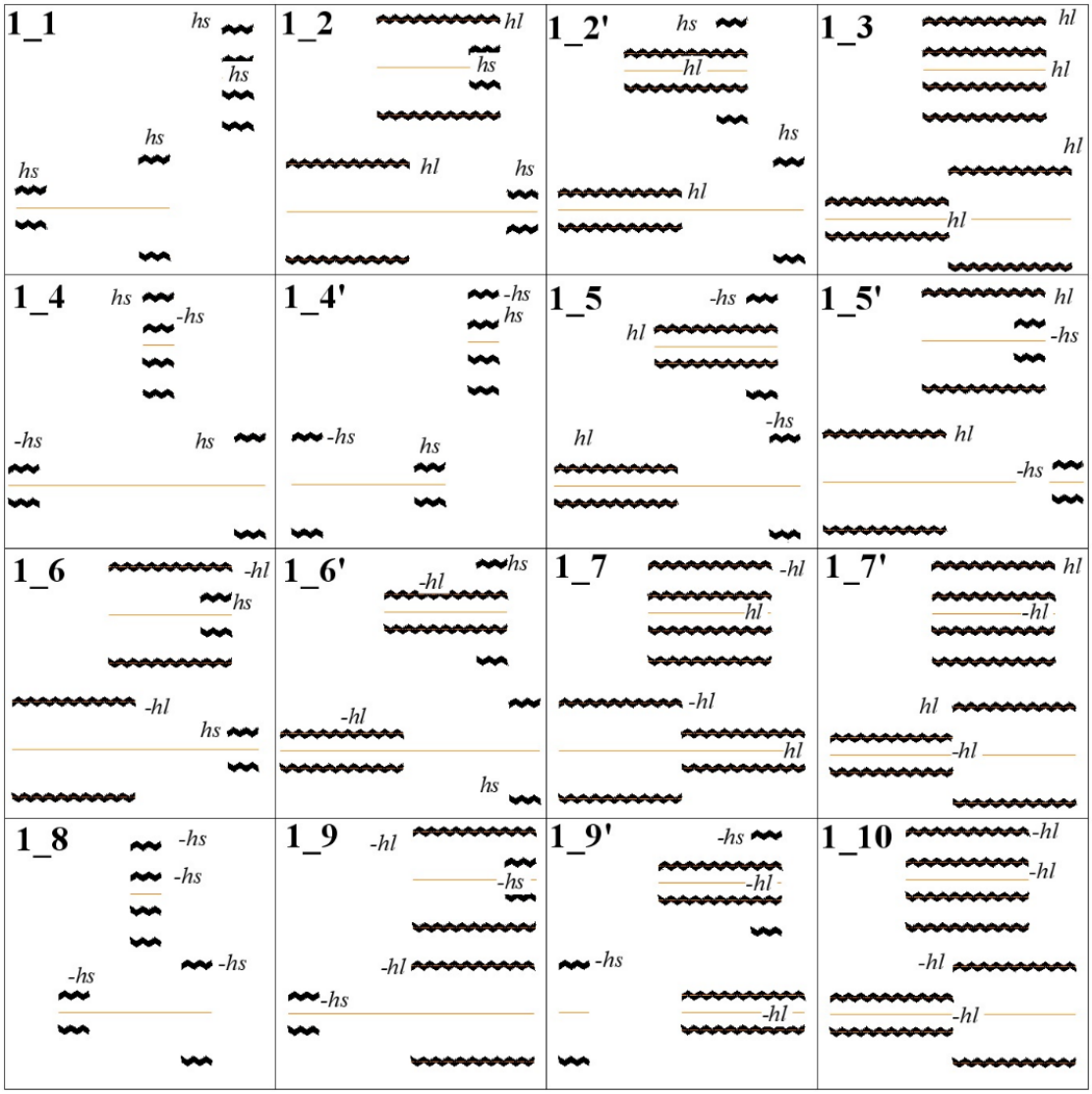


Рис. 2.2

Таблица 2.1. Варианты звеньев механизмов, определяемые исполнениями их ГЭ

Исполнения звена			Исполнения звеньев		
Обозначение звена	Кинематическая пара H_{i1}	Кинематическая пара H_{i2}	Обозначение звена	Кинематическая пара H_{i1}	Кинематическая пара H_{i2}
1	h	h	3	h	r
	+	+		+	+
1_1	hs	hs	3_1	hs	rs
1_2	hs	hl	3_2	hl	rs
1_3	hl	hl		+	-
	+	-	3_3	hs	$-rs$
1_4	hs	$-hs$	3_4	hl	$-rs$
1_5	hl	$-hs$		-	+
1_6	hs	$-hl$	3_5	$-hs$	rs
1_7	hl	$-hl$	3_6	$-hl$	rs
	-	-		-	-
1_8	$-hs$	$-hs$	3_7	$-hs$	$-rs$
1_9	$-hs$	$-hl$	3_8	$-hl$	$-rs$
1_10	$-hl$	$-hl$	4	p	r
2	h	p		+	+
	+	+	4_1	ps	rs
2_1	hs	ps	4_2	pl	rs
2_2	hs	pl		+	-
2_3	hl	ps	4_3	ps	$-rs$
2_4	hl	pl	4_4	pl	$-rs$
	+	-		-	+
2_5	hs	$-ps$	4_5	$-ps$	rs
2_6	hl	$-ps$	4_6	$-pl$	rs
2_7	hs	$-pl$		-	-
2_8	hl	$-pl$	4_7	$-ps$	$-rs$
	-	+	4_8	$-pl$	$-rs$
2_9	$-hs$	ps			
2_10	$-hl$	ps			
2_11	$-hs$	pl			
2_12	$-hl$	pl			
	-	-			
2_13	$-hs$	$-ps$			
2_14	$-hs$	$-pl$			
2_15	$-hl$	$-ps$			
2_16	$-hl$	$-pl$			

В таблице 2.2 показаны возможные соединения ГЭ, обеспечивающие требуемое функционирование механизма. В ней единицы показывают соединения вида: $\{hs, -hl\}$, $\{-hs, hl\}$, $\{hl, -hl\}$. Пара ГЭ $\{hs, -hs\}$ может

быть соединена, но не обеспечивает требуемое перемещение звеньев. Им в таблице 2.2 соответствуют ноли. Это же относится и к ГЭ поступательных кинематических пар.

Таблица 2.2

	ГЭ	*hs*	*- hs*	*hl*	*- hl*	*ps*	*- ps*	*pl*	*- pl*	*rs*	*- rs*
ГЭ	Узлы	1	-1	1	-1	2	-2	2	-2	3	-3
hs	1	0	0	0	1						
- hs	-1	0	0	1	0						
hl	1	0	1	0	1						
- hl	-1	1	0	1	0						
ps	2					0	0	0	1		
- ps	-2					0	0	1	0		
pl	2					0	1	0	1		
- pl	-2					1	0	1	0		
rs	3									0	1
- rs	-3									1	0

Разработка конструкции

Для определения возможных вариантов пар подвижных звеньев проектируемого механизма сформируем матрицу смежности их ГЭ по типу таблицы 2.2. Единицы матрицы показывают звенья и их ГЭ, образующие винтовую пару B механизма. Матрица смежности ГЭ приведена на рис. 2.3.

Варианты звеньев			1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		e_2
	ГЭ		hs	hs	hs	hl	hl	hl	hs	¬hs	hl	¬hs	hs	¬hl	hl	¬hl	¬hs	¬hs	¬hs	¬hl	¬hl	¬hl	
		Узлы	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	Сум.
1	hs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	4
	hs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	hs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	4
	hl	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	8
3	hl	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	8
	hl	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	hs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	4
	¬hs	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
5	hl	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	7
	¬hs	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
6	hs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	4
	¬hl	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
7	hl	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	5
	¬hl	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	¬hs	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	¬hs	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	¬hs	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	¬hl	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	¬hl	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	¬hl	-1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
e_1																					Сум.		48

Рис. 2.3

В проектируемом механизме, применяются только винтовые кинематические пары, поэтому из таблицы 2.1 использованы исполнения

двупарных звеньев под номерами 1_1 – 1_10 (далее на рис. 2.2 и в табл. 2.3 просто 1 – 10). В матрице смежности не учитываются соединения вида $(hs; -hs)$. Кроме того, учитывается только половина единиц, соответствующих звеньям 1, 3, 8 и 10 поскольку у каждого из них оба ГЭ одинаковы. Например, для строк звена 1 все возможные единицы второй строки заменены нулями. Для соединения вида $(hs; -hl)$ звеньев 1 и 10 вторая единица первой строки также заменена нулем. В результате суммарное количество пар, соединяемых ГЭ звеньев, будет равно 48, а общая сумма единиц равна 96.

Формируем таблицу 2.3 возможных вариантов исполнений звеньев механизма. Сначала на основе данных, расположенных выше главной диагонали матрицы смежности ГЭ (рис. 2.3), заполняем столбцы, показывающие исполнения геометрических элементов подвижных звеньев e_1 и e_2. Каждая единица матрицы показывает пару подвижных звеньев, которые соединяются своими ГЭ, образуя винтовую пару B. Будем считать, что в качестве звена e_1 используется звено, номер которого соответствует строкам матрицы смежности, а звено, номер которого соответствует столбцам является звеном e_2 (по рис. 2.1). Исполнения ГЭ, соответствующие единицам в ячейках матрицы, заносятся в два столбца таблицы 2.3, относящиеся к кинематической паре B. ГЭ, обозначающий строку матрицы смежности, заносится в столбец таблицы, обозначенный a_{12}. ГЭ, обозначающий столбец матрицы, заносится в столбец a_{21}. Количество строк таблицы 2.3, содержащих один и тот же ГЭ, размещенный в столбце a_{12}, равно числу единиц, расположенных в соответствующей ему строке матрицы смежности. Столбец a_{10} заполняется обозначением ГЭ, приведенным в строке матрицы смежности для рассматриваемого звена, не использованным для заполнения столбца a_{12} таблицы. Столбец a_{20} заполняется обозначением ГЭ, приведенным в столбце матрицы смежности для рассматриваемого звена, не использованным для заполнения столбца a_{21}. ГЭ, выбранные в соответствии с данными матрицы смежности (рис. 2.3), в таблице 2.3 выделены цветом. В столбцах a_{10} и a_{21} таблицы 2.3 перед обозначениями ГЭ расположены номера звеньев, которым они принадлежат.

Используя таблицу 2.2 заполняем столбцы, относящиеся к узлам сопряжения a_{01} и a_{02} звена 0. Они образуют кинематические пары с звеньями 1 и 2. Например, в строке 1 таблицы 2.3 для a_{10} используется ГЭ вида hs. По таблице 2.2 находим, что ГЭ такого вида соединяется с ГЭ вида $-hl$ (им соответствует ячейка с единицей). Обозначение последнего заносим в ячейку строки 1 расположенную в столбце a_{01}.

С точки зрения изготовления внутренняя резьба является наиболее сложным элементом винтовой кинематической пары. Изготовление внутренней резьбы большой протяженности hl еще сложнее. Поэтому первое

требование к вариантам наборов звеньев конструируемого механизма - внутренняя резьба имеет минимальную длину. Охватывающее конструктивное исполнение ее ГЭ вида hs используется во всех трех винтовых кинематических парах. Таких наборов звеньев всего четыре в строках с номерами 1, 4, 39 и 42. Для них выделены цветом все ячейки соответствующих строк. Второе требование к конструкции данного механизма - на стойке e_0 не должно быть ГЭ с охватываемым исполнением. Этому ограничению соответствует один набор звеньев с номером 42. В итоге получаем для проектируемого механизма звенья с исполнениями ГЭ: $e_0 = \sigma_0^0(hs, hs)$, $e_1 = \sigma_1^0(-hl, hs)$, $e_2 = \sigma_2^0(-hl, -hl)$.

Таблица 2.3. Варианты исполнений ГЭ звеньев в механизме

№ п/п	Звено 0 (e_0)		Звено 1 (e_1)		Звено 2 (e_2)		Звено 0 (e_0)	
		Кинем. пара A		Кинем. пара B		Кинемат. пара C		
	a_{02}	a_{01}	a_{10}	a_{12}	a_{21}	a_{20}	a_{02}	a_{01}
1		$-hl$	1 hs	hs	6 $-hl$	hs	$-hl$	
2		$-hl$	1 hs	hs	7 $-hl$	hl	$-hs \vee -hl$	
3		$-hl$	1 hs	hs	9 $-hl$	$-hs$	hl	
4		$-hl$	1 hs	hs	10 $-hl$	$-hl$	hs	
5		$-hs \vee -hl$	2 hl	hs	6 $-hl$	hs	$-hl$	
…		…	…	…	…	…	…	
28		hl	4 $-hs$	hs	10 $-hl$	$-hl$	$hs \vee hl$	
…		…	…	…	…	…	…	
39		hs	6 $-hl$	hs	6 $-hl$	hs	$-hl$	
40		$hs \vee hl$	6 $-hl$	hs	7 $-hl$	hl	$-hs \vee -hl$	
41		$hs \vee hl$	6 $-hl$	hs	9 $-hl$	$-hs$	hl	
42		hs	6 $-hl$	hs	10 $-hl$	$-hl$	hs	
43		$-hl$	6 hs	$-hl$	7 hl	$-hl$	$hs \vee hl$	
…		…	…	…	…	…	…	
48		$hs \vee hl$	7 $-hl$	hl	10 $-hl$	$-hl$	$hs \vee hl$	

Пусть имеются модели ГЭ, фрагментов геометрических тел винтовых звеньев и промежутков между ними (рис. 2.4, *а*). Первое, что необходимо сделать – откорректировать эти модели по размерам для соответствия действующим силам и перемещениям звеньев: размер w для ГЭ $\{hs, -hs\}$, толщина фрагментов геометрических тел и величина промежутков, длина ГЭ вида $\{hl, -hl\}$. На рис. 2.4, *б* показаны: структурная схема механизма, откорректированные модели фрагментов геометрических тел звеньев и образованные ими кинематические пары, с размерами, обеспечивающими требуемые кинематические возможности механизма. Оба фрагмента

геометрического тела одного звена имеют одинаковую штриховку (заливку), позволяющую отнести его к соответствующему звену. Их штриховка отличается от штриховки фрагментов остальных звеньев.

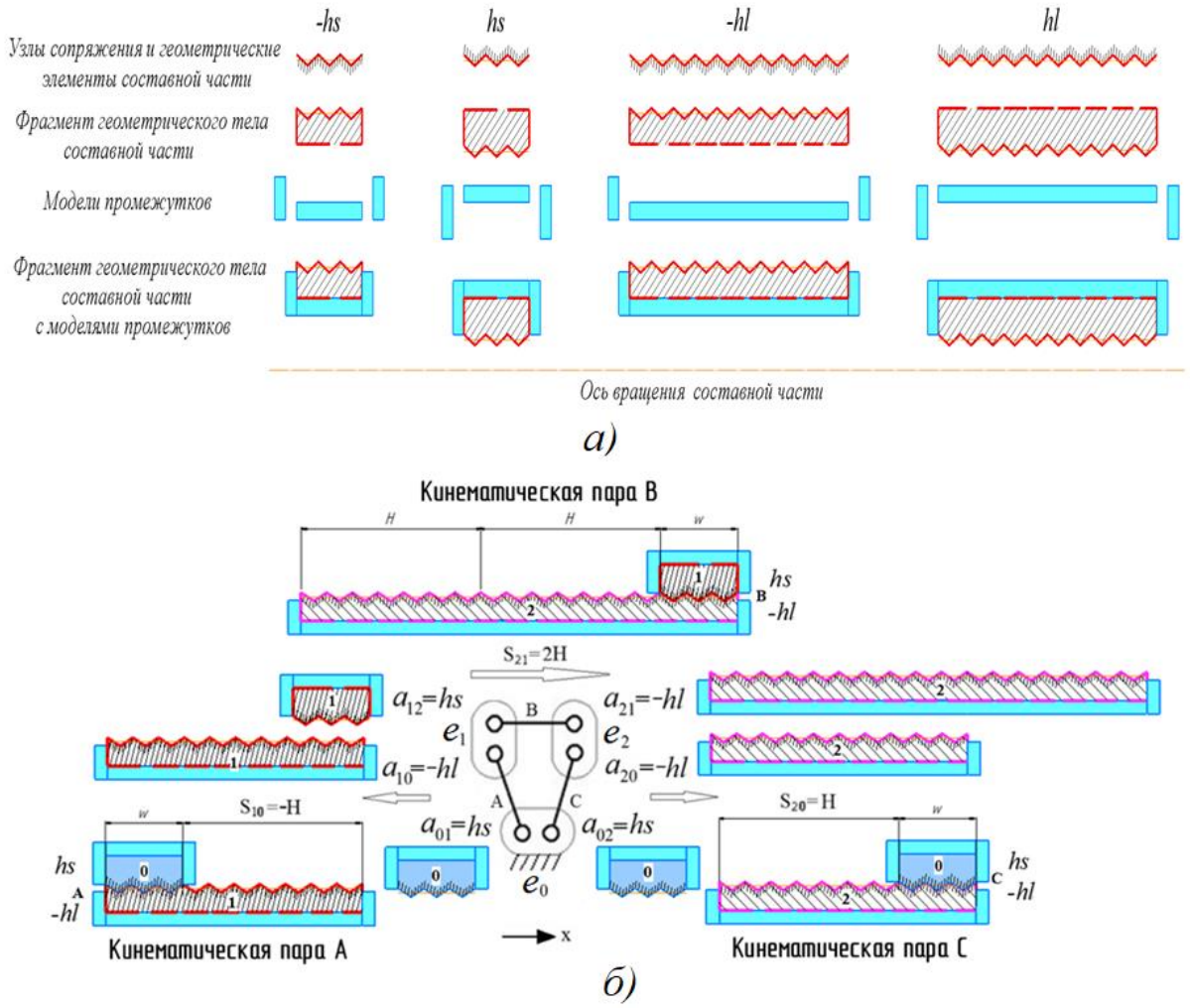


Рис. 2.4.

Определяем варианты конструкции механизма.

Первый шаг - объединение двух фрагментов геометрического тела звена в единое целое. Начинать можно с фрагментов любого из трех звеньев. На рис. 2.5 приведен пример объединения фрагментов стойки e_0, образующих кинематические пары A и C. ГЭ звена $e_0 = \sigma_0^0(hs, hs)$. Для каждой кинематической пары показано направление относительного движения одного из образующих ее звеньев. Варианты размещения ГЭ на звене представлены в ячейке 1.1 на рис. 2.2. Три возможных конструкции звена e_0 (их безусловно больше) приведены в левой части рис. 2.5. После объединения фрагментов звена e_0 связанные с ним звенья должны иметь возможность перемещаться в требуемых направлениях на необходимое расстояние. Габаритные размеры конструкции должны быть минимальными. Удаляются модели промежутков

фрагментов стойки, попавшие внутрь контура (показан штриховой линией основной толщины) формируемого звена e_0. На рис. 2.5, как и на рис. 2.4, показаны фрагменты звеньев, расположенные выше оси вращения.

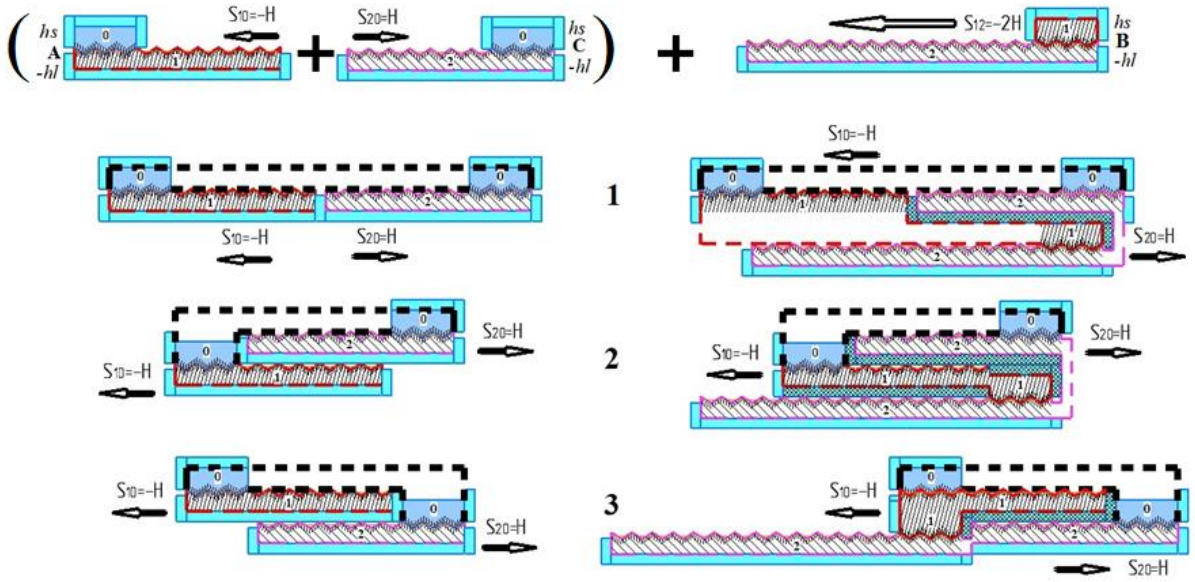


Рис. 2.5

Второй шаг добавление к полученной конструкции тех фрагментов, которые образуют третью кинематическую пару B. После добавления указанных фрагментов подвижные звенья механизма должны иметь возможность перемещаться в требуемых направлениях на заданные расстояния, а габаритные размеры механизма должны быть минимально возможными. Три варианта конструкции механизма расположены в правой части рисунка. Если повторить те же действия, но начать с объединения звена 1, то будут получены несколько вариантов конструкции, некоторые из которых являются повторением конструкций 2 и 3 на рис. 2.5.

Возможен более наглядный способ перебора вариантов. Для этого в моделях кинематических пар, образованных звеном e_0, подвижные звенья разместим в двух крайних положениях (рис. 2.6). Ищем наиболее компактную конструкция. Расположение ГЭ рядом значительно увеличивает длину механизма. Поэтому сразу переходим к второму варианту. Он оказывается наиболее удачным. На рис. 2.6 последовательно показан процесс формирования звеньев.

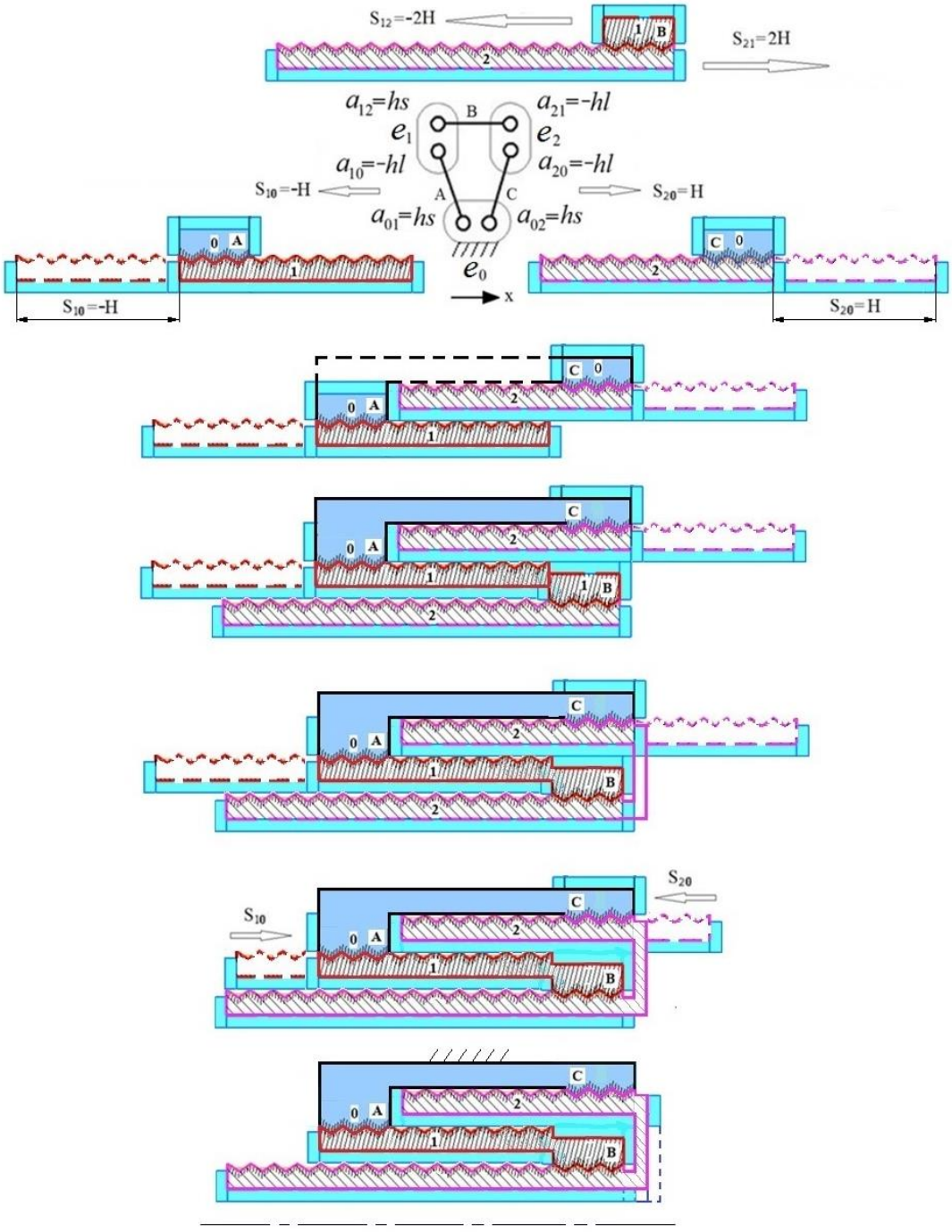


Рис. 2.6

На рис. 2.7 подробно показан процесс формирования промежутков подвижных звеньев из промежутков фрагментов их геометрических тел. На рис. 2.8 приведены конструктивные схемы и структурные модели составных частей механизма, включающих звенья и их промежутки. Последние представлены как квази-СЧ со своими узлами сопряжения, которыми они «взаимодействуют» со звеньями и между собой. Промежутки обозначены

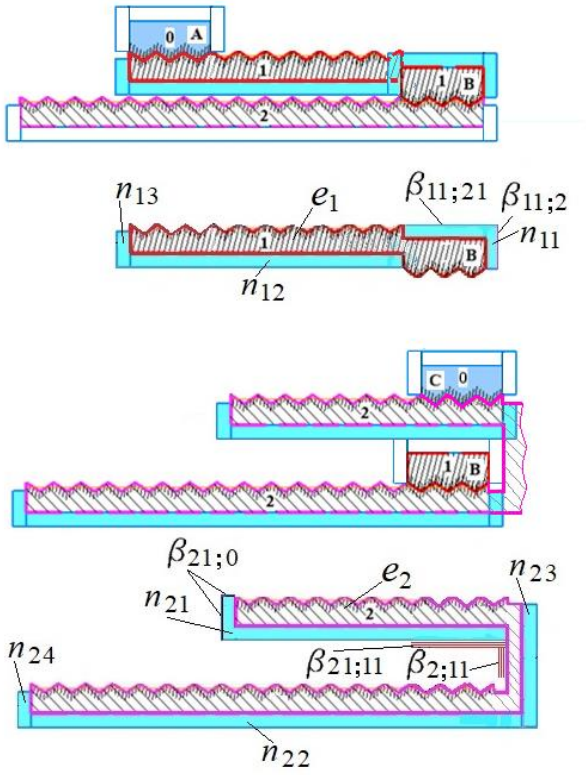


Рис. 2.7

n_{ij}, где i – номер СЧ, которой принадлежит данный промежуток; j – номер промежутка СЧ в составе ее промежутков. Узлы сопряжения промежутков это квази-узлы сопряжения. Но поскольку модели промежутков являются геометрическими телами, то и их узлы сопряжения - это тоже совокупности реальных геометрических объектов.

Узлы сопряжения СЧ, взаимодействующие с промежутками, и узлы самих промежутков обозначены $\beta_{u;к}$, где u – номер СЧ или модели промежутка, которой принадлежит данный узел; k - номер СЧ или модели промежутка, с которой сопрягается узел, или номер узла в составе узлов модели промежутка, которой он принадлежит. В таблице 2.4 представлены СЧ, промежутки и их узлы сопряжения. Цветом выделены пары взаимодействующих узлов сопряжения вида $\beta_{u;к}$ - $\beta_{к;u}$.

Таблица 2.4. СЧ их промежутки и узлы сопряжения

e_0	e_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	e_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}
a_{01}	a_{10}								
	a_{12}				a_{21}				
a_{02}	$\beta_{1;11}$	$\beta_{11;1}$			a_{20}				
$\beta_{0;21}$	$\beta_{1;12}$	$\beta_{11;2}$	$\beta_{12;1}$		$\beta_{2;11}$	$\beta_{21;0}$	$\beta_{22;23}$	$\beta_{23;22}$	
	$\beta_{1;13}$	$\beta_{11;21}$		$\beta_{13;1}$		$\beta_{21;11}$	$\beta_{22;24}$		$\beta_{24;22}$
			$\beta_{12;13}$	$\beta_{13;12}$	$\beta_{2;21}$	$\beta_{21;2}$			
					$\beta_{2;22}$		$\beta_{22;2}$		
					$\beta_{2;23}$			$\beta_{23;2}$	
					$\beta_{2;24}$				$\beta_{24;2}$

Если вместо номера k указана звездочка «*» - это значит, что данный фрагмент промежутка не используется в качестве узла сопряжения для

«соединения» с какой-либо СЧ или промежутком. Например, он «соприкасается» с ГЭ, который сформирован не им. На рисунке 2.8 такие «узлы» показаны в составе конструкций промежутков. На структурных схемах их нет чтобы не усложнять восприятие.

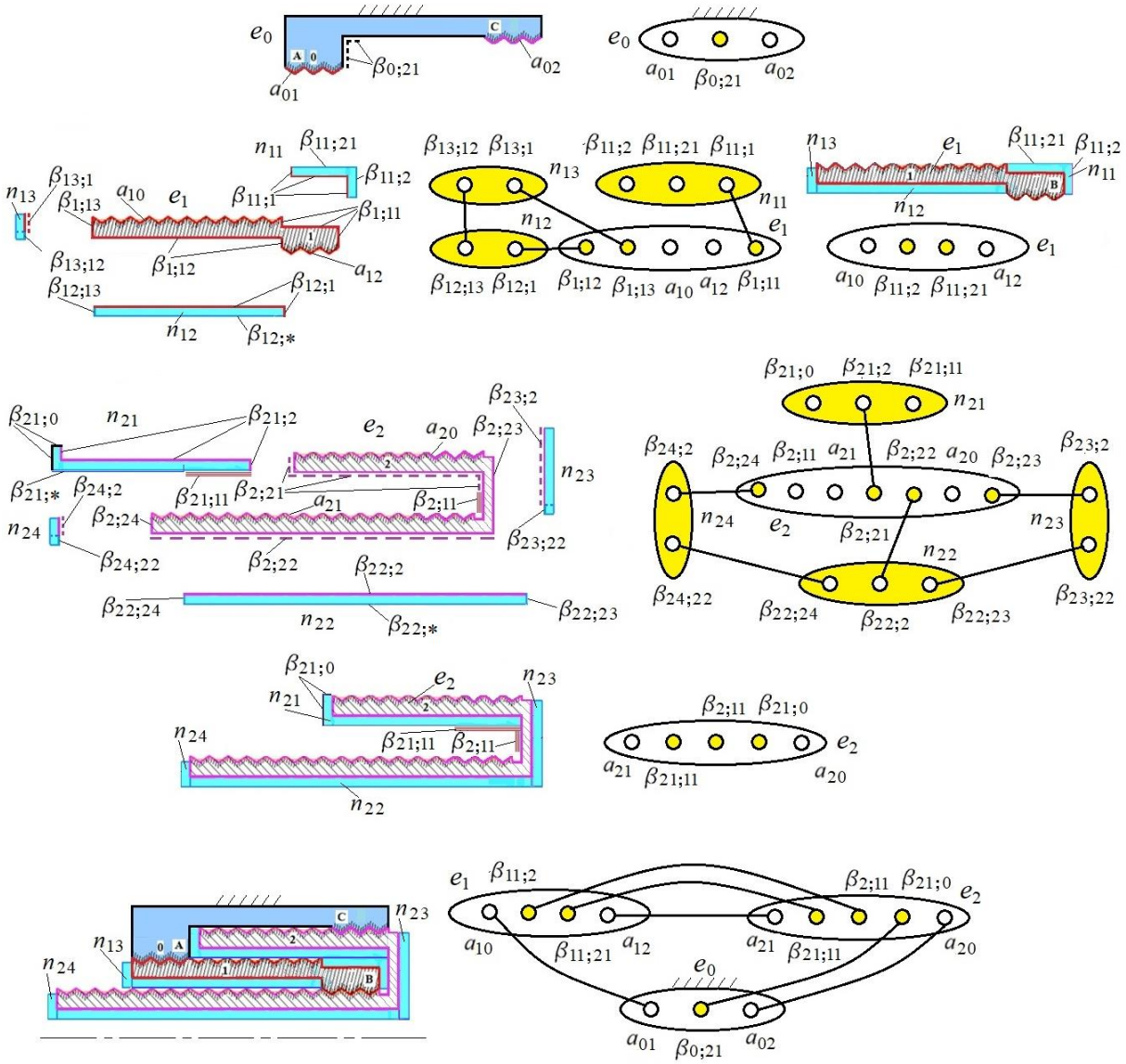


Рис. 2.8

Примем в качестве основной конструктивную схему 2, приведенную на рис. 2.5, рис. 2.6 и рис. 2.8. На рис. 2.9 приведены результаты формирования конструкции по схеме 2 и конструкция механизма с вариантами звеньев $e_0 = \sigma_0^0(hl, hl)$, $e_0 = \sigma_0^0(hs, hl)$, $e_1 = \sigma_1^0(-hl, -hl)$, $e_2 = \sigma_2^0(-hs, hs)$ по схеме, приведенной в [6]. Она формируется из тех же фрагментов геометрических тел звеньев с теми же размерами, что и конструкции на рис. 2.5. Такой вариант набора звеньев приведен в таблице 2.3 под номером 28. Первое звено в таблице 2.3 соответствует второму звену на рис. 2.9, а второе

звено в таблице - первому в звену на рисунке. При одинаковых кинематических свойствах конструкции существенно отличаются.

Обсуждение и выводы

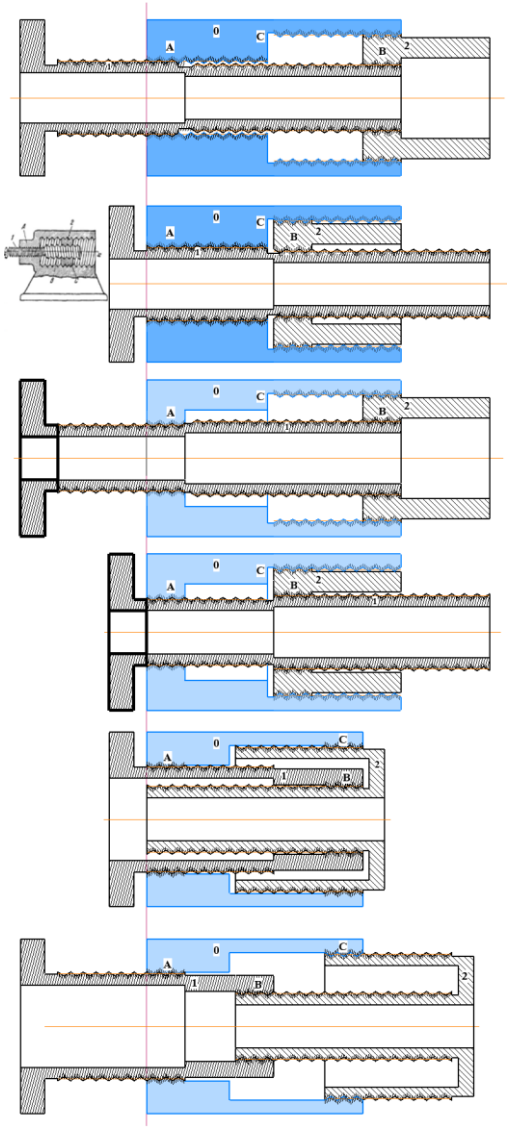


Рис. 2.9

Решив задачу конструирования изделия, мы получаем модель, описывающую его геометрическую форму и размеры. Распространив понятие *узел сопряжения* на сформированную конструкцию можно построить ее структурную модель, считая ее компонентами отдельные поверхности (см. рис. 2 в [7]). Узлами сопряжения таких компонентов являются чисто геометрические объекты - линии, которые образуются при пересечении поверхностей. Структурные модели данного типа является моделями второго уровня по сравнению с моделями первого уровня, в которых узлы сопряжения являются не только геометрическими, но и физическими объектами, передающими потоки энергии, вещества и сигналов. Имея модели второго уровня можно перейти к моделям первого уровня, в которых узлы сопряжения (ГЭ) определяются не с точки зрения решения конструкторских задач, а для других целей, например, технологических. В последнем случае это будут «модули поверхностей» [8].

Конструктивный вид полученного винтового механизма (рис. 2.8 – рис. 2.9) показывает, что ГЭ и промежутки полностью определяют основную геометрию конструкций деталей, которая должна уточняться путем учета технологии изготовления и сборки.

1. Совокупность геометрических элементов – главная составляющая конструкции изделия. Узлы сопряжения (ГЭ) могут быть учтены в структурных моделях на любом уровне разукрупнения проектируемого, изготавливаемого, находящегося в эксплуатации или изучаемого объекта: от системы, рассматриваемой как черный ящик, до наличия полной геометрии.

2. Основное назначение моделей промежутков между СЧ - формирование фрагментов конструкции, которые не могут быть определены узлами сопряжения СЧ. Поверхности и их фрагменты моделей промежутков могут использоваться как квази-узлы сопряжения для формирования узлов сопряжения разделяемых ими СЧ.

3. Являясь самыми общими понятиями, отражающими то, что присуще любым конструкциям, предлагаемые инструменты конструирования, по мнению автора, позволят приблизиться к решению задачи формализации процесса «придумывания» конструкции. На рис. 2.9 приведены три варианта конструкции винтовых механизмов с одинаковыми кинематическими характеристиками. Два верхних выполнены по схеме, приведенной в [6]. Схема изображена на рисунке. Конструкция третьего механизма «придумана» с нуля с помощью предложенных инструментов. Процесс «придумывания» приведен в материалах статьи.

4. «Творческому» подходу к формированию фрагментов СЧ и компоновке вариантов конструкций из фрагментов может быть «обучен ИИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Лось Л.В. Теория структуры конструкций технологических машин и приборов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Харьков, 1992.

[2] Барков И.А. Моделирование конструкторской семантики в интеллектуальных САПР. Автреферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ижевск, 2007.

[3] Барков И.А. Формальная система свойств и особенностей изделия // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. №4(36). С.3-9.

[4] Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн.1/ Под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.: ил.

[5] Бобков Н.М. О конструкторской терминологии национальных стандартов // Стандарты и качество. 2012. №9. С. 48-52.

[6] Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 томах. Т.III. Рычажно-кулачковые, … . – 2-е изд., переработанное. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с.

[7] Третьяков В.М. Использование понятия «узел сопряжения» при конструировании изделий машиностроения // Вестник машиностроения, - 2010. №12. С.24 - 30.

[8] Базров Б. М. Структура машиностроительного изделия // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 7. С. 43-48. DOI: https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-43-48 (дата обращения: 17.01.2025).

V.M. Tretyakov

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. PART 2. CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE

V.A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy, Russia

Abstract

To solve the design problems, three tools are offered: mobility matrices, coupling nodes and gaps between the components of the product. According to the author, these tools will allow us to formalize the solution of some tasks of the design process. The application of the proposed tools is illustrated by the example of the design development of three-link screw mechanisms.

Keywords: construction, coupling node, structural model, geometric element, fragment of the geometric body of the component, model of the gap between the components.

REFERENCES

[1] Los' L.V. Teoriya struktury konstrukcij tekhnologicheskikh mashin i priborov. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Khar'kov, 1992.

[2] Barkov I.A. Modelirovanie konstruktorskoj semantiki v intellektual'nykh SAPR. Avtreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Izhevsk, 2007.

[3] Barkov I.A. Formal'naya sistema svojstv i osobennostej izdeliya // Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. №4(36). S.3-9.

[4] Orlov P.I. Osnovy konstruirovaniya: Spravochno-metodicheskoe posobie. V 2-kh kn. Kn.1/ Pod red. P.N. Uchaeva. – Izd. 3-e, ispr. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 560 s.: il.

[5] Bobkov N.M. O konstruktorskoj terminologii nacional'nykh standartov // Standarty i kachestvo. 2012. №9. S. 48-52.

[6] Artobolevskij I.I. Mekhanizmy v sovremennoj tekhnike: Spravochnoe posobie. V 7 tomakh. T.III. Rychazhno-kulachkovye, … . – 2-e izd., pererabotannoe. – M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, 1979.– 416 s.

[7] 25. Tret'yakov V.M. Ispol'zovanie ponyatiya «uzel sopryazheniYA» pri konstruirovanii izdelij mashinostroeniya // Vestnik v mashinostroeniya, - 2010. №12. S.24 - 30.

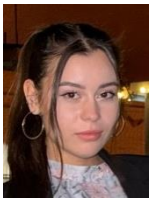
[8] Bazrov B. M. Struktura mashinostroitel'nogo izdeliya // Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii. 2024. №. 7. S. 43-48. DOI: https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-43-48 (data obrashcheniya: 17.01.2025).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 656.073.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id-143

Е.Д. Григорьева[1], В.А. Ушаков[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВ ПО РАЗНОТИПНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВАМ



[1] Елизавета Дмитриевна Григорьева,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (903)098-76-31, E-mail: lizarapne@gmail.com.



[2] Виталий Анатольевич Ушаков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)775-05-30, E-mail: ushakov_va@spbstu.ru.

Аннотация

В работе рассмотрена задача распределения грузов по разнотипным транспортным средствам, решаемая с помощью статической модели и алгоритма. Исследованы изменения показателей распределения грузов в зависимости от имеющихся ресурсов, транспортных средств, а также от изменения количества пунктов доставки и отправки. Обсуждаются перспективы использования статической модели для решения транспортно-логистических задач. Предложены практические рекомендации для оптимального распределения грузов с использованием разнотипных транспортных средств.

Ключевые слова: транспортно-логистическая задача, моделирование, принятие решений, статическая модель, разнотипные транспортные средства, распределение грузов.

Введение

В условиях роста глобализации, цифровизации и усиления конкуренции в логистике повышается спрос на эффективные методы

организации транспортно-логистических процессов. Оптимизация таких процессов позволяет сократить издержки, повысить скорость доставки и минимизировать ресурсные затраты.

Несмотря на существующие методы оптимизации логистических процессов, остается актуальной задача адаптивного распределения грузов при изменяющихся условиях: вариативности парка транспортных средств (ТС), динамики пунктов отправки и доставки, а также ограниченности ресурсов.

Моделирование играет ключевую роль в решении транспортно-логистических задач, поскольку позволяет анализировать сложные системы, прогнозировать их поведение и находить оптимальные решения. Современные исследования в области моделирования логистических процессов охватывают широкий спектр методов, включая линейное программирование [1-3], имитационное моделирование [4-8] и методы многокритериальной оптимизации [9,10]. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов [11-13], как инструмент оценки качества систем, применяется в логистике для сравнения альтернативных решений. Применение методов квалиметрии дает возможность количественно оценивать качество различных вариантов распределения. В сочетании с теорией принятия решений [14-16], обеспечивающей научный подход к выбору наилучшей стратегии, она позволяет формализовать процесс выбора оптимальной стратегии распределения.

В [17] была разработана статическая модель, позволяющая решать задачу оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС.

Целью данной статьи является разработка практических рекомендаций для оптимального распределения грузов с использованием разнотипных транспортных средств.

В статье решается задача исследования изменения показателей распределения грузов в зависимости от имеющихся ресурсов, типов ТС, а также от изменения количества пунктов доставки и отправки.

Методы

При решении задачи оптимального планирования доставки грузов с использованием разнотипных ТС будем предполагать, что нам известны группировки разнотипных ТС, где для каждого конкретного объекта известны: грузоподьемность ТС, объем грузового контейнера ТС, объём бензобака, минимально/максимально возможные значения скорости движения ТС, а также начальный пункт отправки ТС. ТС бывают следующих видов: большое грузовое ТС (например, седельный тягач), среднее грузовое ТС (например, фургон), малое грузовое ТС (например,

грузовой микроавтобус), мини грузовое ТС (например, пикап), микро грузовое ТС (например, ровер).

ТС обозначим (1):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}, \quad (1)$$

где s – количество ТС.

Кроме того, нам известна информация о местоположении склада; пунктов выдачи грузов, промежуточных складов и об адресах, на которые необходимо выполнить доставку «на дом», а также информация о грузах, которые находятся в указанных точках.

Все пункты обозначим, как (2):

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (2)$$

где n – суммарное количество складов, пунктов выдачи грузов, промежуточных складов и адресов, на которые необходимо выполнить доставку «на дом».

Дистанции между пунктами представим в виде матрицы смежности, где 0 будет означать отсутствие прямого маршрута.

В зависимости от вида ТС могут осуществлять доставки только в определенные пункты (Таблица 1).

Таблица 1. Доступные пункты для различных видов ТС

Вид ТС	Доступные виды пунктов
Большое грузовое ТС	Склад, промежуточный склад
Среднее грузовое ТС	Склад, промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Малое грузовое ТС	Склад, промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Мини грузовое ТС	Промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Микро грузовое ТС	Доставка «на дом»

ТС перевозят грузы, о которых известна следующая информация: категория массы груза (Таблица 2); категория объема груза (Таблица 3); начальных пункт местонахождения груза и пункт, в который необходимо выполнить доставку; а также статус груза («ожидает погрузку в ТС», «в пути», «доставлен» и «возврат на склад»). Под статусом понимаем этап транспортировки, на котором находится груз в текущий момент времени.

Грузы, выразим (3):

$$G = \{G_1, G_2, \dots, G_g\}, \quad (3)$$

где g – количество грузов, которые необходимо доставить.

Таблица 2. Категории массы грузов

Категория	XS	S	M	L	XL	XXL
Диапазон значений массы груза, кг	0 – 0,5	0,5 - 1	1 - 5	5 - 10	10 – 50	50 – 100

Таблица 3. Категории объема грузов

Категория	XS	S	M	L	XL	XXL
Диапазон значений объема груза, м^3	0 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1	1 – 2	2 – 3

В зависимости от категории массы и объема доставка груза может выполняться на определенных видах транспортных средств (Таблица 4).

Таблица 4. Доступные к перевозке категории грузов по массе и объему для различных видов ТС

Вид ТС	Категории массы груза	Категории объема груза
Большое грузовое ТС	M, L, XL, XXL	L, XL, XXL
Среднее грузовое ТС	S, M, L, XL, XXL	M, L, XL
Малое грузовое ТС	XS, S, M, L, XL	S, M, L
Мини грузовое ТС	XS, S, M, L	XS, S, M
Микро грузовое ТС	XS, S, M	XS, S

Для описания статической модели были введены следующие множества и ограничения. Во-первых, ограничение на вместимость грузового отсека ТС. Во-вторых, на грузоподъемность ТС. В-третьих, необходимо учитывать время доставки груза и не выходить за поставленные сроки. В-четвертых, ограниченный объем бензобака.

Статическая модель выполняет распределение грузов по ТС и рассчитывать прибыль от выполненных доставок, обеспечивая максимизацию прибыли от доставки грузов с учетом соблюдения временных интервалов доставки и оптимального использование ТС.

Целевая функция представлена формулой (4):

$$J = \sum_{l=1}^{r}\sum_{j=1}^{s}\sum_{i=1}^{g}\left(\frac{\delta_{G_{\text{i}}}}{t_{\text{i}}-\text{T}} * x_{\text{ij}} - \left(\frac{W_{s_j}}{Q_{s_j} * R_l} * D_{s_j}\right) * x_{\text{ij}} - t_i\right) \rightarrow max \qquad (4)$$

, где T – итоговое время доставки каждого груза, t_{i} – время доставки груза, A_i – расходы на перевозку груза, $\delta_{G_{\text{i}}}$ – доходы от доставки груза, Q_{s_j} – среднее время движения ТС, D_{s_j} – средняя стоимость заправки. W_{s_j} – средняя скорость движения ТС.

Решаемая задача оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС является сложной и многокритериальной. Существующие методы решения не учитывают необходимость своевременности доставки, использование группировки ТС с различными массогабаритными характеристиками перевозимых грузов.

Исходя из этого необходимо разработать специальное программное модельно-алгоритмическое обеспечение для решения данной задачи [14-16].

Алгоритм решения задачи оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС представлен на рисунке 1. Алгоритм описывает последовательность действий для решения задачи оптимального планирования доставок грузов, стремясь найти оптимальный способ распределения грузов по ТС и получить максимальную прибыль от доставки с учетом всех ограничений. Для получения требуемого результата используются методы линейного программирования.

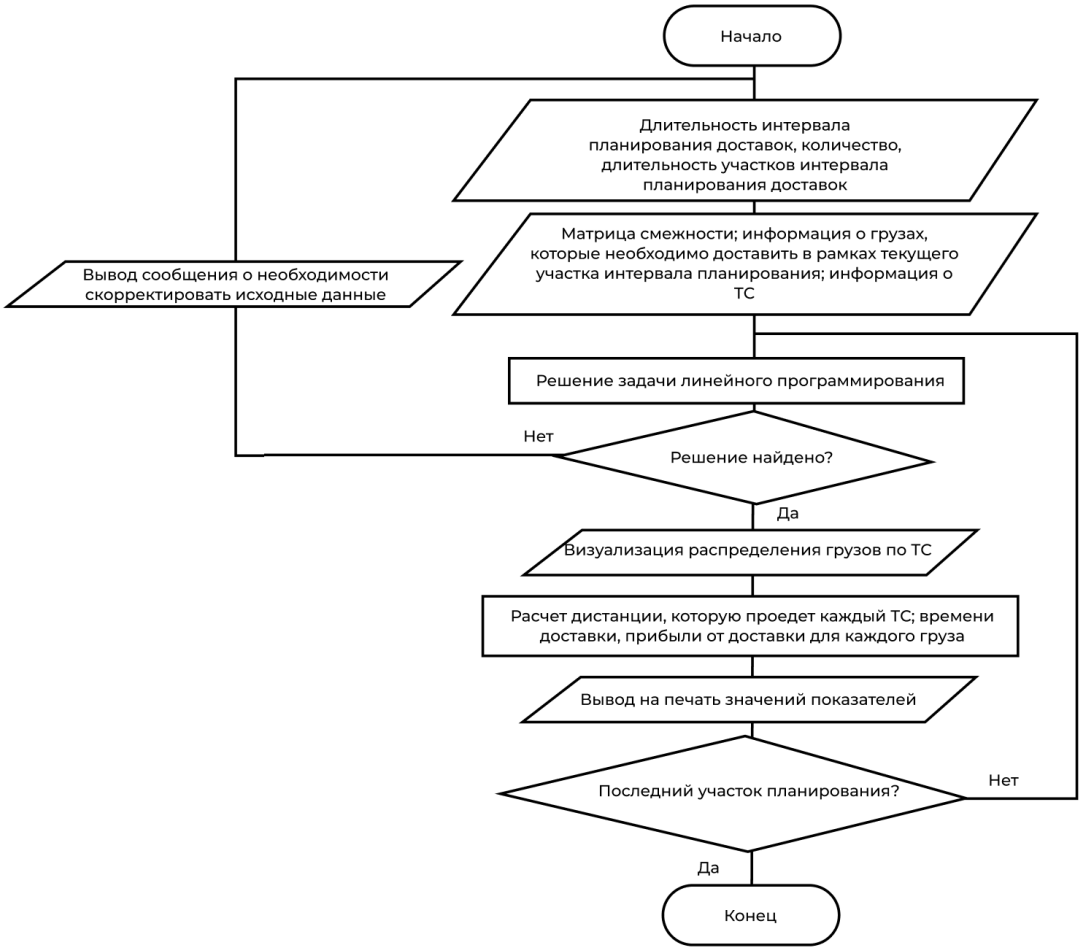


Рис. 1. Алгоритм решения задачи оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС

При исследовании статической модели будем изменять количество пунктов, ТС и их начальное распределение по «точкам». Полученные результаты будем сравнивать по основным критериям: прибыль от доставки, количество ТС, используемых для доставки, количество грузов, доставленных с опозданием, общее время выполнения доставок. На основе сравнения данных показателей выявим закономерности и разработаем

практические рекомендации для получения оптимального плана доставок в рамках поставленной транспортно-логистической задачи.

Результаты

В качестве примера рассмотрим интервал планирования в 24 часа, в рамках которого необходимо доставить 240 грузов с использованием трех больших грузовых ТС, пяти средних грузовых ТС, пяти малых грузовых ТС, десяти мини грузовых ТС и десяти микро грузовых ТС. Первоначально все грузы находятся на складе, к каждой категории массы и объема относится по 40 грузов. 220 грузов необходимо доставить на пункты выдачи, а 20 - «на дом». Для выполнения доставок мы имеем 1 склад, 10 промежуточных складов, 20 пунктов выдачи и 20 адресов, а также нам известна информация о расстоянии между ними. Выполнено разделение территории выполнения доставок на 3 зоны.

Рассмотрим решение задачи при различном начальном распределении ТС. На рисунке 2 представлено примерное расположение пунктов относительно друг друга. В нулевой момент времени для первого варианта распределения ТС расположены следующим образом: большие грузовые ТС, средние грузовые ТС и малые грузовые ТС находятся на складе, мини и микро грузовые ТС находятся на промежуточных складах.

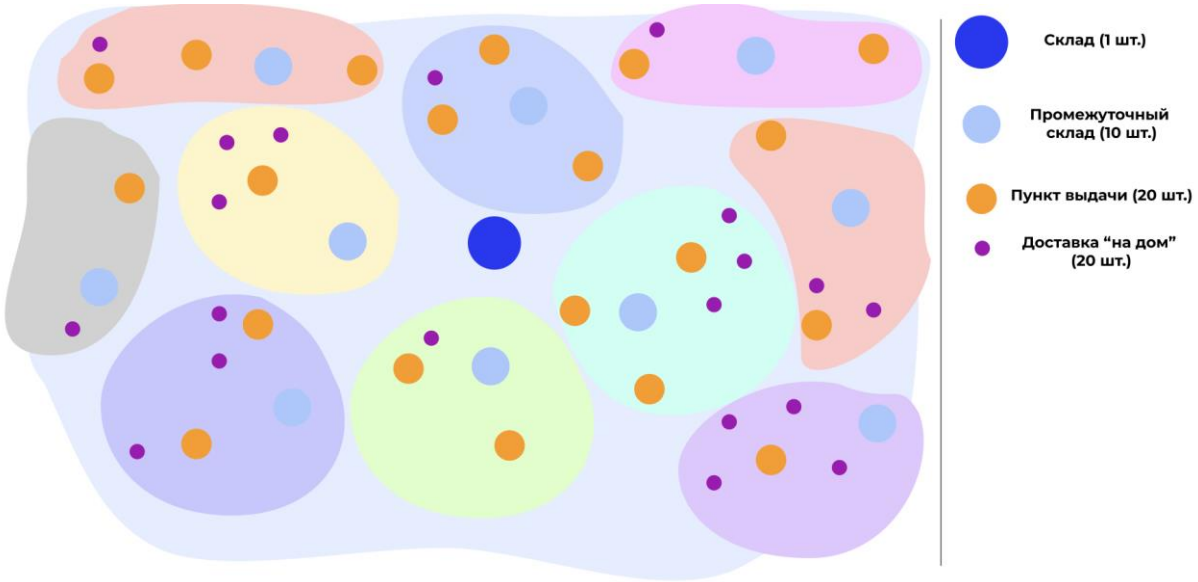


Рис. 2. Расположение пунктов в нулевой момент времени для первого варианта распределения

В результате были получены следующие значения показателей: прибыль от доставок составила 63665 рублей, для выполнения доставок было задействовано 28 ТС, с опозданием было доставлено 0 грузов, общее время выполнения доставок составило 22 часа.

Рассмотрим несколько различных ситуаций, изменяя первоначальное расположение ТС:

- большие грузовые ТС, средние грузовые ТС находятся на складе, малые, мини и микро грузовые ТС равномерно распределены по промежуточными складам (вариант 2);
- большие, средние, малые и мини грузовые ТС находятся на складе, микро грузовые ТС находятся на промежуточных складах (вариант 3);

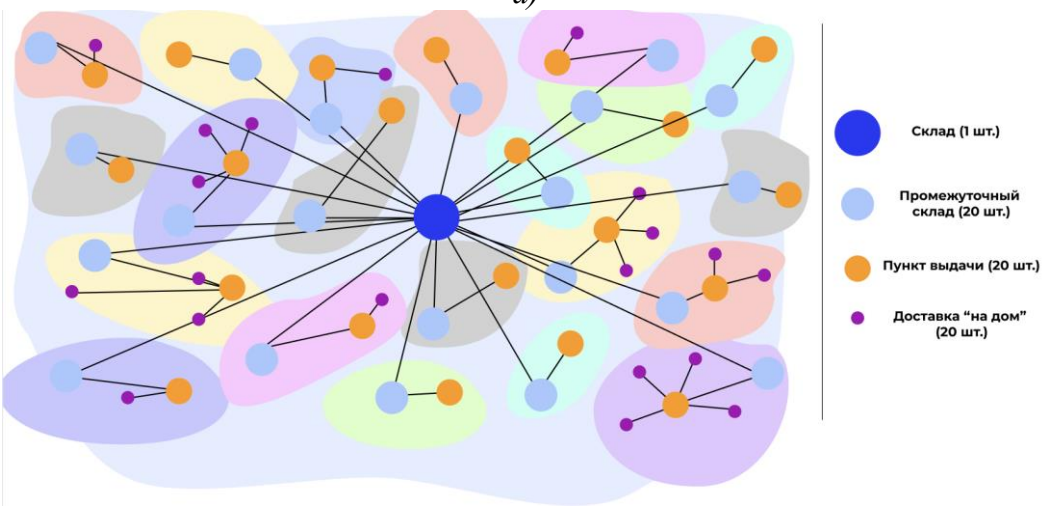
В таблице 5 представлены полученные значения показателей для каждого варианта распределения.

Таблица 5. Значения показателей для каждого варианта первоначального распределения ТС

	Прибыль от доставки, руб.	Количество грузов, доставленных с опозданием, шт.	Количество ТС, используемых для доставки, шт.	Общее время выполнения доставок, часы
Вариант 1	63665	0	28	22
Вариант 2	60380	3	31	23
Вариант 3	59754	0	30	24

Изменим количество промежуточных складов и рассчитаем показатели для каждого варианта распределения ТС. На рисунке 3 представлены расположения пунктов для трех различных ситуаций.

а)



b)

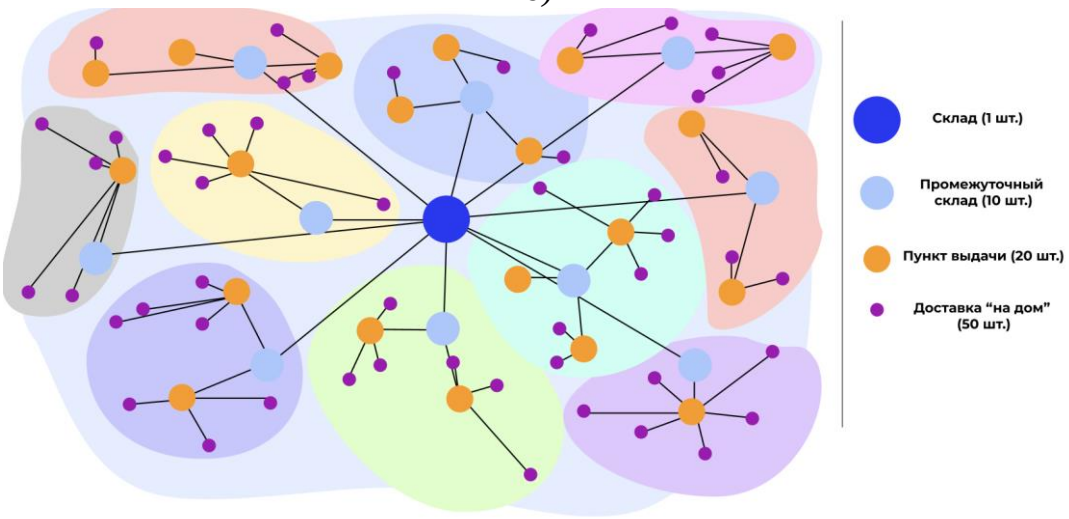
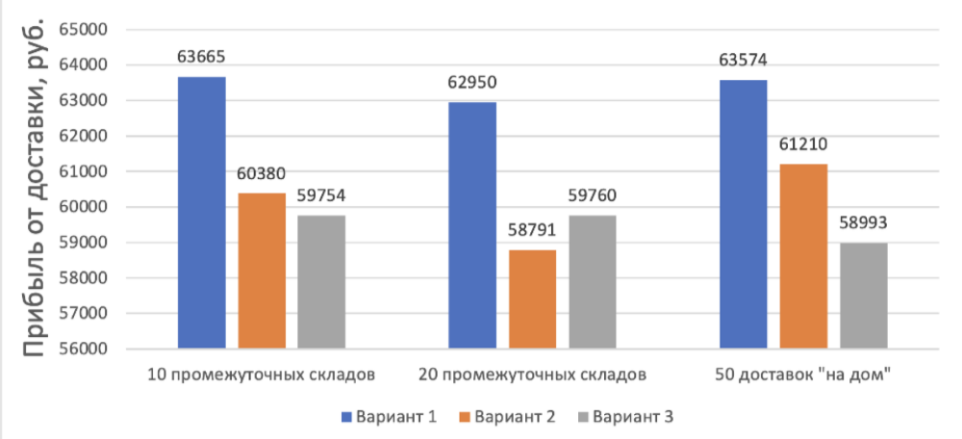


Рис. 3. Расположение пунктов в нулевой момент времени *a*) при наличии 20 промежуточных складов; b) при наличии 50 доставок «на дом»

Обсуждение

Представим полученные значения показателей для каждой из ситуаций в виде графиков (Рисунок 4).

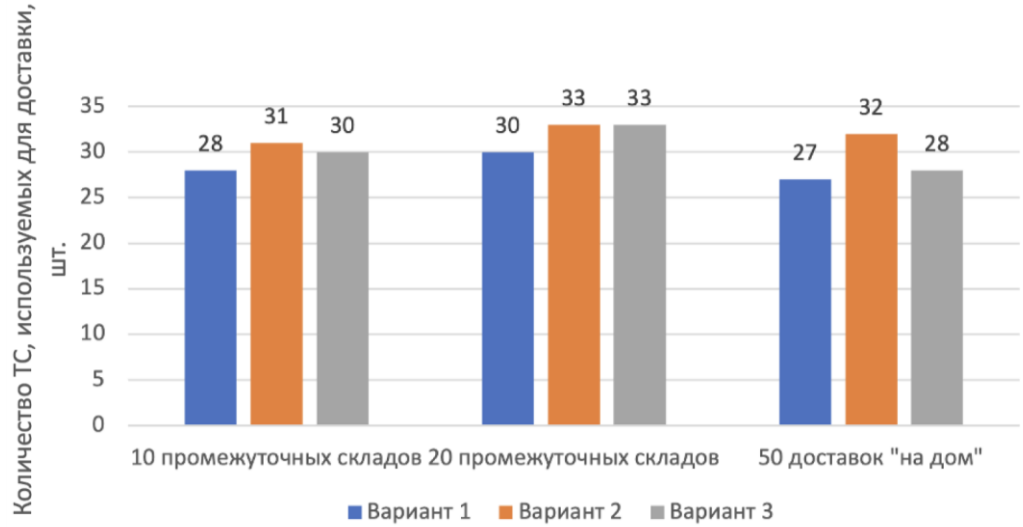
a)



b)



c)



d)

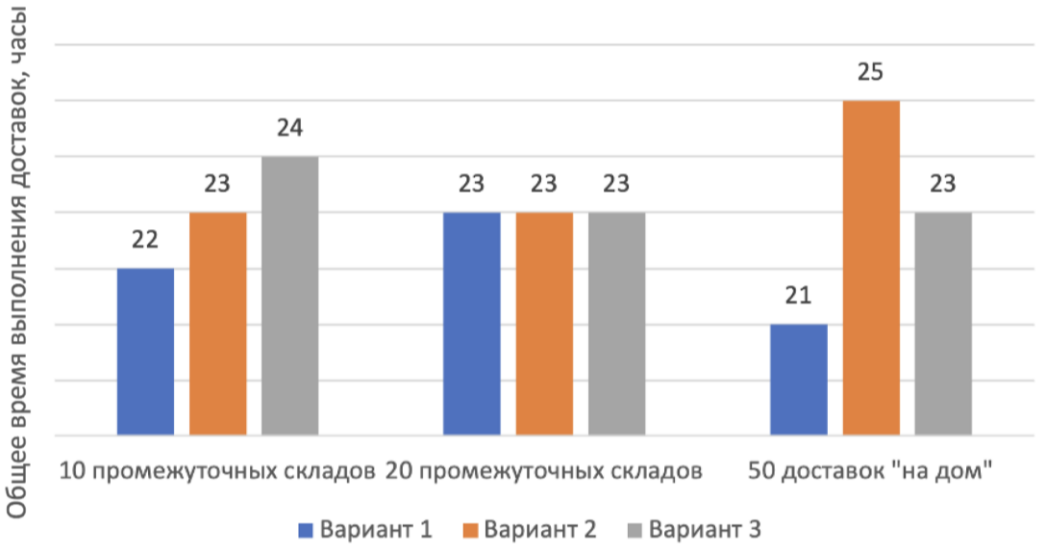


Рис. 4. Значения показателей для каждой из ситуаций расположения пунктов *a*) прибыль от доставки; *b*) количество грузов, доставленных с опозданием; c) количество ТС, используемых для доставки; *d)* общее время выполнения доставок

Исходя из графиков можно выявить следующие закономерности:

- чем больше ТС находится на главном складе, тем выше значения показателей прибыли и ниже общее время выполнения доставок;
- наличие мини грузовых ТС на промежуточных складах положительно влияет на прибыль и время и сокращает количество задействованных в доставках ТС;
- с увеличением количества промежуточных складов уменьшается общее время доставки;
- в случае, когда количество промежуточных складов сравнивается с количеством пунктов выдачи увеличивается количество

задействованных в доставках ТС и общее время выполнения доставок;

- большое количество «доставок на дом» не сказывается на времени выполнения доставок и общем времени выполнения в том случае, если на промежуточных складах находится большое количество мини транспортных средств.

Таким образом, для получения оптимального плана распределения грузов по ТС необходимо стараться максимизировать количество ТС на складе – начальной точке хранения грузов; располагать некоторое количество мини грузовых ТС на промежуточных складах для выполнения доставок грузов «на дом», а также предполагать наличие промежуточных складов, стремящееся к количеству пунктов выдачи.

Заключение

В данной статье была исследована статическая модель распределения грузов по разнотипным ТС с учетом их технических характеристик, ограничений по грузоподъемности, объему и времени доставки. Разработанный подход позволяет оптимизировать логистические процессы, максимизировать прибыль и минимизировать временные затраты за счет рационального использования ТС и наличия промежуточных складов.

Предложенная модель и алгоритмы могут быть использованы в логистических компаниях, службах доставки и складских системах для повышения эффективности транспортных операций. Дальнейшее развитие работы предполагает адаптацию модели к реальным условиям с учетом динамически меняющейся среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Григорьева Е.Д., Ушаков В.А. Анализ программных продуктов для решения задач линейного программирования // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. (СПб, 13–16 мая 2025 года). СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

[2] Головачева М.И. Анализ программных продуктов для решения задач линейного программирования. Форум молодых ученых. 2017. № 2(6). С. 38-44. EDN: YGJOLP.

[3] Леонова Н.Л. Задачи линейного программирования и методы их решения: учебно-методическое пособие. ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. – 75 с.

[4] Балухто А.Н. Соколов Б.В., Карсаев О.В. Облачная платформа iwebsim как средство имитационного моделирования космических систем. Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) : Труды конференции (СПб, 20–22 октября 2021 года). СПб: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. С. 95-104. EDN: SYMFNM.
[5] Perl J., Memmert D. Modeling. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 57–64. DOI: 10.1007/978-3-662-68313-2_8.
[6] Perl J., Memmert D. Simulation. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 81–88. DOI: 10.1007/978-3-662-68313-2_11.
[7] Calixto W.P., Araújo W.R.H., Morais L.D.S., Reis M.R.C. System, Modeling, Simulation, and Optimization. In: Control and Tracking Techniques for Switched Reluctance Machines. Power Systems. Springer, Cham. 2025. Pp. 37–56. DOI: 10.1007/978-3-031-86727-9_3.
[8] Xue D., Pan F. Modeling and Simulation with Simulink. In: MATLAB and Simulink in Action. Springer, Singapore. 2024. Pp. 387–419. DOI: 10.1007/978-981-99-1176-9_13.
[9] Гусев Д.А., Егорова Т.В. Проблемы планирования транспортного обеспечения поставок в условиях неопределенности. Менеджмент сегодня. 2023. Т. 1. С. 44-54. DOI: 10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54. EDN: VZMWLM.
[10] Зимин И.Н., Иванилов Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления. Журнал вычислительной математики и математической физики. 1971. №3. С. 632 – 641.
[11] Микони С. В. Теория принятия управленческих решений : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. СПб : Лань, 2022. 384 с.
[12] Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001. EDN: VVUKQW.
[13] Захаров В.В., Баранов А.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4. Ч. 1. С. 171-178. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.021. EDN: MFSVBZ.

[14] Poler R., Mula J., Díaz-Madroñero M., Sanchis R. Decision Theory. In: Operations Research Problems. Springer, London. 2025. Pp. 235–322. DOI: 10.1007/978-1-4471-7546-9_7.
[15] Bartholomae F., Wiens M. Decision Theory. In: Game Theory and Applications. Classroom Companion: Economics. Springer, Wiesbaden. 2024. Pp. 3–31. DOI: 10.1007/978-3-658-44608-6_1.
[16] Ilin I.: Integration of information and management technologies. 2022. Vol. 1. No. 1. Pp. 24–32. DOI: 10.57809/2022.1.1.2. EDN: HHZYBY.
[17] Григорьева Е.Д. Ушаков В.А. Модель и алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2(244). С. 151-161. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-2-151-161.

E.D. Grigoreva [1], V.A. Ushakov [2]

RESEARCH OF A STATIC MODEL FOR LOAD DISTRIBUTION AMONG TRANSPORT VEHICLES DIFFERENT TYPES

[1] Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia;
[2] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The paper considers the problem of cargo distribution among different types of transport vehicles, solved using a static model and algorithm. Changes in cargo distribution indicators are studied depending on available resources, transport vehicles, as well as on changes in the number of delivery and dispatch points. The prospects of using a static model to solve transport and logistics problems are discussed. Practical recommendations for optimal distribution of cargo using different types of transport vehicles are proposed.

Key words: transport and logistics problem, modeling, decision making, static model, different types of transport vehicles, cargo distribution.

REFERENCES

[1] Grigoreva E.D., Ushakov V.A. Analysis of software tools for solving linear programming problems. Fundamental and applied research in the field of management, economics, and trade: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical and Educational-Methodological Conference. (St. Petersburg, May 13–16, 2025). St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2025. (rus.)

[2] Golovacheva M.I. Analysis of software tools for solving linear programming problems. Forum of Young Scientists. 2017. No. 2(6). Pp. 38-44. (rus.)
[3] Leonova N.L. Linear programming problems and methods for their solution: a teaching aid. VSHTE SPbSUPTD. St. Petersburg, 2017. 75 p. (rus.)
[4] Balukhto A.N., Sokolov B.V., Karsaev O.V. The iwebsim cloud platform as a tool for simulation modeling of space systems. Tenth All-Russian Scientific-Practical Conference on Simulation Modeling and Its Applications in Science and Industry "Simulation Modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2021): Conference Proceedings (St. Petersburg, October 20–22, 2021). St. Petersburg: JSC "Shipbuilding and Ship Repair Technology Center," 2021. Pp. 95-104. (rus.)
[5] Perl J., Memmert D. Modeling. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 57–64. DOI: 10.1007/978-3-662-68313-2_8.
[6] Perl J., Memmert D. Simulation. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 81–88. DOI: 10.1007/978-3-662-68313-2_11.
[7] Calixto W.P., Araújo W.R.H., Morais L.D.S., Reis M.R.C. System, Modeling, Simulation, and Optimization. In: Control and Tracking Techniques for Switched Reluctance Machines. Power Systems. Springer, Cham. 2025. Pp. 37–56. DOI: 10.1007/978-3-031-86727-9_3.
[8] Xue D., Pan F. Modeling and Simulation with Simulink. In: MATLAB and Simulink in Action. Springer, Singapore. 2024. Pp. 387–419. DOI: 10.1007/978-981-99-1176-9_13.
[9] Gusev D.A., Egorova T.V. Problems of transport supply planning under uncertainty. Management Today. 2023. Vol. 1. Pp. 44-54. DOI: 10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54. (rus.)
[10] Zimin I.N., Ivanilov Yu.P. Solving network planning problems by reducing them to optimal control problems. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1971. No. 3. Pp. 632–641. (rus.)
[11] Mikoni S.V. Theory of managerial decision-making: a textbook for universities. 2nd ed., rev. and exp. St. Petersburg: Lan, 2022. 384 p. (rus.)
[12] Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Qualimetry of models and polymodel complexes. Moscow: RAS, 2018. 314 p. DOI: 10.31857/S9785907036321000001. (rus.)
[13] Zakharov V.V., Baranov A.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Models and algorithms for centralized and decentralized planning of mobile object group applications based on differential game theory. Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 4. Part 1. Pp. 171-178. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.021. (rus.)

[14] Poler R., Mula J., Díaz-Madroñero M., Sanchis R. Decision Theory. In: Operations Research Problems. Springer, London. 2025. Pp. 235–322. DOI: 10.1007/978-1-4471-7546-9_7.
[15] Bartholomae F., Wiens M. Decision Theory. In: Game Theory and Applications. Classroom Companion: Economics. Springer, Wiesbaden. 2024. Pp. 3–31. DOI: 10.1007/978-3-658-44608-6_1.
[16] Ilin I.: Integration of information and management technologies. 2022. Vol. 1. No. 1. Pp. 24–32. DOI: 10.57809/2022.1.1.2.
[17] Grigoreva E.D., Ushakov V.A. Model and algorithm for solving a transport-logistics problem of timely cargo delivery using a group of robotic complexes. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2025. No. 2(244). Pp. 151-161. DOI: 10.18522/2311-3103-2025-2-151-161. (rus.)

ISSN
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 14-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ_ПРЕСС, 2025.

УДК 621.792.05: 539.4.014.11
doi:10.18720/SPBPU/2/id-144

К.П. Манжула[1], А.Ю. Шлепетинский[2]

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СОПРЯЖЕНИИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА С НАПЛАВЛЕННЫМ КРЕСТОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ИЗГИБЕ





[1]Константин Павлович Манжула, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-84-01, E-mail: conpaman@gmail.com
[2]Антон Юрьевич Шлепетинский, к.т.н.
Инженерный центр, АО «Невский завод»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)385-78-52, E-mail: A.Shlepetinskiy@reph.ru

Аннотация

Получены зависимости для расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в зоне радиуса сопряжения основного металла с наплавленным крестового сварного соединения при нагружении растяжением и изгибом. Рассматривается соединение с полным проплавлением корня сварного шва. Исследования напряженно-деформированного состояния проведены методом конечного элемента при варьировании геометрических параметров соединения с последующей обработкой вычислительного эксперимента и построением нелинейной регрессионной модели. Дана оценка полученных зависимостей в сравнении с результатами вычислительного эксперимента, а также с известными расчетными зависимостями. Достоинством полученных зависимостей является их компактный вид, применимый для инженерных расчетов, а также наиболее полный учет влияющих геометрических параметров.

Ключевые слова: крестовое сварное соединение, теоретический коэффициент концентрации напряжений, растяжение, изгиб, метод конечных элементов, расчетные зависимости.

Введение

В данном исследовании теоретический коэффициент концентрации напряжений (ТККН) в крестовом сварном соединении определяется как

$$K_t = \sigma_{max}/\sigma_n\,, \qquad (1)$$

где σ_{max} - максимальное нормальное напряжение в зоне сопряжения основного металла с наплавленным, называемой в англоязычной литературе toe, σ_n - номинальное нормальное напряжение вдали от концентратора, определяемое по формулам сопромата. Исследования концентрации напряжений в этой зоне крестовых соединений содержатся в работах [1 - 18]. По числу учитываемых независимых геометрических параметров, влияющих на концентрацию напряжений, их можно разделить на: трехпараметрические [4, 5], четырехпараметрические [1, 5, 7, 15], пятипараметрические [3, 6, 9-11, 13, 14], шестипараметрические [18], восьмипараметрические [17]. Усиление сварного шва учитывается только в зависимости [17], но зависимость получена для соединения с продольным ребром и для определения концентрации напряжений в зоне сопряжения крестового соединения некоторые параметры избыточны. Первые расчетные зависимости были получены на основе анализа экспериментальных исследований поляризационно-оптических моделей, с помощью метода граничных элементов, однако основная часть зависимостей получена по результатам исследований методом конечного элемента (МКЭ) на основе регрессионного анализа. Все зависимости ограничены в применении не только числом геометрических параметров, но диапазоном их варьирования. Для определения K_t применяют в последнее время также обученные нейронные сети [19]. Анализ точности расчета K_t по известным зависимостям приведен в работе [20].

Основными геометрическими параметрами, определяющими концентрацию напряжений в крестовом соединении, являются толщины t, t_1, катеты K_g, K_b вписанного треугольника, радиус R сопряжения основного металла с металлом шва в углу, усиление q шва (рис.1.). В многих зависимостях [1, 3, 5, 6, 9-11, 13, 17], задается угол θ в качестве независимого влияющего параметра, однако он не определяется отдельно нормативной, конструкторской и технологической документацией, а является производным от отношения катетов K_b/K_g, которые в документации всегда указываются. В некоторых работах угол θ также зависит от усиления шва. Усиление q шва изменяет суммарный угол отклонения силового потока и определяется стандартами на сварку, поэтому логически должно учитываться отдельно, а не совокупным углом θ. Высота h используется в качестве влияющего параметра в работе [9], но, как показывают исследования, в передаче силового потока по высоте участвует $(0.4…0.5)K_b$, поэтому в данной работе она не рассматривается.

На коэффициент K_t в сопряжении существенно могут влиять подрезы [18], однако в некоторых нормах они не допускаются и поэтому в качестве влияющих параметров в данной работе не рассматриваются.

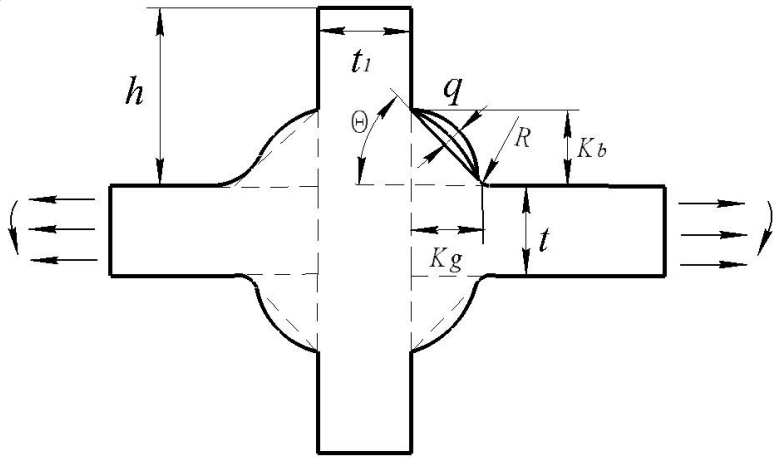


Рис. 1. Схема крестового сварного соединения

Анализ существующих расчетных зависимостей K_t

Необходимость в определении коэффициента K_t появляется при выполнении поверочных расчетов на сопротивление усталости, хрупкой прочности или на ранних этапах трещиностойкости. В проектировочных расчетах, проводимых в упругости области деформирования, максимальные напряжения выше предела текучести вызывают интерес только при их значительном превышении предела текучести и значительном объеме, вызванным изменениями конструктивной формы. Также не всегда требуется выполнять поверочные расчеты, но в рабочей документации всегда указываются виды сварных швов, их геометрические размеры, которые и определяют уровень K_t. Поэтому инженерная оценка уровня максимальных напряжений в сварном шве или околошовной зоне (ОШЗ) необходима и на стадии проектирования для чего требуется иметь простые зависимости оценки K_t.

В расчетах сопротивления усталости, хрупкой прочности конструкций коэффициент K_t выступает в качестве одного из параметров методики расчета, учитывающей в свою очередь процессы зарождения микро, мезо и макротрещин в структуре материала и их дальнейшее развитие. Это могут быть инженерные методики расчета по S-N кривым или вычислительные в среде МКЭ, но в обоих случаях знание K_t и номинальных напряжений позволяет не моделировать подробно геометрию шва и околошовных зон.

Геометрические параметры, определяющие K_t, можно разделить на более и менее влияющие. Самым значительно влияющим параметром является радиус R. В расчетных зависимостях, представленных в литературе, диапазон его варьирования не всегда указывается в

абсолютных значениях, чаще в отношении к толщине t в виде R/t или t/R. Если привести относительные значения к виду R/t, то для известных зависимостей диапазон составляет R/t = 0.003…1. То или иное относительное значение R/t может быть получено при малых или больших значениях абсолютных размеров R и t, при этом их отношение будет неизменным. Например, отношение R/t = 0.02 может быть получено при следующих сочетаниях параметров: R = 0.2 мм и t = 10 мм; R = 0.8 мм и t = 40 мм; R = 2 мм и t = 100 мм. Их влияние на расчетные значения K_t будет одинаковым, но зоны напряжений $\sigma > \sigma_{0.2}$ или $\sigma > \sigma_{-1}$ во всех случаях окажутся разными. В таблице 1 для стали 09Г2С приведены результаты расчета коэффициентов K_t, площадей $S_{\sigma_{0.2}}$ металла превышающих по напряжениям предел текучести $\sigma_{0.2}$ и площадей $S_{\sigma_{-1}}$ превышающих по напряжениям предел выносливости σ_{-1}, а также геометрические параметры трех крестовых сварных соединений при растяжении номинальными напряжениями σ_n = 100 МПа, у которых соблюдены условия подобия $t/t_1 = K_b/K_g$ = 1 и R/t = 0.02.

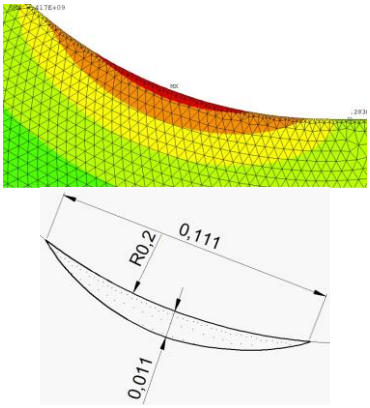
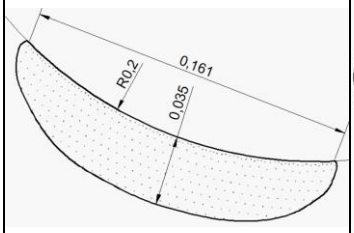
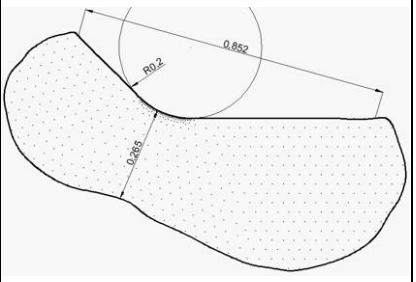
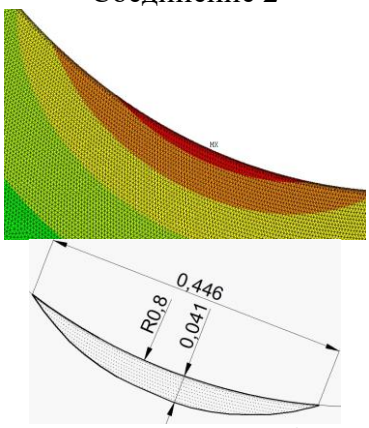
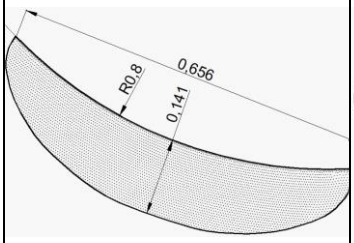
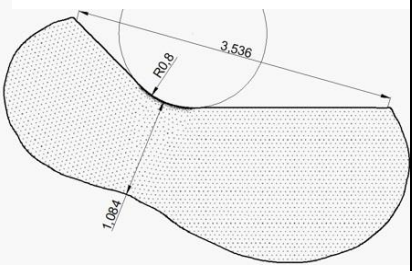
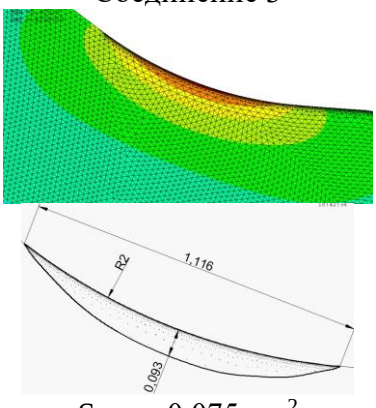
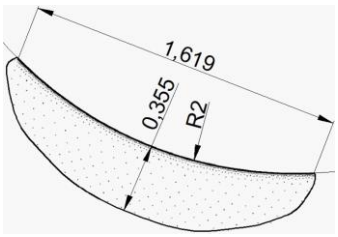
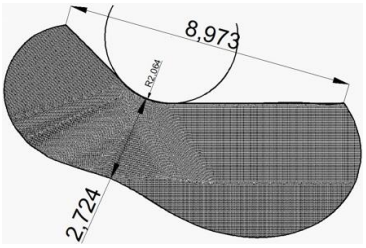
Таблица 1. Сварные соединения с одинаковым значением R/t = 0,02

Соединение	t	t_1	K_g	K_b	q	θ	R	K_t ПДС	K_t ПНС	$S_{\sigma_{0.2}}$ ПНС	$S_{\sigma_{-1}}$ ПНС
	мм	мм	мм	мм	мм	°	мм			мм^2	мм^2
1	10	10	10	10	0	45	0.2	3.696	4.162	0.0008	0.0052
2	40	40	40	40	0	45	0.8	3.696	4.163	0.0131	0.0836
3	100	100	100	100	0	45	2.0	3.704	4.168	0.075	0.5152

Для каждого из этих трех соединений составлялась модель и проводился расчет НДС в сопряжении. При уровне номинальных напряжений σ_n = 100 МПа и K_t = 4.162 в ОШЗ возникают зоны пластичности и циклической неупругости. Для соединений 1, 2, 3 в таблице 2 показана конечно-элементная сетка в зоне радиуса R с расчетом МКЭ изолиний первого главного напряжения. На примере стали 09Г2С с пределом текучести $\sigma_{0.2}$ = 365 МПа определялся размер зоны пластичности и зоны усталости. Предел выносливости, стали 09Г2С, соответствующий рассматриваемому пределу текучести, определенный на корсетных образцах, вырезанных из листовой прокатной стали толщиной 14 мм, на базе 10^7 циклов нагружения при изгибе с вращением составил σ_{-1} = 282 МПа, хотя предел выносливости металла околошовной зоны, расположенной в зоне концентратора, несколько выше 302 МПа [21]. Размеры зон определялись по узлам элементов, попадающих соответственно в зону выше линии напряжений σ > 365 МПа и выше линии напряжений σ_{-1} = 282 МПа. Также определялись линейные размеры

зоны в мм, показанные на табл. 2. Зона пластичности характеризуется наибольшими сдвиговыми деформациями в полосах скольжения и зарождающимися усталостными микротрещинами. Расчет показывает, что площадь этой зоны в соединении 1, имеющим R/t = 0.02, составляет 0.0008 мм^2, размер по глубине 0.011 мм (табл. 2).

Таблица 2. Размеры зон пластичности и усталости в сварных соединениях с геометрическими параметрами $t/t_1 = K_b/K_g$ = 1; R/t = 0.02; q = 0; θ = 45º

Зона пластичности	Зона усталости	
$\sigma \geq \sigma_{0.2}$ = 365 МПа	$\sigma \geq \sigma_{-1}$ = 282 МПа	$\sigma \geq u$ = 141 МПа
Соединение 1  $S_{\sigma_{0.2}}$=0.0008 мм^2	 $S_{\sigma_{-1}}$ = 0.0052 мм^2	 S_u = 0.0052 мм^2
Соединение 2  $S_{\sigma_{0.2}}$ = 0.0131 мм^2	 $S_{\sigma_{-1}}$ =0.0836 мм^2	 S_u = 6.338 мм^2
Соединение 3  $S_{\sigma_{0.2}}$ = 0.075 мм^2	 $S_{\sigma_{-1}}$ =0.5152 мм^2	 S_u = 39.406 мм^2

При больших отношениях *R/t* и больших толщинах *t* и t_1 площадь и глубина зоны условной пластичности растут, но составляют сотые доли мм и мм^2. Процессы усталостного повреждения происходят и в более глубоких слоях металла с напряжениями $\sigma > \sigma_{-1}$. Зоны усталостных повреждений в трех рассматриваемых соединениях рассчитаны для σ_{-1} = 282 МПа. Размеры и площади этих зон приведены в табл. 2, и видно, что они также составляют сотые и десятые доли мм и мм^2.

Размеры и площадь зоны накопления усталостных повреждений и разрушений связаны с размером зерна структуры и понятием структурного элемента. ОШЗ может иметь разную структуру в зависимости от стали, режимов сварки, сварочного материала, температуры воздуха и подогрева. В низколегированных слабозакаливаемых сталях структура металла вдоль линии сплавления является преимущественно бейнитной с ферритными прослойками [21, 22]. Размер зерна прокатного металла соответствует баллу 7…12 [22, 23, 24], что может соответствовать среднему размеру зерна феррита *d* = 8…20 мкм, определить размер зерна в ОШЗ вблизи линии сплавления довольно сложно, он может зависеть от выстраивания ферритных прослоек. Структурный элемент связывают с объемом материала, в котором может сформироваться растущая усталостная микротрещина. В пространстве такой объем должен занимать 2-3 зерна, в сечении - площадь более одного зерна, для того чтобы трещина могла преодолеть скопление зернограничных дислокаций.

Если использовать условия линейной механики разрушения то для того, чтобы сформировавшаяся в дальнейшем макротрещина стала развивающейся коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I в ее вершине должен удовлетворять условию $K_I \geq K_{th}$, где K_{th} - пороговый КИН. Размер зоны пластичности в вершине трещины в этом случае ориентировочно для ПНС можно оценить как $r_p = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{th}}{K_t \sigma_n}\right)^2$. По разным источникам, например, для стали 09Г2С $K_{th} \approx 4.9…12$ МПа$\sqrt{}$м, что для соединения 1 после вычислений дает диапазон r_p = 22…132 мкм. Из решения линейной механики разрушения известно, что зона сингулярности перед трещиной составляет *l*/50, где *l* – длина трещины [25]. Таким образом, ориентировочный минимальный размер развивающейся макротрещины в зоне концентратора должен составлять *l* = 1…7 мм. Полученные значения согласуются с размером структурного элемента, под которым понимают микрооднородность среды и размер которого для углеродистых и низколегированных сталей принимают 3-7 мм [26].

Расчетные зоны пластичности и усталости в зоне сопряжения соединений, представленных в табл. 2, по глубине не достигают 1 мм.

Между тем экспериментальные разрушения соединений с радиусом в носке R = 0.8…2 мм наблюдаются, а значит в процесс усталостного повреждения вовлекаются более глубокие слои металла, которые ограничиваются по глубине линией напряжений, равной $u \approx 0{,}5\sigma_{-1}$. Для стали 09Г2С она составит 141 МПа, ее площадь включает в себя также рассмотренные выше площади. В соединении 1 зона $\sigma \geq u$ = 141 МПа переходит в зону номинальных напряжений, то есть становится размытой и указывает на то, что развивающаяся макротрещина в ОШЗ не может сформироваться. В соединении 2, показанном на рис.2, зона с напряжениями $\sigma \geq$ 141 МПа по глубине достигает 1 мм с площадью S = 6,3 мм^2 и в масштабе к соединению в целом соответствует представлениям о зоне инициации и формирования трещин в микро- мезо- и макроструктуре.

Выполненный анализ показывает, что уже при отношении R/t = 0.02 в случае соединения тонких листов при номинальных напряжениях на уровне предела выносливости 100 МПа, формирующейся зоны пластичности и усталости может быть недостаточно для образования распространяющейся макротрещины. Следовательно, оценивать K_t в области значений R/t < 0.02 возможно только при больших толщинах листов с указанием не только относительных значений независимых параметров, но и их абсолютных значений. Данный вывод требует дополнительных уточнений.

Геометрические параметры, которые достаточно полно описывают геометрию крестового сварного соединения, представлены на рис.1. Существенное влияние на концентрацию в сопряжении могут оказывать также еще подрезы сварных швов, несоосность стыкуемых листов, менее существенное влияние - непровары корня шва, поперечные к силовому потоку. Влияние непровара рассматривается в зависимостях [5, 11], но значимость его влияния требует дополнительных исследований. Высота h вертикального листа на K_t практически не влияет.

Результаты

С целью получения инженерных зависимостей K_t с перечисленными выше независимыми геометрическими параметрами выполнены расчеты крестовых соединений МКЭ в среде Ansys. Расчетные модели крестового соединения представляли собой ¼ часть полного соединения. Для исключения ошибки в граничных условиях результаты проверялись на моделях полного и ½ соединений. Длина пластины, к которой прикладывалась нагрузка, принималась не менее (3-5)t от оси симметрии. Конечно-элементная сетка имела размеры в зоне концентратора 0.00007…0.00009 мм, в остальной части – 0.0005…0.0008 мм. Расчеты модели каждого соединения проводились при растяжении и изгибе.

Определялись напряжения по первому главному напряжению и по Мизесу при плоскодеформированном (ПД) и плосконапряженном (ПН) состояниях. Коэффициенты K_t концентрации напряжений оценивалась по зависимости (1) по первому главному напряжению при ПН состоянии. Фрагмент сетки конечных элементов в зоне радиуса сопряжения и размер зоны усталости показан на примере соединения 2 (рис. 2).

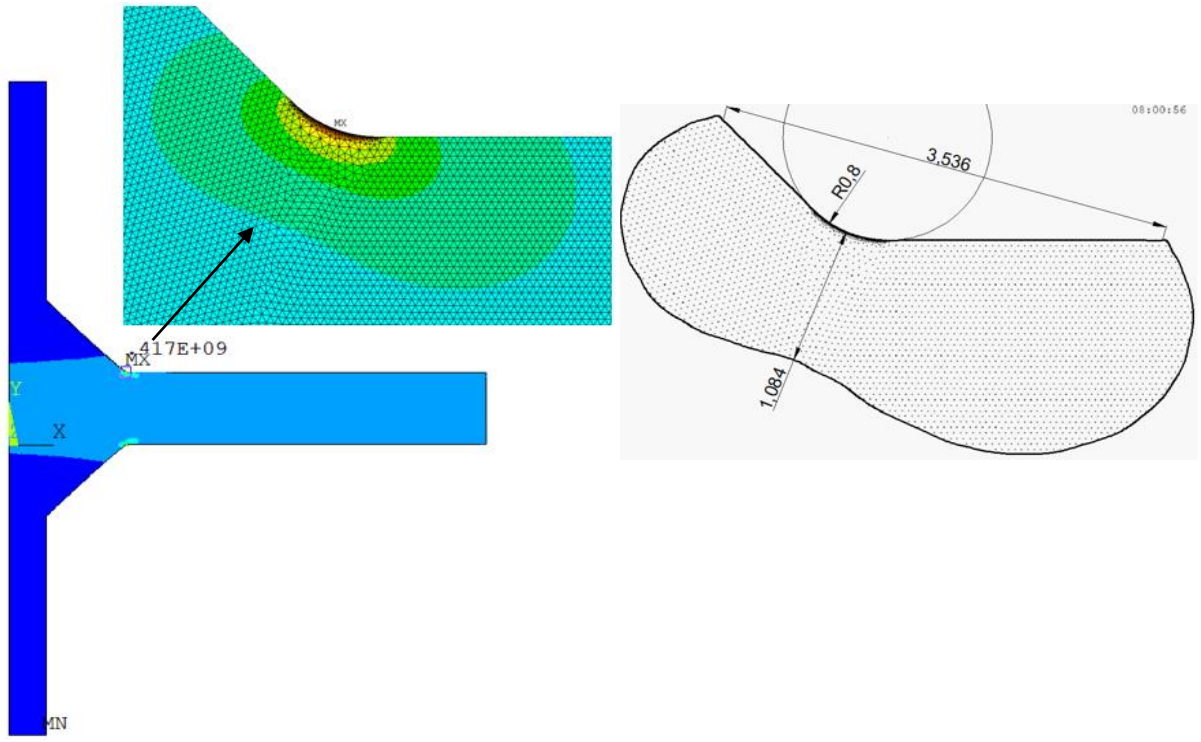


Рис. 2. Размер зоны напряжений 141 МПа в сварном соединении 2 (табл. 1) с параметрами t/t1 = Kb/Kg = 1; R/t = 0.02; R = 0.8 мм; q = 0; θ = 45º

Диапазоны варьирования геометрических параметров и их расчетные комбинации для крестового соединения представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные комбинации параметров сварных соединений, рассчитанных при растяжении и изгибе

Число расчетов	t, мм	t_1, мм	Kg, мм	Kb, мм	q, мм	θ, º	R, мм
9	6	6	6	6	0	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
15	6	8	5	8	0;1; 1.5	58	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0
16	6	8	7	4	0;1; 1.5	30	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0
27	8	12	7	9	0; 1; 2	52	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	8	8	6	0; 1; 2	37	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	8	10	8	0; 1; 2	39	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	10	10	6	0; 1; 2	31	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	10	10	10	0; 1; 2	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	10	6	10	0; 1; 2	60	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	10	20	10	10	0; 1; 2	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
2	10	40; 5	10	10	0	45	0.2

9	20	10	10	6	0	31	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	20	10	10	10	0; 1; 2	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
9	20	10	6	10	0	60	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
2	20	10	20	20	0	45	0.2; 0.4
2	20	20	10; 40	10	0	45	0.2
27	20	40	12	12	0; 1; 2	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	20	40	20	12	0; 1; 2	31	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	20	40	12	20	0; 1; 2	60	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
27	40	10	10	10	0; 1; 2	45	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
1	40	10	10	40	0	45	0.2
27	40	20	20	12	0; 1; 2	31	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
2	40	20	10	10; 40	0	45	0.2
27	40	20	12	20	0; 1; 2	60	0.2; 0.3; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0
2	40	10	40	40	0	45	0.2; 0.8
1	40	40	40	40	0	45	0.8

Общее число рассчитанных соединений при нагружении растяжением и изгибом составило 872 модели.

Полученные в результате вычислительного эксперимента по определению значений коэффициентов концентрации напряжений K_t аппроксимировались функцией вида

$$Y = A_0 \prod_{i=1}^{5} X_i^{a_i} = A_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} ... X_5^{a_5}, \qquad (2)$$

где $Y = K_{tf}$, $X_1 = \frac{R}{t}$, $X_2 = \frac{K_g}{t}$, $X_3 = \frac{t_1}{t}$, $X_4 = \frac{K_b}{K_g}$, $X_5 = \frac{w}{a}$.

В этих зависимостях $w = a + q$; $a = [(K_g)^2 + (K_b)^2]^{0.5}$.

Показатели степени a_i определяются минимизаций ошибки разности значения $y = log(Y)$, полученного в результате моделирования, и значения $\tilde{y} = log\, Y = a_0 + \sum_{i=1}^{L} a_i \cdot \tilde{x}_i$, получаемого по аппроксимирующей зависимости (1), то есть

$$F = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n} \left(y_m - \left(a_0 + \sum_{i=1}^{L} a_i \tilde{x}_{im} \right) \right)^2 \to \min ,$$

где n – количество вычислительных экспериментов по каждой величине, что приводит к системе уравнений, решением которой является вектор коэффициентов a_i.

В результате обработки всего массива расчетов, перечисленного в табл. 3, для теоретического коэффициента концентрации напряжений при растяжении K_{ttf} (индекс f указывает на результат обработки) получена зависимость

$$K_{ttf} = \frac{1.1357\left(\frac{K_g}{t}\right)^{0.1192}\left(\frac{t_1}{t}\right)^{0.0511}\left(\frac{K_b}{K_g}\right)^{0.1573}\left(\frac{w}{a}\right)^{0.3464}}{\left(\frac{R}{t}\right)^{0.3355}}; \quad (3)$$

для теоретического коэффициента концентрации напряжений при изгибе K_{tbf} получена зависимость

$$K_{tbf} = \frac{0.9057\left(\frac{K_g}{t}\right)^{0.0337}\left(\frac{t_1}{t}\right)^{0.0066}\left(\frac{K_b}{K_g}\right)^{0.1089}\left(\frac{w}{a}\right)^{0.2654}}{\left(\frac{R}{t}\right)^{0.3235}}. \quad (4)$$

Анализ результатов

Получаемые по зависимостям K_{ttf} и K_{tbf} расчеты сравнивались с результатами расчетов K_{tt} и K_{tb}, полученными МКЭ и определялась средняя ошибка по зависимости

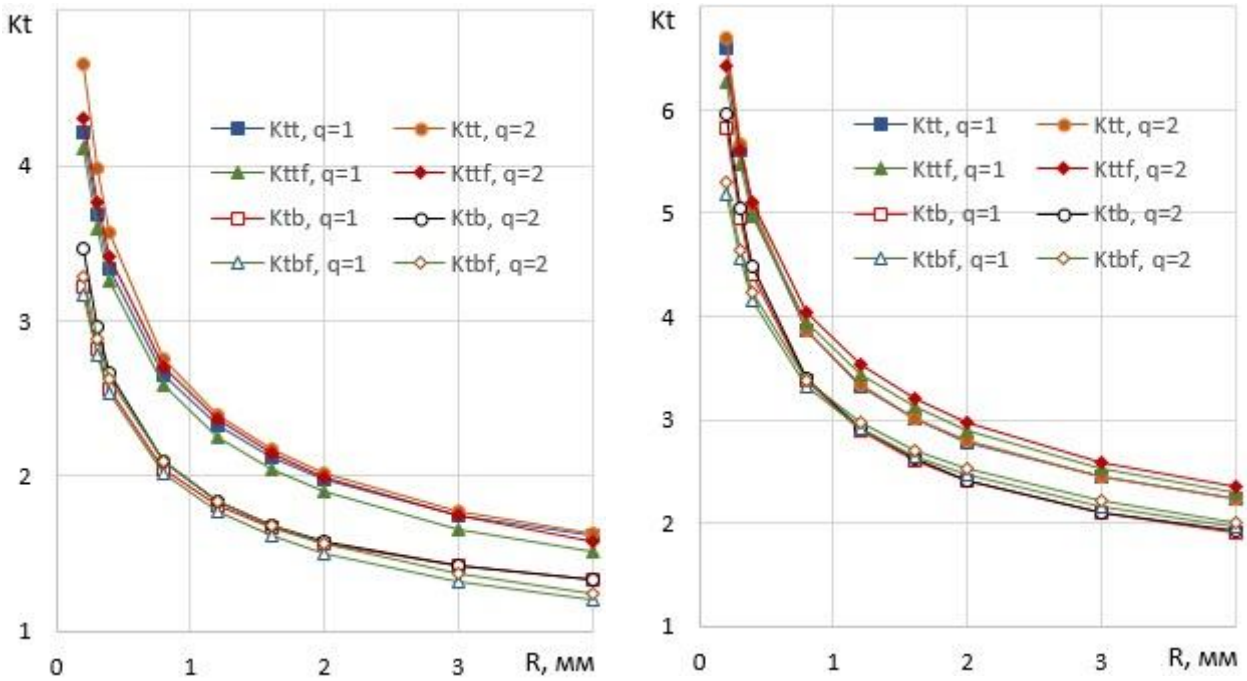
$$\Delta = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{K_{tfi} - K_{ti}}{K_{ti}}\right|100\%,$$

где K_{tfi} - значение, рассчитанное по зависимостям (3) и (4), а K_{ti} - значение, рассчитанное МКЭ. Средняя ошибка в определении K_{ttf} при растяжении, по сравнению с расчетами МКЭ, составляет 3,9 %, средняя ошибка в определении K_{tbf} составляет 3,5 %, что можно рассматривать как удовлетворительный результат для достаточно широкого диапазона варьирования геометрических параметров соединения. Следует отметить, что по всему расчетному массиву выполненному в Ansys, имеют место 25 выброс ов значений ошибки от 20 до 10%, не имеющих систематического характера. Значения K_t с этими выпадами были включены в обработку.

Наиболее влияющим геометрическим параметром на коэффициент K_t является радиус R. Его влияние рассмотрено на примере двух соединений, показанных на рис. 3, с параметрами: a) - $t = t1 = 10$ мм, $K_g = 10$ мм, $K_b = 6$ мм, $q = 1$ и 2 мм; b) - $t = 40$ мм, $t1 = 20$ мм, $K_g = 12$ мм, $K_b = 20$ мм, $q = 1$ и 2 мм. Графики отражают сравнение результатов расчетов МКЭ с расчетами по зависимостям (3) и (4). Общая закономерность влияния R сохраняется как при растяжении и изгибе, так и при разном сочетании геометрии. В диапазоне изменения R = 0,2…4 мм коэффициент K_t меняется в 3…2,6 раз. Графики отражают также влияние усиления q шва на K_t. При одинаковой геометрии соединений и изменении только усиления q видно, что усиление q = 1 и 2 мм очень слабо влияет на концентрацию напряжений как при растяжении, так и при изгибе (кривые

расположены близко друг к дугу).

Существенно влияет на концентрацию напряжений толщина t элемента, к которому прикладывается нагрузка, и не влияет на концентрацию напряжений, в случае одноосного растяжения и чистого изгиба, толщина t_1 ненагруженного элемента, рассматриваемого в качестве самостоятельного параметра, что видно на рис. 4, где их влияние представлено горизонтальными линиями. Влияние t_1 на K_t будет заметным в случае нагружения соединения косым изгибом, то есть при приложении момента с одной стороны горизонтального элемента и закреплении на другой стороне.



a) *b*)

Рис. 3. Влияние изменения радиуса R и усиления шва q на K_t при растяжении и изгибе в соединениях с параметрами: *a*) - $t = t1 = 10$ мм, $K_g = 10$ мм, $K_b = 6$ мм; *b*) - $t = 40$ мм, $t1 = 20$ мм, $K_g = 12$ мм, $K_b = 20$ мм

Для соединения с параметрами $K_g = K_b = 10$ мм, $q = 0$, $R = 0.2$ по очереди варьировались толщины t и t_1 в диапазоне от 0 до 60 мм (для толщины 60 мм выполнены дополнительные расчеты МКЭ). Видно, что влияние толщины t гораздо существеннее при изгибе, K_t меняется от 3.16 до 4.18, в то время как при растяжении K_t меняется от 4.16 до 5.0.

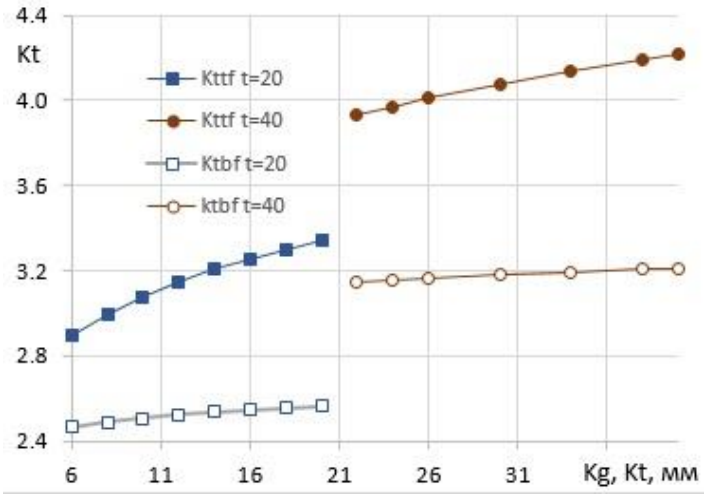


Рис. 4. Влияние на K_t толщин элементов t и t_1 по результатам расчетов МКЭ в соединении с $K_g = K_b = 10$ мм, $q = 0$, $R = 0.2$

Катеты сварного соединения влияют на концентрацию напряжений в меньшей степени, к тому же они являются только относительно независимыми, так как связаны с толщинами соединяемых элементов. Но при определенных толщинах катеты могут быть выполнены различной величины и в этих пределах имеют самостоятельной влияние на концентрацию. На рис. 5 показано влияние катетов K_g и K_b на примере двух соединений, отличающихся друг от друга толщинами элементов: в одном соединении $t = t_1 = 20$ мм, в другом $t = t_1 = 40$ мм, остальные параметры одинаковы: $q = 0$, $R = 0.8$. Оба катета менялись одинаково возрастанием на 2 мм и поэтому отражают одновременное влияние двух катетов. Увеличение размеров катетов приводит к росту концентрации напряжений, этот рост более значителен при растяжении (верхние линии на графике), чем при изгибе. Также видно, что влияние катетов выше в соединениях с более тонкими элементами.

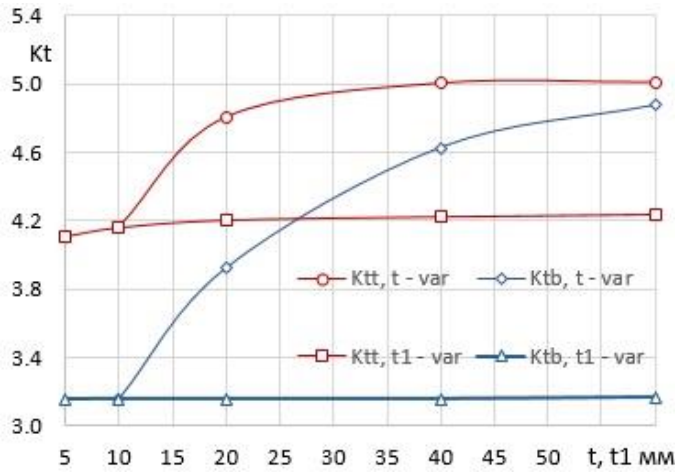


Рис. 5. Влияние изменения размеров катетов шва на K_t в соединении с толщинами $t = t_1 = 20$ мм, и соединении с толщинами $t = t_1 = 40$ мм, при остальных одинаковых параметрах $q = 0$, $R = 0.8$

Зависимости K_{ttf} и K_{tbf} сравнивались с наиболее известными из литературы зависимостями теоретических коэффициентов концентрации напряжений, анализ которых проведен в работе [20] и в ней же приведены выражения этих зависимостей. В данном исследовании массив расчетов МКЭ расширен, к тому же зависимости (3) и (4) получены при более широком диапазоне изменения геометрических параметров соединения. Зависимости для расчета K_t [1-17, 18] можно разделить на две группы: инженерные и полиномиальные. Зависимости в работах [15] и [17] представлены в виде регрессионного уравнения, с большим числом вычисляемых коэффициентов, выраженных через полиномы. Как показано в работе [20], они обладают хорошей точностью в исследованном диапазоне варьируемых параметров, но не удобны для инженерных расчетов на бумаге или калькуляторе, требуют программных вычислений. Остальные зависимости имеют инженерный вид, но ограничены в использовании числом учитываемых геометрических параметров, исследованным диапазоном их варьирования, видом нагружения или не всегда показывают удовлетворительную точность [20].

На рис. 6 показано соответствие расчетных значений K_{tt}, полученных по зависимостям (3) и (4), а также по известным литературным зависимостям, результатам расчета в Ansys крестового соединения при растяжении с геометрическими размерами: t = 40 мм, t_1 = 20 мм, K_g = 12 мм, K_b =20 мм, q = 0.

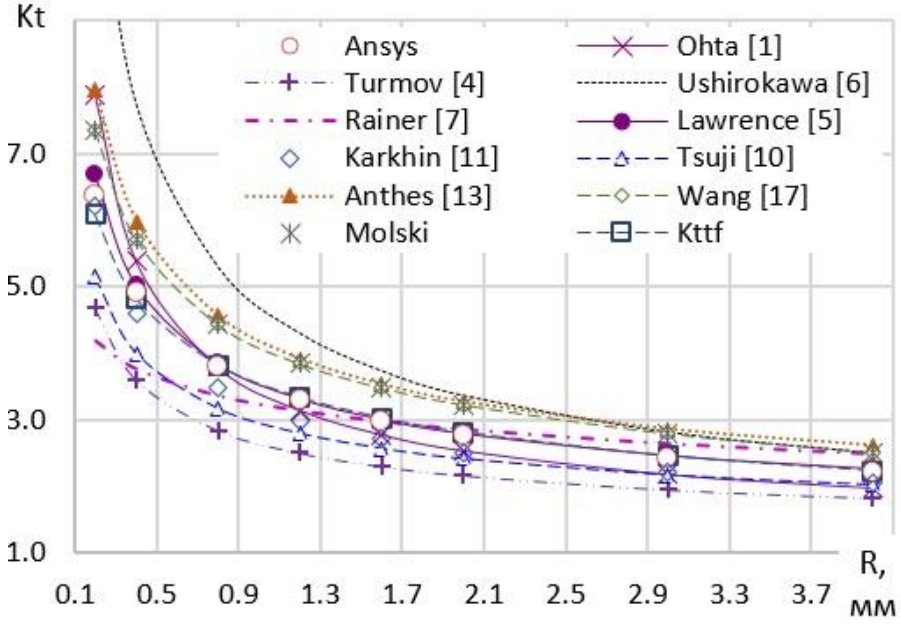


Рис. 6. Соответствие результатам расчета МКЭ при растяжении зависимости K_{ttf} и известных зависимостей [20] в соединении с размерами: t = 40 мм, t_1 = 20 мм, K_g = 12 мм, K_b =20 мм, q = 0

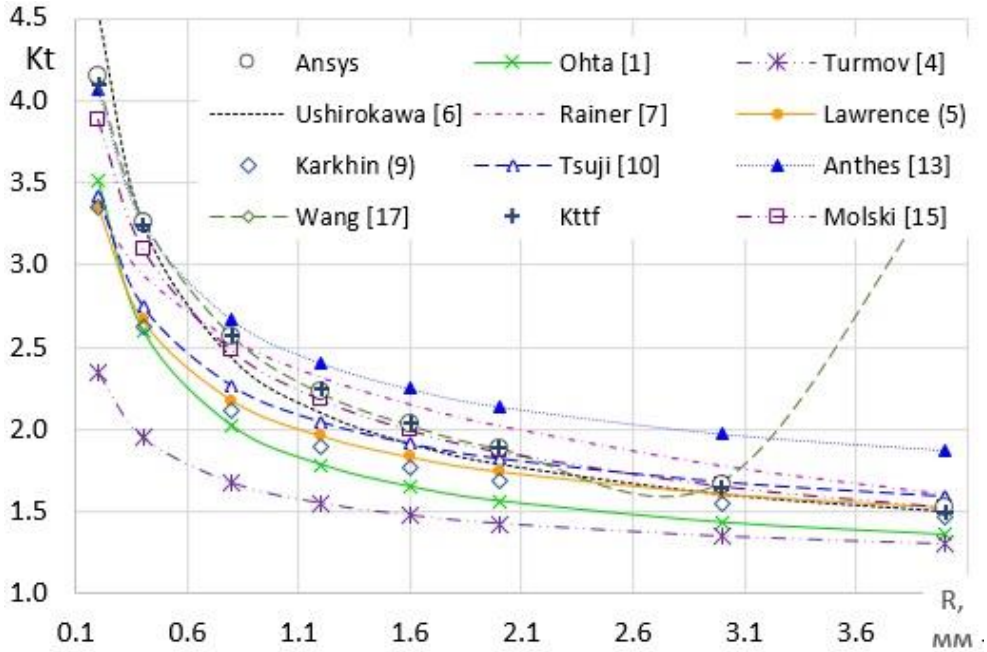


Рис. 7. Соответствие результатам расчета МКЭ при растяжении зависимости K_{ttf} , известных зависимостей [20] в соединении с размерами: t = 8 мм, t_1 = 12 мм, K_g = 7 мм, K_b = 9 мм, q = 0

Графики построены в зависимости от изменения радиуса R в диапазоне от 0.2 до 4 мм, как наиболее влияющего на концентрацию параметра. Точки Ansys и K_{ttf} совпадают практически полностью, такой же результат показывает и зависимость Lawrence [5], близкий результат зависимость Ohta [1]. Остальные зависимости показывают различные отклонения от Ansys, судить о которых можно по положению соответствующих графиков. На рис. 7 представлено аналогичное сравнение этих зависимостей при растяжении, но при других геометрических параметрах: t = 8 мм, t_1 = 12 мм, K_g = 7 мм, K_b = 9 мм, q = 0. Также можно видеть практически полное совпадение точек Ansys и K_{ttf}, а также зависимости Molski [15], но хорошего соответствия других зависимостей, как и зависимости Lawrence [5] в этом случае, не наблюдается. Отдельно следует отметить зависимость Wang [17], показывающую хорошее совпадение при изменении R = 0.2 - 2 мм, но при R > 2.8 мм зависимость не применима. К тому же эта зависимость не инженерного вида. Судить о степени близости Ansys остальных зависимостей можно по положению их графиков.

Также проведено сравнение результатов расчетов Ansys с зависимостью K_{tbf} (4) и с наиболее известными из литературы зависимостями теоретических коэффициентов концентрации напряжений при изгибе. Результаты сравнения приведены на примере двух соединений с размерами: t = 10 мм, t_1 = 8 мм, K_g = 8 мм, K_b = 6 мм, q = 0 и t = 10 мм, t_1 = 10 мм, K_g = 6 мм, K_b = 10 мм, q = 0 и показаны на рис. 8 и 9. На обоих рисунках отмечается точное совпадение точек Ansys и $K_{tbf.}$. На рис. 8 видно также же хорошее совпадение зависимости Wang [17] на участке

изменения R = 0.2 – 1.2 мм, но далее кривая резко растет вверх. В узком диапазоне R = 0.2 - 0.4 мм совпадение показывают зависимости [10 и 13], но при больших значениях R расхождения существенные.

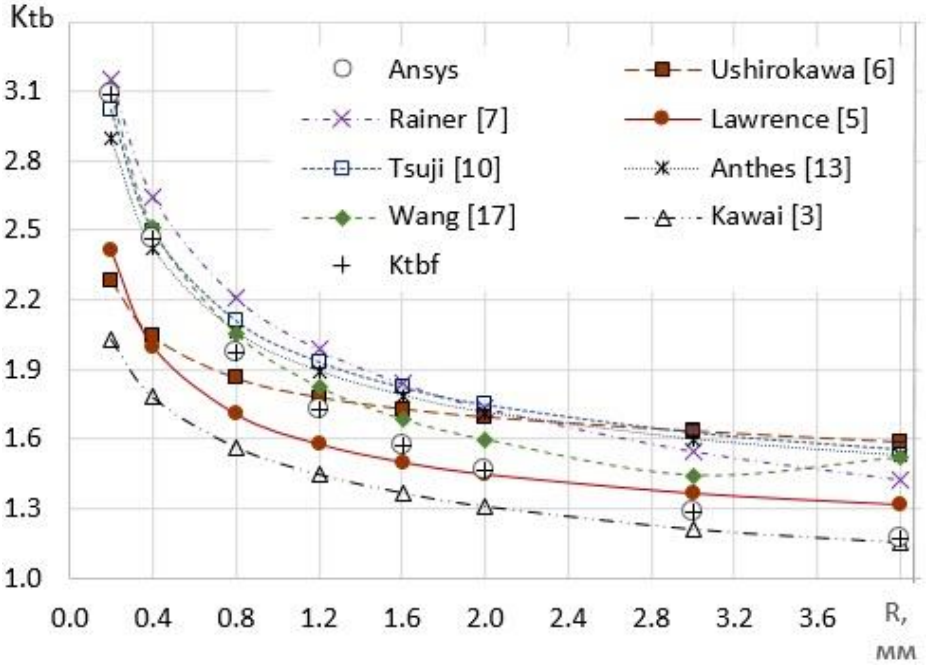


Рис. 8. Соответствие результатам расчета МКЭ при изгибе зависимости K_{tbf} и известных зависимостей [20] в соединении с размерами: t = 10 мм, t_1 = 8 мм, K_g = 8 мм, K_b = 6 мм, q = 0

Для соединения, показанного на рис. 9, отмечается, хорошее совпадение с Ansys зависимостей и Anteres [13] и Molski [15], зависимость Wang [17] применима при R< 3 мм. Но, как уже отмечалось, зависимостей Molski [15] и Wang [17] не инженерные.

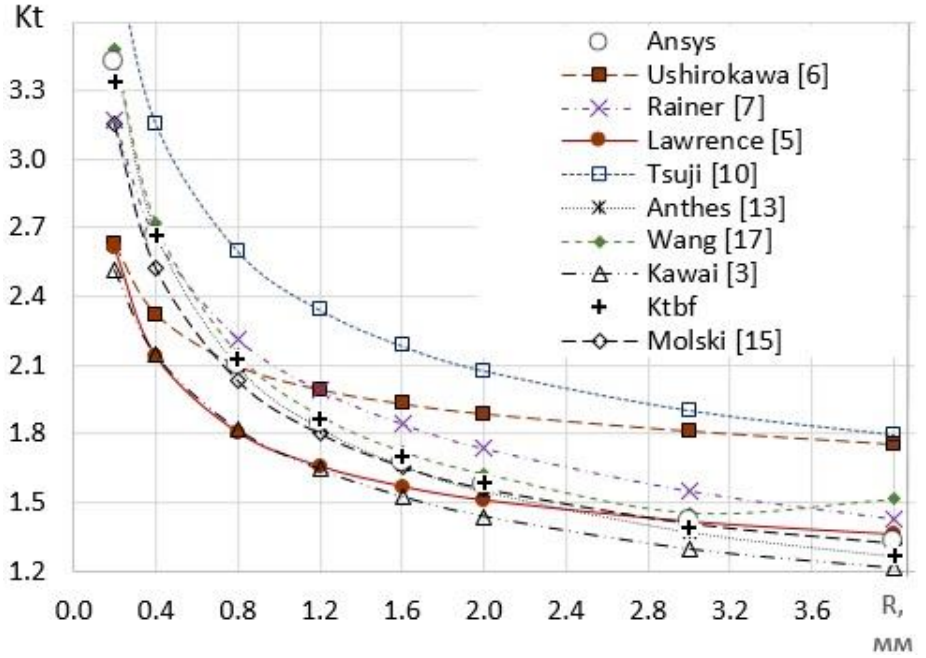


Рис. 9. Соответствие результатам расчета МКЭ при изгибе зависимости K_{tbf} и известных зависимостей [20] в соединении с размерами: t = 10 мм, t_1 = 10 мм, K_g = 6 мм, K_b = 10 мм, q = 0

Заключение

Выполненные расчетные исследования в Ansys и полученные на их основе зависимости (3), (4) позволяют на стадии проектирования оценивать концентрацию напряжений в сопряжении основного металла с наплавленным как при растяжении, так и при изгибе. Расчетные зависимости K_{ttf} и K_{tbf} охватывают диапазон варьирования абсолютных значений параметров t = 6 - 40 мм $t1$ = 5 - 40 мм, K_g = 5 - 40 мм, K_b = 6 - 40 мм, q = 1 - 2 мм, R = 0.2 - 4 мм и их относительных значений t_1/t = 0.25 – 2.0, и K_b/K_g = 0.25 - 4.0, K_g/t = 0.25 – 1.0, R/t = 0.005 – 0.667.

Зависимости учитывают усиление сварного шва, которое, как показал анализ, оказывает влияние на концентрацию только при небольших толщина листов. Существенное влияние на концентрацию оказывают радиус сопряжения основного металла с наплавленным и толщина элемента, к которому прикладывается нагрузка. Также на K_t влияют катеты сварного шва, но несколько меньше.

Средняя ошибка в определении K_{ttf} при растяжении, по сравнению с расчетами МКЭ, составляет 3,9 %, средняя ошибка в определении K_{tbf} составляет 3,5 %, что можно рассматривать как приемлемый для инженерных расчетов результат.

Известные из литературы зависимости для расчета K_t в крестовом соединении для каких-то комбинаций геометрических параметров показывают хорошие совпадения с вычислениями МКЭ, но при других комбинациях неудовлетворительное совпадение. Зависимости [15, 17] ограничены своим исследовательским диапазоном геометрических параметров и требуют программных вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ohta S., Eguchi Y. Fatique strength of arc-welded joints in 80 kg/mm2 hidh strength steel. – J. Jap. Weld. Soc., 1974, N 4, p. 19-28.

[2] Nishida M. Stress Concentration. Tokyo: Morikita Publishing Co, 1967. 168 p.

[3] Effect of finishes of weld toe on fatique strength of welded high strength steels/ S. Kawai, I. Miyamoto, T. Shiono, S. Saikawa. – Ibid., 1979, N 9, p. 44-51.

[4] Турмов Г.Л. Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях / Г.Л. Турмов // Автоматическая сварка. – 1976. - №10. – С. 14-17

[5] Lawrence, F.V.; Ho, N.J.; Mazumdar, P.K. Predicting the fatigue stress analysis of weldments. Annu. Rev. Mater. Sci. 1981, 11, 401–425.

[6] Ushirokawa, O., Nakayama, E. Stress concentration factor at Welded Joints. Ishikawajima-Harima Eng. Rev. 1983. 23. pp. 351-355.

[7] Rainer G. Parameterstudien mit finiten Elementen, Berechnung der Bauteilfestigkeit von Schweißverbindungen unter äußeren Beanspruchungen. Konstruktion.1983. 37(2). pp. 45–52
[8] Yung J.L., Lawrence F.V. Analytical and graphical aids for the fatigue design of weldments. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1985 8(3):223–241
[9] Кархин В.А., Костылев В.И., Стаканов В.И.: Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений. Автоматическая сварка. 1988. N 3. pp. 6-11.
[10] Tsuji I. Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints. Trans West Jpn Soc Naval Architects 80: 1990. pp. 241–251.
[11] Radaj D, Zhang S () Mehrparametrige Strukturoptimierung hinsichtlich Spannungserhöhungen. Konstruktion 1990. 42.pp. 89–292
[12] Radaj D, Zhang S Multiparameter design optimisation in respect of stress concentrations. In: Springer-Verlag (ed) engineering optimisation in design processes. Springer, Berlin, 1991. pp 181–189
[13] Anthes RJ, Köttgen VB, Seeger T Kerbformzahlen von Stumpfstößen und Doppel-T-Stößen. Schweissen und Schneiden. 1993. 45(12). pp. 685–688
[14] Anthes RJ, Köttgen VB, Seeger T. Einfluß der Nahtgeometrie auf die Dauerfestigkeit von Stumpf- und DoppelT-Stößen. Schweissen und Schneiden. 1994. 46(9). pp. 433–436
[15] Molski K.L., Tarasiuk P., Glinka G. Stress concentration at cruciform welded joints under axial and bending loading modes. Weld World 2020, 1– 10.
[16] Oswald M., Mayr C. Rother K. Determination of notch factors for welded cruciform joints based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2019. 63. pp. 1339-1354.
[17] Wang Y., Luo Y., Tsutsumi S. Parametric Formula for Stress Concentration Factor of FilletWeld Joints with Spline Bead Profile. Materials. 2020, 13, 4639
[18] Манжула, К.П. Теория и методы расчета сопротивления усталости металлических конструкций грузоподъемных машин: дис. … д-ра техн. наук: СПб, 1997. 356 с.
[19] Oswald M., Mayr C. Rother K. Determination of notch factors for welded cruciform joints based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2019. 63. pp. 1339-1354.
[20] Манжула К.П., Шлепетинский А.Ю. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в крестовом сварном соединении // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 12-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: Политех-пресс, 2023. С. 369-387.

[21] Манжула К.П, Юшкевич В.Н. Васильев В.Г. Об изменении предела выносливости металла в зоне термического влияния сварных соединений стали 09Г2С // Автоматическая сварка. - 1982.- № 2.- С. 48-50.
[22] Аргунова А.А., Адамов Р.Г., Кыппыгыров С.В. Исследование микроструктуры и ударной вязкости околошовной зоны (ошз) сварных соединений из стали ст.3пс и стали 09Г2С, сваренных одно и двухпроходной сваркой при температуре +200с и -400с электродом марки уони-13/55 //Актуальные научные исследования в современном мире, вып. 2(70) ч.8, С.14-22.
[23] Халикова Г.Р., Шерматов Д.Н,, Наумкин Е.А. Структура и механические свойства стали 09Г2С в кольцевой заготовке, изготовленной центробежным электрошлаковым литьем // Материаловедение и защита от коррозии. 2020, т.18, №5. С. 104-113.
[24] Мордовский П.Г. Повышение физико-механических и эксплуатационных свойств ферритно-перлитной стали при мегапластическом деформировании и низкотемпературном отжиге. диссертация. Комсомольск-на-Амуре, 2014, 136 с.
[25] Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматгиз, 2006. - 325 с.
[26] Крыжевич Г.Б. Методы расчета предельной и усталостной прочности конструкций морской техники в низкотемпературных условиях. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 2(388): 41–54.

K.P.Manzhula[1], A.Y. Shlepetinskiy[2]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia
[2]Engineering Center JSC "Nevsky Zavod"

STRESS CONCENTRATION FACTORS AT THE WELD TOE OF CRUCIFORM JOINT UNDER TENSION AND BENDING

Abstract

Dependencies for calculating the theoretical stress concentration factors at the weld toe of cruciform joint under tensile and bending loads have been obtained. A joint with full weld root penetration is considered. The stress-strain state is studied using the finite element method with varying geometric parameters of the joint, followed by processing the computational experiment and constructing a nonlinear regression model. The obtained dependencies are assessed in comparison with the results of the computational experiment, as well

as with known calculated dependencies. The advantage of the obtained dependencies is their compact form, applicable for engineering calculations, as well as the most complete consideration of the influencing geometric parameters.

Key words: cruciform welded joint, theoretical stress concentration factor, tension, bending, finite element method, calculated dependencies

REFERENCES

[1] Ohta S., Eguchi Y. Fatique strength of arc-welded joints in 80 kg/mm2 hidh strength steel. – J. Jap. Weld. Soc., 1974, N 4, p. 19-28.
[2] Nishida M. Stress Concentration. Tokyo: Morikita Publishing Co, 1967. 168 p.
[3] Effect of finishes of weld toe on fatique strength of welded high strength steels/ S. Kawai, I. Miyamoto, T. Shiono, S. Saikawa. – Ibid., 1979, N 9, p. 44-51.
[4] Turmov G.L. Determination of the stress concentration factor in welded joints / G.L. Turmov // Automatic Welding. – 1976. - No. 10. – pp. 14-17
[5] Lawrence, F.V.; Ho, N.J.; Mazumdar, P.K. Predicting the fatigue stress analysis of weldments. Annu. Rev. Mater. Sci. 1981, 11, 401–425.
[6] Ushirokawa, O., Nakayama, E. Stress concentration factor at Welded Joints. Ishikawajima-Harima Eng. Rev. 1983. 23. pp. 351-355.
[7] Rainer G. Parameterstudien mit finiten Elementen, Berechnung der Bauteilfestigkeit von Schweißverbindungen unter äußeren Beanspruchungen. Konstruktion.1983. 37(2). pp. 45–52
[8] Yung J.L., Lawrence F.V. Analytical and graphical aids for the fatigue design of weldments. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1985 8(3):223–241
[9] Karkin V.A., Kostylev V.I., Stakanov V.I.: Influence of geometric parameters of butt, T-joint, and cruciform joints on the stress concentration factor. Automatic Welding. 1988. No. 3. pp. 6-11.
[10] Tsuji I. Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints. Trans West Jpn Soc Naval Architects 80: 1990. pp. 241–251.
[11] Radaj D, Zhang S () Mehrparametrige Strukturoptimierung hinsichtlich Spannungserhöhungen. Konstruktion 1990. 42.pp. 89–292
[12] Radaj D, Zhang S Multiparameter design optimisation in respect of stress concentrations. In: Springer-Verlag (ed) engineering optimisation in design processes. Springer, Berlin, 1991. pp 181–189
[13] Anthes RJ, Köttgen VB, Seeger T Kerbformzahlen von Stumpfstößen und Doppel-T-Stößen. Schweissen und Schneiden. 1993. 45(12). pp. 685–688

[14] Anthes RJ, Köttgen VB, Seeger T. Einfluß der Nahtgeometrie auf die Dauerfestigkeit von Stumpf- und DoppelT-Stößen. Schweissen und Schneiden. 1994. 46(9). pp. 433–436
[15] Molski K.L., Tarasiuk P., Glinka G. Stress concentration at cruciform welded joints under axial and bending loading modes. Weld World 2020, 1– 10.
[16] Oswald M., Mayr C. Rother K. Determination of notch factors for welded cruciform joints based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2019. 63. pp. 1339-1354.
[17] Wang Y., Luo Y., Tsutsumi S. Parametric Formula for Stress Concentration Factor of FilletWeld Joints with Spline Bead Profile. Materials. 2020, 13, 4639
[18] Manzhula, K.P. Theory and methods for calculating the fatigue resistance of metal structures of lifting machines: diss. … Dr. tech. sciences: St. Petersburg, 1997. 356 p.
[19] Oswald M., Mayr C. Rother K. Determination of notch factors for welded cruciform joints based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2019. 63. pp. 1339-1354.
[20] Manzhula K.P., Shlepetyinsky A.Yu. Theoretical stress concentration coefficients in cruciform welded joint // Modern Machine Engineering: Science and Education: materials of the 12th International Scientific Conference / Edited by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. - St. Petersburg: Polytech-Press, 2023. pp. 369-387.
[22] Argunova A.A., Adamov R.G., Kypygyrov S.V. Study of microstructure and impact toughness of the heat-affected zone (HAZ) of welded joints made of steel St.3ps and steel 09G2S, welded using single and double-pass welding at temperatures of +200°C and -400°C with the UONI-13/55 electrode // Current Scientific Research in the Modern World, vol. 2(70) no. 8, pp. 14-22.
[23] Khalikova G.R., Shermatov D.N., Naumkin E.A. Structure and mechanical properties of steel 09G2S in a ring billet made by centrifugal electroslag casting // Materials Science and Corrosion Protection. 2020, vol. 18, No. 5. pp. 104-113.
[24] Mordovsky P.G. Improvement of the physicomechanical and operational properties of ferrite-pearlite steel during megaplastic deformation and low-temperature annealing. dissertation. Komsomolsk-on-Amur, 2014, 136 p.
[25] Matviyenko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow: Fizmatlit, 2006. - 325 p.
[26] Kryzhevich G.B. Methods for calculating the ultimate and fatigue strength of marine technology structures in low-temperature conditions. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2019; 2(388): 41–54.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ. СТАНКОСТРОЕНИЕ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 658.5
doi:10.18720/SPBPU/2/id-145

Е.Г. Деева[1], Д.П. Гасюк[2]

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ



[1]Елизавета Георгиевна Деева,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)323-6279, E-mail: deeva.eg@edu.spbstu.ru.



[2]Дмитрий Петрович Гасюк,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт- Петербург
Тел.: (911)281-0772, E-mail: cz_tipt@mail.ru.

Аннотация

В статье представлена методика обоснования рационального состава средств измерения (СТК) для обеспечения качества продукции в машиностроении. Авторы выделяют семь ключевых этапов выбора СТК, включая анализ характеристик объекта контроля, оценку метрологических параметров, прогнозирование ошибок контроля и технико-экономическое обоснование. Особое внимание уделяется снижению трудоемкости и повышению достоверности контроля, а также минимизации экономических потерь от брака. Методика основана на рекомендациях стандартизации и включает инструменты для сравнения различных средств измерения.

Ключевые слова: средства контроля, качество продукции, технический контроль, измерения, ошибки контроля, экономическая эффективность.

Введение

Уровень качества продукции является важнейшим показателем работы предприятия. Правильный выбор средств технического контроля

(СТК) обеспечивает повышение достоверности информации о качестве продукции, является существенной предпосылкой повышения качества продукции.

Методы

Для достижения поставленной цели обеспечения заданного уровня качества продукции машиностроения предполагает использование методик, которые уже активно применяются в производстве.

Результаты

Важным фактором, влияющим на достоверность информации о качестве продукции при проведении технического контроля, является рациональный выбор СТК.

Методика рационального выбора СКТ качества продукции машиностроения разработана с учётом рекомендаций по стандартизации [1]. Методика содержит и отражает содержание семи этапов выбора данных средств:

Этап 1

Анализ характеристик объекта контроля и показателей процесса контроля. Постановка измерительной задачи.

Этап 2

Анализ нормированных метрологических характеристик парка средств измерений (СИ) организации, которые могут быть использованы как СТК представляемой на технический контроль продукции.

Этап 3

Анализ состава СТК, их возможностей по получению первичной информации о нескольких контролируемых параметрах и оформлению результатов контроля.

Этап 4

Сравнительный анализ потребностей в нормированной точности технического контроля и инструментальной погрешности выбранных для контроля СИ.

Этап 5

Прогнозная оценка вероятности возникновения ошибок контроля 1 и 2-го рода

Этап 6

Оценка оперативности подготовки СТК, проведения и обработки результатов технического контроля качества продукции.

Этап 7

Технико-экономическая оценка обоснованности выбора СТК.

Исходные данные для проведения анализа характеристик объекта контроля и показателей процесса контроля содержатся в конструкторской и технологической документации, содержащей, в том числе, и информацию об объеме выпуска и сроках реализации продукции, подлежащей контролю. К исходным данным относятся: номинальные значения параметров, подлежащих контролю, их максимально и минимально допустимые отклонения, поля допуска изменения данных параметров, которые позволяют провести метрологически нормированный выбор СИ, обеспечивающий получение достоверных значений, подвергаемых техническому контролю параметров продукции.

Анализ нормированных метрологических характеристик, устройство, особенности применения парка СИ организации осуществляется на основе изучения их эксплуатационной документации. Основным критерием выбора СИ в качестве СТК в соответствии с [2] является тот факт, что предел допустимой инструментальной погрешности СИ, выбранного в качестве СТК, не приводящей к возникновению ошибок 1 и 2-го рода, должен составлять 0,2 - 0,3 границы симметричного допуска на подлежащий контролю определяющий параметр продукции [3]. Для обеспечивающий параметров, не относящихся к определяющим - 0,5. При несимметричных границах допуска или одностороннем допуске может быть использовано то же значение (0,5) для соотношения пределов допускаемых значений погрешности измерений и размера поля допуска.

Анализ состава СТК, их возможностей по получению первичной информации о нескольких контролируемых параметрах осуществляется на основе изучения классификаторов средств контроля, каталогов средств контроля, стандартов на средства контроля. Порядок и особенности оформления результатов контроля анализируется с учётом рекомендаций государственной системы обеспечения единства измерений (ГС ОЕИ) [4].

Сравнительный анализ потребностей в нормированной точности технического контроля и инструментальной погрешности выбранных для контроля СИ осуществляется путём сопоставления размеров полей допуска, подлежащих контролю определяющих и обеспечивающих параметров продукции и величин инструментальной погрешности выбранных для осуществления технического контроля СИ при

соблюдении требований, регламентированных требованиями ГОСТ 19919-74 [3].

Прогнозная оценка вероятности возникновения ошибок контроля 1 и 2-го рода по результатам технического контроля осуществляется в соответствии с рекомендациями по технологическому проектированию технического контроля [5].

Оценка оперативности подготовки СИ, проведения и обработки результатов технического контроля качества продукции осуществляется на основе изучения их эксплуатационной документации, классификаторов средств контроля, каталогов средств контроля, стандартов на средства контроля. Важным фактором результатов оценки оперативности технического контроля является снижение трудоемкости контроля, особенно в процессах с тяжелыми и вредными условиями труда путём возможного совмещения операций технического контроля на основе применения автоматизированных систем контроля и многоканальных измерительных систем.

Технико-экономическая оценка обоснованности выбора средства контроля осуществляется в соответствии с положениями [5]. Определяется состав средства контроля, для того чтобы обеспечить технический контроль необходимых, определяющих и обеспечивающих параметров качества продукции и выявление потребности в изготовлении специальных средств контроля. Для этого используется картотека применяемости средств контроля.

На основе собранных данных формируют таблицу для сравнения предполагаемых СИ, выбираемых в качестве СТК, для формирования рационального состава СТК, представленную на рисунке 1.

	Средство измерения 1	Средство измерения 2
Погрешность	Δ1	Δ2
Трудоемкость	Т1 чел/ч	Т2 чел/ч
Затраты	Х у.е.	У у.е.

Рис. 1. Табица сравнения средств измерения

Вероятность ошибок 1 и 2-го рода определяется по оперативной характеристике, представленной на рисунке 3 в соответствии с [5]. На данном графике P(q) - вероятность возникновения ошибки при проведении технического контроля, а q - средний входной уровень дефектности (доля брака), %.

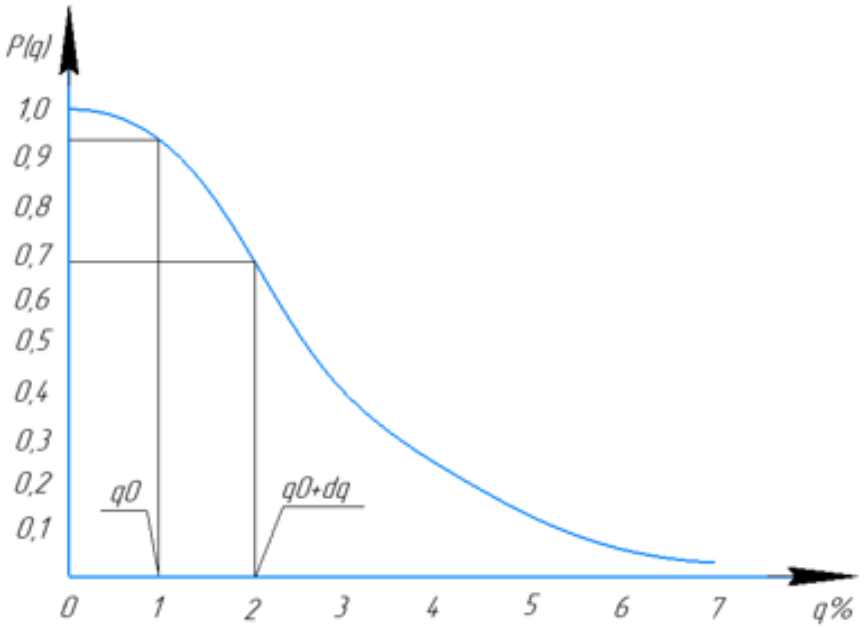


Рис. 2. Оперативная характеристика

Обсуждение

Оценка трудоемкости контроля определяется как время, затрачиваемое для проведения операций технического контроля в процессе изготовления единицы продукции. На основе оценки трудоемкости составляется производственный план.

Расчет коэффициента трудоемкости рассчитывается по зависимости

$$T_p = \frac{T}{Q}, \qquad (1)$$

где T - продолжительность времени выполнения производственного плана;

Q - количество продукции, подвергаемой техническому контролю.

В процессе анализа затрат на реализацию процесса контроля необходимо учитывать:

- объем выпуска и сроки изготовления продукции;
- технические требования к продукции;
- технические возможности средств контроля;
- затраты на приобретение средств контроля и поверочного оборудования и их эксплуатацию.

Экономическое обоснование рационального варианта состава СТК предлагается осуществлять с помощью комплексного экономического

показателя -Кэ, представляющего собой сумму приведенных затрат на реализацию процесса контроля -Зк и потерь от брака вследствие ошибок контроля или его отсутствия - Пб.

$$Кэ = Зк + Пб . \quad (2)$$

Заключение

Представленная методика рационального выбора СТК качества продукции обеспечит заданные показателя процесса контроля с учетом затрат на его реализацию и потерь от брака в производстве и при использовании продукции вследствие ошибок контроля или его отсутствия.

Отличительной особенностью данной методики является то, что её реализация позволяет учитывать определяющие факторы организации и проведения процесса технического контроля:

- трудоемкость контроля;
- характеристики достоверности контроля путём проведения оценок вероятности возникновения ошибок 1 и 2-го рода в процессе проведения технического контроля качества продукции;
- комплексный экономический показатель трудозатрат проведения технического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Р 50-609-39-01. Правила выбора средств контроля. Рекомендации по порядку выбора и требованиям к контролю.

[2] ГОСТ 14.201-83 Единая система технологической подготовки производства. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования.

[3] ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения.

[4] МИ 1317-2004. Рекомендации государственной системы обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

[5] Р 50-609-40-01. «Рекомендации. Технологическое проектирование технического контроля».

E.G. Deeva, D.P.Gasyuk

METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE RATIONAL COMPOSITION OF MEASURING INSTRUMENTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article presents the methodology of justification of rational composition of measuring instruments (MI) to ensure product quality in mechanical engineering. The authors distinguish seven key stages of measuring instrument selection, including the analysis of the characteristics of the object of control, evaluation of metrological parameters, prediction of control errors and feasibility study. Particular attention is paid to reducing labor intensity and increasing the reliability of control, as well as minimizing economic losses from rejects. The methodology is based on standardization recommendations and includes tools for comparing different measuring instruments.

Key words: means of control, product quality, technical control, measurements, control errors, economic efficiency.

REFERENCES

[1] R 50-609-39-01. Pravila vybora sredstv kontrolja. Rekomendacii po porjadku vybora i trebovanijam k kontrolju [Rules for the selection of controls].
[2] GOST 14.201-83 Provision of technological efficiency of design production. General requirements.
[3] GOST 19919-74 Test automated of technical condition of aviation technique articles, Terms and definitions.
[4] MI 1317-2004 Rekomendacii gosudarstvennoj sistemy` obespecheniya edinstva izmerenij. Rezul`taty` i xarakteristiki pogreshnosti izmerenij. Formy` predstavleniya. Sposoby` ispol`zovaniya pri ispy`taniyax obrazczov produkcii i kontrole ix parametrov [Recommendations of the state system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement error results and characteristics. Forms of representation. Methods of use in testing product samples and monitoring their parameters].
[5] R 50-609-40-01. Tekhnologicheskoe proektirovanie tekhnicheskogo kontrolya [Technological design technical control].

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК (621.9)
doi:10.18720/SPBPU/2/id-146

С.П. Тимофеев[1], А.В. Гринек[2]

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ОСЬЮ



[1] Сергей Петрович Тимофеев,
АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: timofeevsp@inbox.ru



[2] Анна Владимировна Гринек,
ООО «Сигматек»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: grinyokann@gmail.com

Аннотация

В работе представлены результаты исследования технологии механической обработки поверхности катания крупногабаритных опор технологических барабанов на основе предложенного программно-аппаратного комплекса. Показана методика цифровой реконструкции формы замкнутой криволинейной поверхности, использующая пошаговое измерение, алгоритмы аппроксимации и расчета погрешности формы. Представлены оптимальные алгоритмы построения технологического процесса механической обработки и расчета соответствующих режимов резания с применением предложенной конструкции обрабатывающего модуля. Результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют повысить эффективность механической обработки за счет сокращения основного технологического времени.

Ключевые слова: механическая обработка, реконструкция, цифровой, нестационарная ось, измерение, припуск, измерительная система

Введение

Объект исследования – технологический процесс механической обработки поверхности катания крупногабаритных опор технологических барабанов непосредственно в процессе их эксплуатации. Особенностями механической обработки являются: крупный размер изделия, использование мобильного станочного оборудования, нестационарное положение оси вращения изделия в процессе обработки и необходимость контроля формы и коррекции величины снимаемого припуска в процессе механической обработки, а также сложность обеспечения постоянства технологической базы при обработке [1-3].

Для решения задач описания формы цилиндрических тел применяются следующие основные подходы к описанию:

1. Представление формы поверхности в виде гармонического ряда Фурье. Производные функции дают почти исчерпывающее представление о форме поверхности с точки зрения статики, кинематики и динамики механизма [4].
2. Анализ временных рядов (вейвлет-анализ, анализ сингулярного спектра, фрактальный анализ) [5].
3. Аппроксимация минимальных и максимальных описывающих окружностей [6,8].

Кроме использования данных об измерении геометрических параметров детали могут применяться лазерные [9,10] и оптические системы [11,12]. В свою очередь, реконструированная форма поверхности является частью измерительной системы активного контроля и наладки мобильного оборудования для восстановления формы [13,14]. Процесс обработки при монтаже или восстановлении подобных изделий может быть построен с применением различных машиностроительных технологий: абразивной или лезвийной обработки, наплавления. Используемое при этом оборудование требует разработки схем наладки, управления режимами обработки и наличия оригинального станочного оборудования.

Методы

Представленная технология механической обработки крупногабаритных тел вращения использует оригинальный метод измерения и цифровой реконструкции формы обрабатываемой поверхности. Также разработана конструкция мобильного станочного модуля и программно-аппаратный комплекс, реализованный в измерительной системе. Это позволяет получить пооперационный маршрут механической обработки с возможностью его анализа и корректировки для повышения производительности. Кроме того, корректировка

технологического процесса может автоматически выполняться на основе текущих измерений обрабатываемой поверхности.

Результаты

Ниже представлены основные моменты функционирования разработанной технологии и информационной-измерительной системы:
- принципиальная схема измерения;
- цифровая реконструкция контуров сечений и всей поверхности;
- методика расчета величины погрешности формы;
- организационная диаграмма программного обеспечения информационно-измерительной системы.

Принципиальная схема измерения. Необходимость механической обработки обусловлена наличием погрешности формы, превышающей допустимое значение соответствующим стандартом. Например, для опоры технологического барабана цементной печи одним из основных параметров является биение поверхности катания. Но при этом фактическая ось вращения агрегата не имеет стационарного положения и в общем случае не совпадает с теоретической, ввиду чего определить биение данной поверхности, согласно ГОСТ, является крайне сложной задачей. Поэтому принято решение о переходе от погрешности формы в виде биения к отклонению от круглости/цилиндричности. Данное решение обеспечивает возможность фактического измерения параметра формы, и при выявлении фактического положения оси вращения, возможность пересчета в биение. Для расчета отклонения от круглости отдельного сечения поверхности определяются параметры окружности максимального радиуса, вписанной в реконструированную цифровую версию контура данного сечения [15]. А для расчета отклонения от цилиндричности всей или части поверхности выполняется определение параметров окружности максимального радиуса, вписанной в спроецированные на единую плоскость реконструированные цифровые версии контуров сечений поверхности. При этом реконструированные цифровые версии контуров сечений представлены массивом координат точек. На рис. 1а показана принципиальная конструктивная схема измерительного устройства, позволяющего получить указанный массив данных.

Алгоритм получения массива координат точек пояснен на рис. 1б. Согласно приведенной на рисунке схемы устройство должно иметь три измерительных щупа (*r1, r2, r3*), которые в свою очередь крепятся на корпусе в точках *m.A*; *m.B* и *m.C*. Для обеспечения возможности контакта с поверхностью различной кривизны все щупы имеют возможность изменения угла расположения, за счет установки их шарнирно, и дополнительно щуп *r2* имеет возможность изменять свою длину.

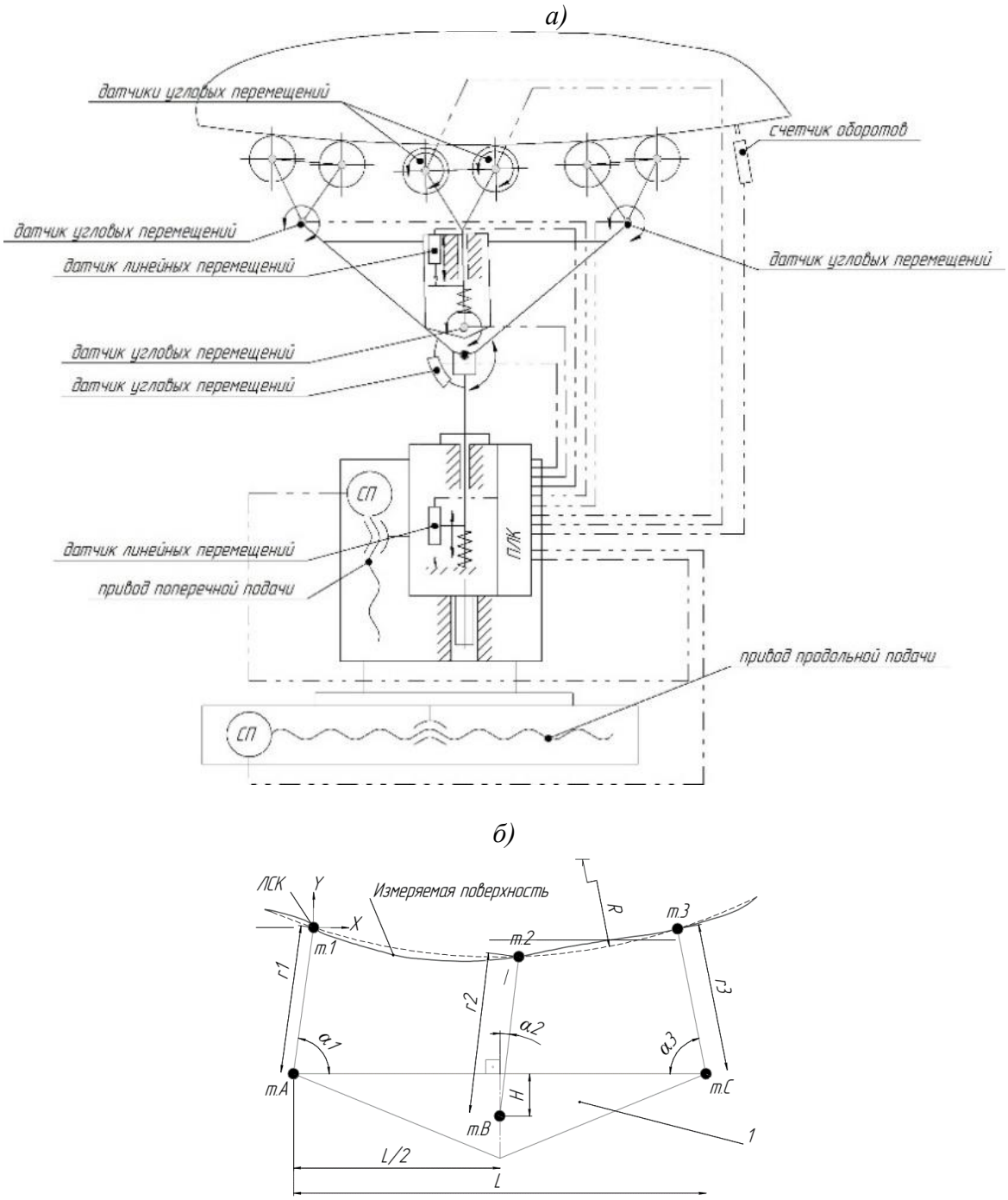


Рис. 1. *а* – принципиальная конструктивная схема измерительного устройства (СП – сервопривод, ПЛК – программируемый логический контроллер); *б* – принципиальная схема измерения (ЛСК – локальная система координат)

Фиксированными углами поворота измерительных щупов *r1* и *r3* относительно плеча *L* соответственно являются углы *α1* и *α3*. Точкой начала системы координат каждой итерации измерения принята *m.1*, с параллельной плечу *L* осью *OX*. Таким образом постоянными величинами являются: *r1*, *α1*, *r3*, *α3*, *L*, *B* и *H*, а переменными: *r2*, *α2*.

Каждая новая итерация измерения производится в момент перехода измерительного устройства в расчетное положение следующим образом (рис. 2):

- в момент старта производится определение координат трех контактных точек *m.1*, *m.2*, *m.3* в ЛСК первого измерения;

- далее устройство переводится в новое положение таким образом, чтобы точка *m.2`* новой итерации измерения совпала с точкой *m.3* предыдущей. Перемещение по поверхности на длину L_d ;

- выполняется следующее определение координат точек *m.1`*, *m.2`*, *m.3`* в ЛСК второго измерения;

- и т.д.

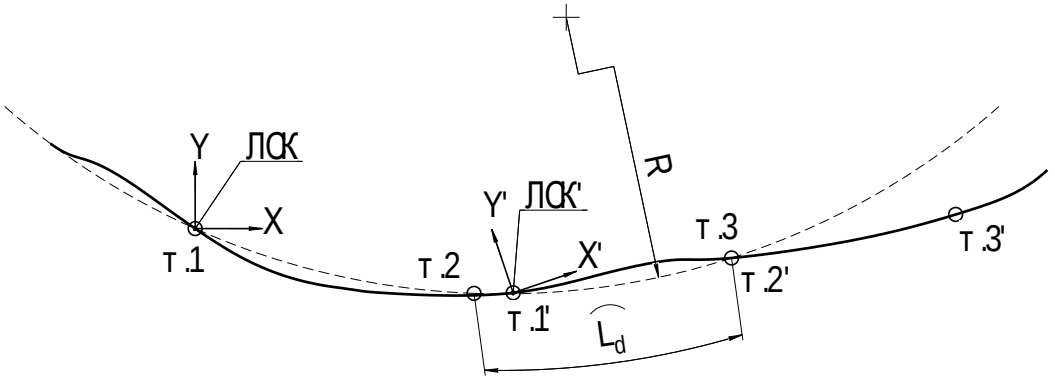


Рис. 2. Схема измерения и аппроксимации контура обрабатываемой поверхности

Методика расчета величины погрешности поверхности. Измерение и цифровая реконструкция поверхности состоит из двух основных этапов: определения координат точек аппроксимирующих дуг в текущем сечении и восстановления геометрической формы контуров во всех сечениях. Далее на основе уже восстановленных контуров сечений выполняется расчет их погрешности формы. Тем самым на данном этапе основной задачей является определение параметров вписанной окружности. Для этого выполняется поиск центра и радиуса наибольшей пустой окружности. При этом задача имеет ограниченное решение так как центр окружности лежит внутри контура сечения. Для его нахождения возможно использовать следующий критерий:

$$\max_{x,\,y}\ \min_{i=1..n}\left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2\right.$$

В рамках нелинейного программирования данный критерий может быть сведен к следующей задаче:

$$\begin{cases} z \to max \\ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 > z, i - 1..n. \end{cases}$$

Приведенную задачу предложено решить методами вычислительной геометрии, а именно с помощью диаграммы Вороного (рис. 3, *а*). Для

определения вписанной в полученный контур окружности максимального радиуса необходимо построить диаграмму Вороного и определить максимальный радиус окружности Делоне, которая и является искомой окружностью [6]. Таким образом, зная параметры вписанной окружности возможно рассчитать и отклонение от круглости. Расчетная схема для определения максимальной погрешности формы в поперечном сечении бандажа представлена на рис. 3, *б*.

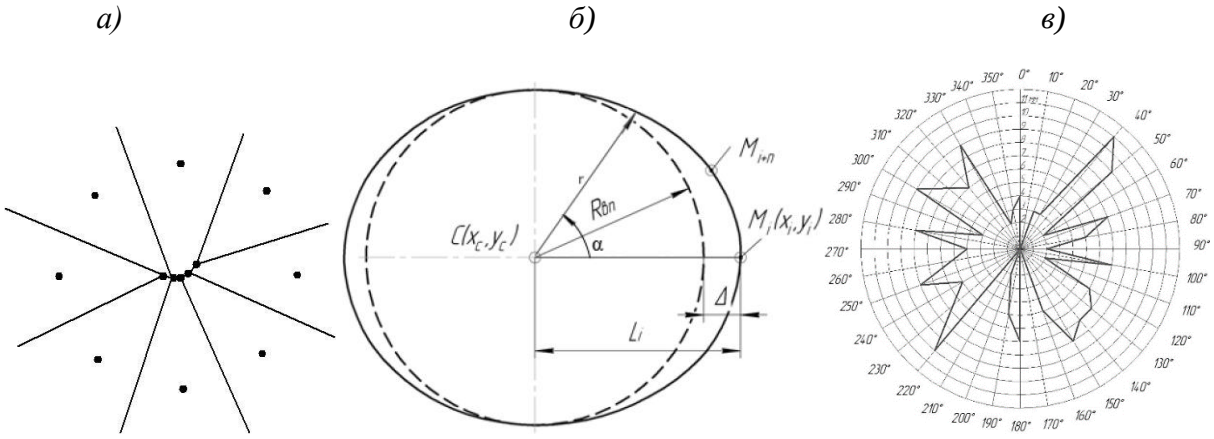


Рис. 3. *а* – диаграмма Вороного для точек, расположенных по контуру близкому к окружности; *б* – схема для определения отклонения от круглости; *в* – круглограмма отклонений

Расчет величин погрешности формы производится в два этапа:

Шаг 1. Рассчитывается расстояние Li от центра вписанной окружности до всех точек Mi контура реконструированного после измерения сечения;

Шаг 2. Далее определяется величина отклонения Δ_i формы, как разность величин Li и величины радиуса окружности. Соответственно максимальное значение Δ_i и будет являться искомой величиной отклонения от круглости.

На основе проведенных расчетов возможно построение круглограммы с величинами отклонений (рис. 3, *б*).

Цифровая симуляция процесса измерения. Современные технологические системы показывают эффективность применения цифровых двойников при проектировании технологических процессов [16-18]. В данной работе использована виртуальная CAD-модель механической обработки изношенной поверхности катания бандажа цементной печи с помощью переносного обрабатывающего модуля. При этом расчет и построение технологического процесса механической обработки выполнен на основе данных, полученных при моделировании процесса измерения и расчета погрешности формы с применением виртуальной модели измерительного устройства. Непосредственный расчет технологических режимов выполнен в программном модуле, учитывающем конструктивные

параметры станочного модуля и точность формы, реконструированной на основе измерения обрабатываемой поверхности.

Применение имитационного моделирования для анализа технических решений позволило значительно сократить временные и финансовые затраты, так как разработка и изготовление предложенных средств оснащения и программного обеспечения, указанных ранее в опытных экземплярах, требует существенных затрат. Тем самым на данном этапе подтвердилась правильность решений и выявлены направления для дальнейшей доработки и оптимизации станка и измерительного устройства.

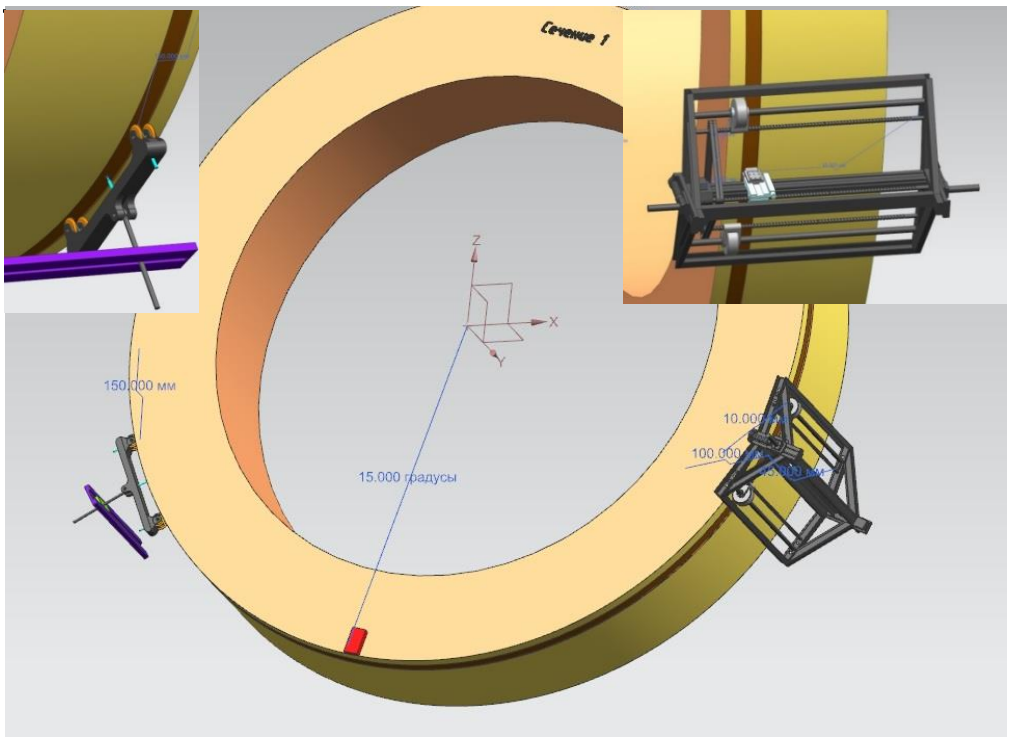


Рис. 4. Цифровая симуляция процесса измерения и реконструкции

Основные этапы моделирования были выполнены в САПР Siemens NX. С целью обеспечения возможности сравнительного анализа эффективности предложенных решений с уже применяемыми для виртуальной модели бандажа были взяты параметры геометрической формы поверхности катания изношенных бандажей эксплуатируемых печных агрегатов. Погрешность формы принятой модели бандажа соответствует предельно допустимому износу бандажа в отрасли. Для номинального диаметра 6,1 м и ширины 1 м, полное радиальное биение составляет 12 мм и характеризуется бочкообразным профилем продольного сечения.

В результате моделирования доказано существенное сокращение основного технологического времени обработки относительно существующих технологий до 2,37 раза. Данные виртуального эксперимента позволили визуализировать систему и отладить программное

обеспечения для измерительной системы.

Организационная диаграмма программного обеспечения информационно-измерительной системы. На основании разработанных схем контроля и алгоритмов было изготовлено измерительное устройств и разработано программное обеспечение для измерительного комплекса.

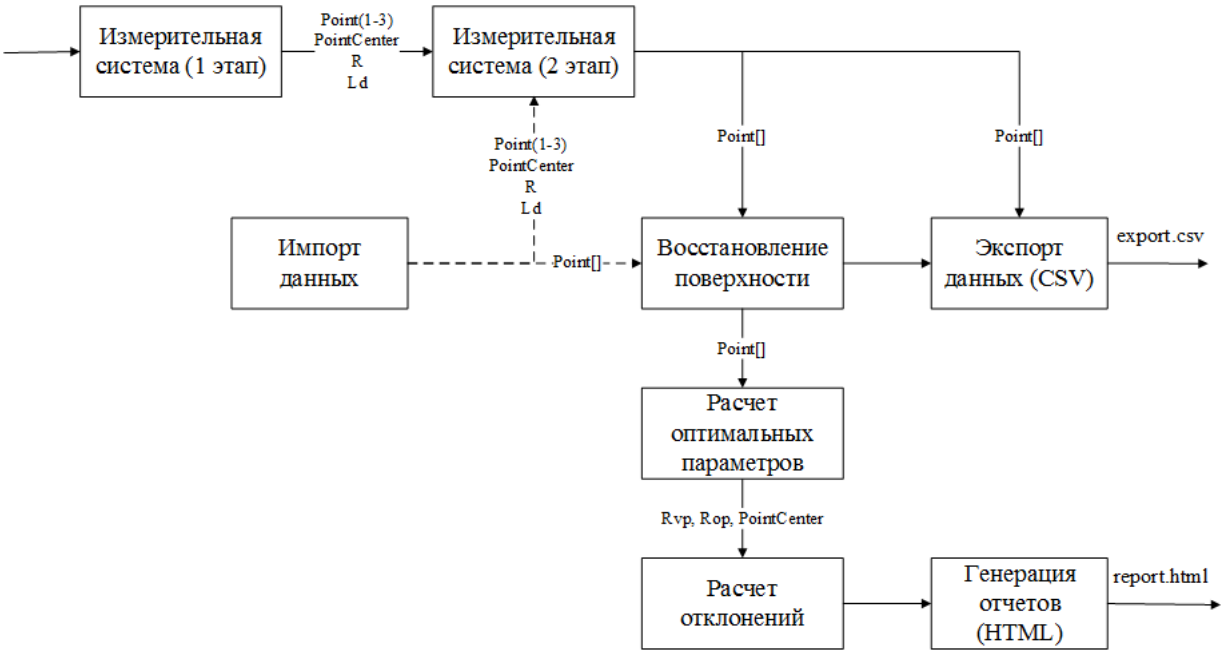


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения информационно-измерительной системы

На рис. 5 приведены основные модули программы и показаны связи между ними: модуль измерительной системы, модуль экспорта/импорта данных, модуль восстановления поверхности контура, модуль расчета оптимальных параметров, модуль расчета отклонений, модуль генерации отчетов, пользовательский интерфейс. Измерительная система визуализирует и рассчитывает отклонения от круглости восстановленной формы бандажа. В модуле расчета оптимальных параметров определяются параметры вписанной окружности при механической обработке. Расчет производится на основе массива точек, полученных в результате работы модуля восстановления поверхности разработанного алгоритма снятия припуска.

Выходные параметры модуля – радиус и координаты центра наибольшей окружности, вписанной в измеряемый контур. Модуль расчета отклонений работает согласно математическим зависимостям [3] и позволяет определить погрешность формы крупногабаритной детали. С помощью модуля генерации отчетов оператору станочного оборудования можно просматривать результаты работы информационно-измерительной системы.

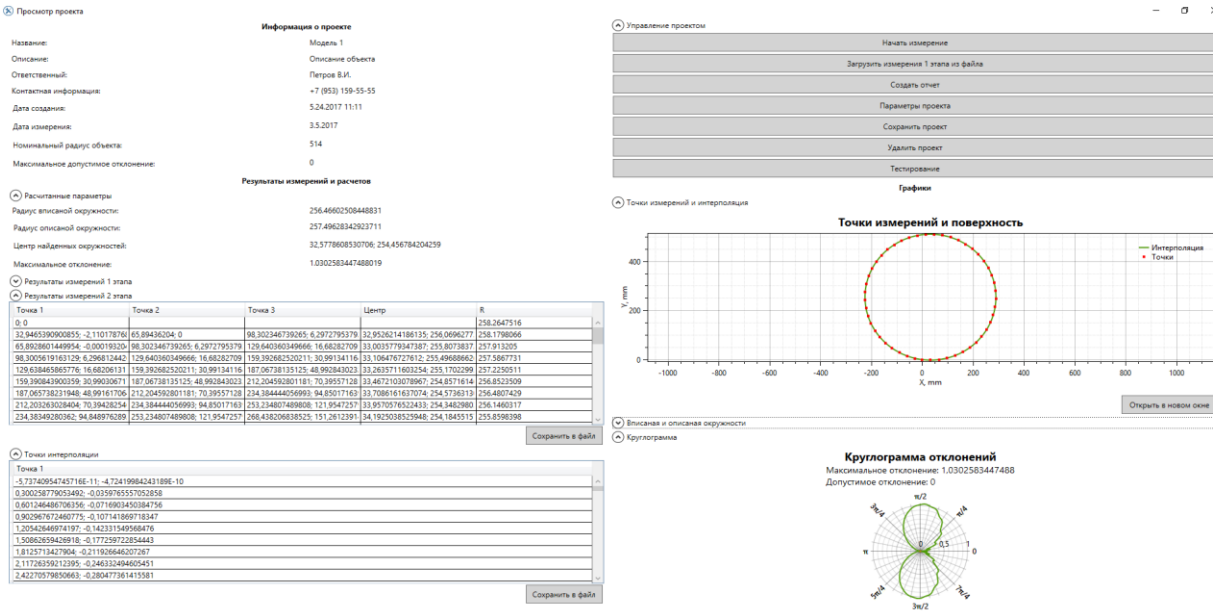
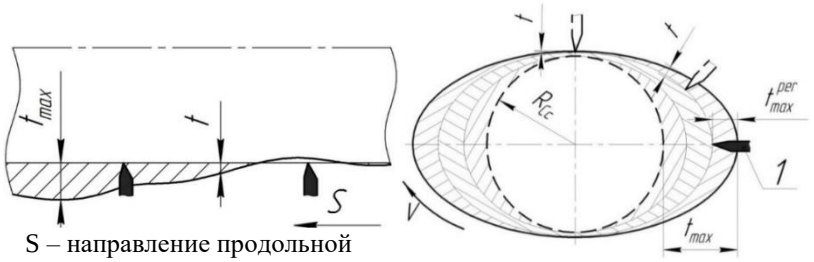
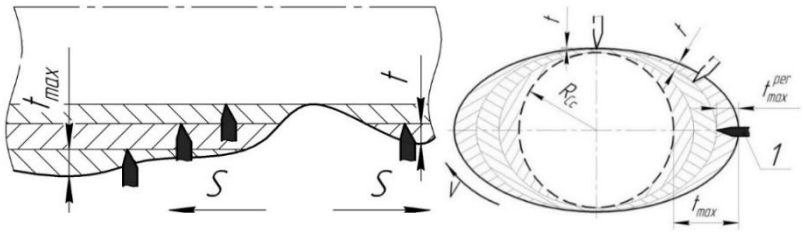
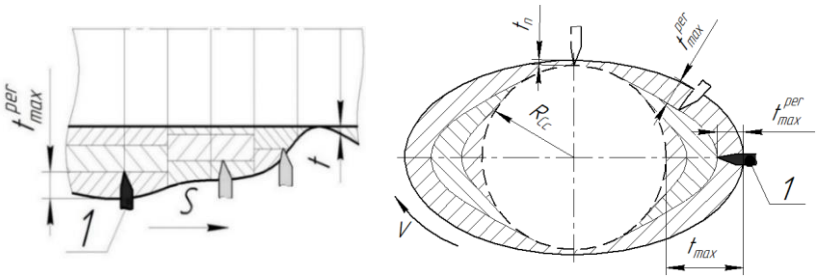
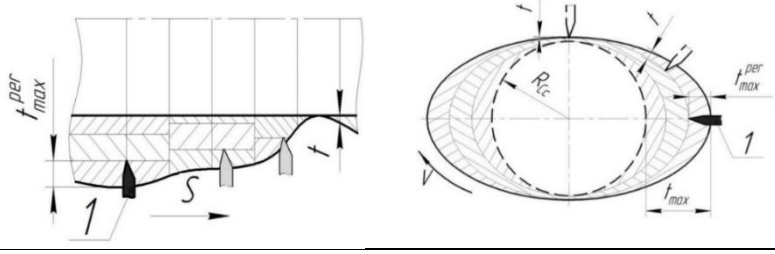


Рис. 6. Интерфейс пользователя измерительной системы

Схемы назначения глубины резания механической обработки в продольном сечении. Ниже в таблице 1 приведены основные варианты возможных вариантов формирования глубины резания в продольном сечении при проектировании технологического процесса. Схемы предполагают применение станочного модуля с возможностью обеспечения постоянства технологической базы при обработке, например, предложенного в [19] и наличия реконструированной цифровой модели обрабатываемой поверхности.

Таблица 1. Варианты схем обработки

1	Постоянная настройка вылета режущего инструмента на переход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу в рамках каждого установа за один рабочий ход.	 S – направление продольной подачи	
		Преимущества –не требуется частые вспомогательные переходы со сменой базирования; –единый профиль продольного сечения (за исключением части поверхности используемой как база) после первого перехода.	*Недостатки* –переменная нагрузка на инструмент; –возможно превышение технологически максимально допустимой глубины обработки t^{per}_{max} и/или отсутствие обработки части поверхности на данном переходе; –требуется относительно много

			дополнительных рабочих ходов для достижения требуемой точности формы.
2	Постоянная настройка вылета режущего инструмента на рабочий ход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу, в рамках каждого установа за несколько рабочих ходов.	 S – направление продольной подачи 1 – режущий инструмент	
		Преимущества –не требуется частые вспомогательные переходы со сменой базирования; –возможность настройки глубины резная без превышения технологически максимально допустимой глубины обработки t_{max}^{per}.	*Недостатки* –переменная нагрузка на инструмент; –требуется привод управления вылетом инструмента –возможно изменение глубин обработки в продольном сечении обрабатываемой поверхности от 0 до её максимального значения –требуется относительно много дополнительных рабочих ходов для достижения требуемой точности формы.
3	Переменная настройка вылета режущего инструмента на переход - выполнение обработки всей поверхности, кроме участка под технологическую базу, с разбиением на участки с различной и подстраиваемой глубиной резания в рамках первого установа. На втором установе дообработка участка поверхности бывшего технологической базой на предыдущем установе.	 S – направление продольной подачи 1 – режущий инструмент	
		Преимущества –минимизация снимаемого припуска; –возможна избирательная обработка с максимальной глубиной обработки до параметров вписанного цилиндра; –минимальное количество рабочих ходов; –возможна обработка поверхности за два технологических перехода.	*Недостатки* –требуется привод управления вылетом инструмента и система контроля за текущим значением погрешности; –требуется дополнительные средства для отслеживания взаимного положения поверхности и обрабатывающего модуля.
4	Переменная настройка вылета режущего инструмента на рабочий ход - выполнение обработки поверхности, кроме участка под технологическую базу, с разбиением на участки с		

	различной но постоянной глубиной резания на каждый рабочий ход в рамках каждого установа. Возможно отсутствие обработки части поверхности при каждом установе.	1 – режущий инструмент; S – направление продольной подачи обработки; V – направление вращения заготовки)	
		Преимущества –возможна избирательная обработка – возможна обработка до параметров расчетного вписанного кругового цилиндра, с минимизацией снимаемого припуска; –не требуется дополнительные средства для отслеживания взаимного положения поверхности и обрабатывающего модуля.	*Недостатки* –требуется несколько рабочих ходов и перебазирований обрабатывающего модуля; –требуется привод управления вылетом инструмента и система контроля за текущим значением погрешности; –переменная расчетная глубина резания от нуля до максимально допустимой.

Каждый из указанных в таблице вариантов удаления припуска позволяет последовательно уменьшать погрешность формы поверхности в продольном и поперечном направлении, что достигается предложенной схемой обрабатывающего модуля и способом его базирования.

В зависимости от выбранной последовательности удаления припуска отличается методика расчета вылета режущего инструмента, но общие принципы и алгоритмы схожи. При этом наибольшей эффективностью обладает 3-й вариант (переменная настройка вылета режущего инструмента на переход), обеспечивающий высокоточную обработку поверхности за наименьшее время. Однако, для обеспечения максимального припуска, требуется специальное высокоточное устройство определения положения поверхности относительно станочного модуля. Подобные дополнительные устройства существенно удорожают технологию, так как требуется разработка соответствующей системы управления приводами оборудования и синтез алгоритмов управления для неё.

Поэтому в качестве базовой для предложенной технологии механической обработки эффективной представляется 4-я схема удаления припуска. Она в полной мере удовлетворяет требованиям и возможности разработки необходимых средств измерений и диагностики.

Обсуждение

Результаты данного исследования: разработанные модели, алгоритмы и технологическое оснащение позволяют реализовать возможность расчета оптимального технологического процесса и режимов резания с возможностью их корректировки в процессе обработки на основе контрольных измерений.

Также в проектирование технологического процесс включена цифровая модель объекта и технологического оснащения.

Заключение

Своевременная оценка искажения формы или износа поверхности опор технологических барабанов и технология мобильной обработки наружной поверхности бандажей являются одним из главных условий обеспечения нормального режима работы оборудования и повышения срока его эксплуатации.

Предложена методика формирования технологического процесса механической обработки контактной поверхности бандажа. Разработаны программно-аппаратные средства контроля и расчета технологических режимов, позволяющие сократить основное технологическое время и минимизировать припуск.

Одновременно с механической обработкой происходит цифровая реконструкция формы поверхности обрабатываемой детали, что позволяет контролировать изменение погрешности формы непосредственно на работающем агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method // Measurement. – 2009. – Vol. 42, iss. 4. – P. 524–531. – DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.

[2] Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P. Proactive condition monitoring of low-speed machines. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – P. 53–68. – ISBN 978-3-319-10493-5. – ISBN 3319104934.

[3] Технология механической обработки, цифровое моделирование и реализация устройства для контроля формы крупногабаритных деталей / С. П. Тимофеев, А. В. Гринек, А. В. Хуртасенко, И. П. Бойчук // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 6-24. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24. – EDN XKSCCN.

[4] An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder / K. Zheng, Y. Zhang, L. Liu, C. Zhao // TehnickiVjesnik. – 2017. –Vol. 24 (5). – P. 1297–1305. – DOI: 10.17559/TV-20150426160032.

[5] Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method / K. Zheng, Y. Zhang, C. Zhao, L. Liu // Engineering Letters . – 2015. – Vol. 23, iss. 4. – P. 283–291.

[6] Ф. Препарата и М. Шеймос, Вычислительная геометрия: введение, Москва: Мир, 1989, p. 478.

[7] Скворцов А.В., Костюк Ю.Л. Применение триангуляции для решения задач вычислительной геометрии. Изд-во Томск: ТГУ, 2002. 128 с.

[8] Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part’s axis on the measurement results of its diameters Z. Zhao, B. Li, G. Zhang, H. Yu, M.

Shang // Measurement. – 2019. – Vol. 138. – P. 232–239. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.
[9] Mogilny S., Sholomitskii A. Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1709–1715. – DOI: 10.1016/j.proeng. 2017.10.702.
[10] Identification and kinematic calculation of laser tracker errors / J. Conte, J. Santolaria, A.C. Majarena, A. Brau, J.J. Aguilar // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 379–387. – DOI: 10.1016/j. proeng.2013.08.190.
[11] Пат. 2181190 РФ, МПК G01B 21/10. Оптическое устройство для измерения диаметров крупногабаритных деталей / А. Н. Шилин, С. А. Бедкин, Е. Г. Зенина. Заявл. 09.06.2000; опубл. 10.04.2002.
[12] Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface / J. Peng, D. Chen, H. Guo, J. Zhong, Y. Yu // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, iss. 16. – P. 20306–20318. – DOI: 10.1364/ OE.26.020306.
[13] A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces / Y. Liu, C.F. Cheung, X. Feng, C.J. Wang, R.K. Leach // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 54. – P. 60–69. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.
[14] Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S. An inspection advisor for form error in cylindrical features // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 128–143. – DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.
[15] Пат. № 161400, Российская Федерация, МПК G01B 5/20 (2006.01). Измерительное устройство для определения формы поверхностей крупногабаритных деталей – тел вращения / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова, А.В. Гринек; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2015152710/28, заявл. 08.12.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11.
[16] Акинцева А.В., Переверзев П.П. Моделирование изменения глубины резания в разных сечениях обрабатываемой поверхности в цифровом двойнике операции круглого врезного шлифования с ЧПУ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 95–104. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-95-104.
[17] Yuhan Niu et al 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2815 012022.
[18] H. S. Amraoui et al 2024 Eng. Res. Express 6 025419.
[19] Пат. № 191596 Российская Федерация, МПК B23B 5/00 (2006.01). Станок для обработки поверхностей крупногабаритных деталей-тел вращения / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2019114537, заявл. 13.05.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23.

S.P. Timofeev[1], A.V. Grinek[2]

TECHNOLOGICAL AND HARDWARE-SOFTWARE SUPPORT OF MECHANICAL PROCESSING OF LARGE-SIZED BODIES OF ROTATION WITH NON-STATIONARY AXIS

[1]Stock company "Engineering Center "Kronstadt", Russia;
[2]Sigmatek LLC, Russia

Abstract

The paper presents the results of research into the technology of machining of large-size supports of technological drums using the proposed hardware-software complex. A method of digitally reconstructing the shape of a closed curvilinear surface using step-by-step measurement and approximation algorithms is presented. At the same time, the shape error is calculated. The design of a machining module is proposed. Optimal algorithms for constructing the machining process and calculating the corresponding cutting modes are presented. The results of experimental and theoretical studies make it possible to increase the efficiency of machining by reducing the main technological time.

Key words: machining, reconstruction, digital, unsteady axis, measurement, allowance, measuring system

REFERENCES

[1] Farooqui S.A., Doiron T., Sahay C. Uncertainty analysis of cylindricity measurements using bootstrap method // Measurement. – 2009. – Vol. 42, iss. 4. – P. 524–531. – DOI: 10.1016/j.measurement.2008.09.008.

[2] Stamboliska Z., Rusinski E., Moczko P. Proactive condition monitoring of low-speed machines. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – P. 53–68. – ISBN 978-3-319-10493-5. – ISBN 3319104934.

[3] Timofeev S.P., Grinek A.V., Hurtasenko A.V., Boychuk I.P. Machining technology, digital modelling and shape control device for large parts. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 6–24. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-6-24. (rus.).

[4] An online straightness deviation measurement method of rotary kiln cylinder / K. Zheng, Y. Zhang, L. Liu, C. Zhao // TehnickiVjesnik. – 2017. –Vol. 24 (5). – P. 1297–1305. – DOI: 10.17559/TV-20150426160032.

[5] Rotary kiln cylinder deformation measurement and feature extraction based on EMD method / K. Zheng, Y. Zhang, C. Zhao, L. Liu // Engineering Letters . – 2015. – Vol. 23, iss. 4. – P. 283–291.

[6] P. Preparata, M. Shamos. Computational Geometry: Introduction, Moscow: Mir, 1989, p. 478. (rus.)

[7] Skvortsov A.V., Kostyuk Yu.L. Application of triangulation to solve computational geometry problems. Tomsk Publishing House: TSU, 2002. 128 p.
[8] Influence of eccentricity and tilt of cylindrical part's axis on the measurement results of its diameters Z. Zhao, B. Li, G. Zhang, H. Yu, M. Shang // Measurement. – 2019. – Vol. 138. – P. 232–239. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.085.
[9] Mogilny S., Sholomitskii A. Precision analysis of geometric parameters for rotating machines during cold alignment // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1709–1715. – DOI: 10.1016/j.proeng. 2017.10.702.
[10] Identification and kinematic calculation of laser tracker errors / J. Conte, J. Santolaria, A.C. Majarena, A. Brau, J.J. Aguilar // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 63. – P. 379–387. – DOI: 10.1016/j. proeng.2013.08.190.
[11] Patent RU 2181190, G01B 21/10, Opticheskoye ustroystvo dlya izmereniya diametrov krupnogabaritnykh detaley (Optical Device to Measure Diameters of Large-Sized Parts), A.N. Shilin, S.A. Bedkin, E.G. Zenina, Priority 2000.06.09, Published 2002.04.10. (rus.)
[12] Variable optical null based on a yawing CGH for measuring steep acylindrical surface / J. Peng, D. Chen, H. Guo, J. Zhong, Y. Yu // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, iss. 16. – P. 20306–20318. – DOI: 10.1364/ OE.26.020306.
[13] A self-calibration rotational stitching method for precision measurement of revolving surfaces / Y. Liu, C.F. Cheung, X. Feng, C.J. Wang, R.K. Leach // Precision Engineering. – 2018. – Vol. 54. – P. 60–69. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2018.05.002.
[14] Ramaswami H., Kanagaraj S., Anand S. An inspection advisor for form error in cylindrical features // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 40. – P. 128–143. – DOI: 10.1007/s00170-007-1321-4.
[15] Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N., Grinek A.V. The measuring device for determining the surface shape of large size parts of rotation type. Patent RF, no. 161400, 2016. (rus.).
[16] Akinceva A.V., Pereverzev P.P. Modeling the change in cutting force in different sections of the machined surface in a digital twin of a CNC cylindrical plunge grinding operation. Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2022. №1. p.p. 95–104. (rus.).
[17] Yuhan Niu et al 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2815 012022.
[18] H. S. Amraoui et al 2024 Eng. Res. Express 6 025419.
[19] Timofeev S.P., Khurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N. A machine for surface treatment of large-sized parts-bodies of rotation. Patent RF, no. 191596, 2019. (rus.).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.91.01
doi:10.18720/SPBPU/2/id-147

В.Н. Кудрявцев[1], В.А. Парамонова[2]

ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ И ТВЁРДОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА НА СКОРОСТНОЙ РЕЖИМ РЕЗАНИЯ РЕЗЦАМИ С ПЛАСТИНКАМИ ИЗ ТВЁРДОГО СПЛАВА



[1]Владимир Николаевич Кудрявцев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(981)806-8979, E-mail: kudryavtsevvn@mail.ru.



[2]Виктория Андреевна Парамонова,
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Россия, ДНР, Донецк
Тел.: +7(949) 323-0841, E-mail: vaparamonova@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обработки металлов резанием, рассмотрены условия в зоне резания и общие вопросы влияния режимов на температурные условия в зоне резания, наростообразование, износ режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Отдельное внимание уделено справочной таблице, применяемой при выборе скорости резания для обработки деталей из стали и серого чугуна резцами с пластинками из твёрдого сплава. В результате обработки справочных данных, аналитическими и расчётными методами получена модель для расчёта скорости резания в зависимости от твёрдости поверхностного слоя (*HB*) и подачи (*s*) вида $v = A \cdot HB + B$. Выявлены закономерности в изменении коэффициентов модели А и С при изменении подачи для сталей и серого чугуна.

Ключевые слова: твёрдость материала, скорость подачи, подача, резцы с пластинками из твёрдого сплава, сталь, чугун серый.

Введение

Развитие машиностроительной отрасли напрямую связано с исследованиями в области металлообработки. Одним из значимых направлений в исследованиях является исследование влияния режимов обработки на качество поверхностного слоя, а также износ режущего инструмента. Несмотря на обилие справочников, данных от различных научных коллективов, конкретные рекомендации по назначению режимов для обработки в зависимости от основных факторов так и не установлены, отсутствуют итоговые модели для назначения параметров режимов резания. Данная ситуация обусловлена множеством объективных факторов, начиная от принятых конструктором припусков на обработку, выбором конкретных значений подачи и скорости резания из рекомендуемых в справочниках диапазонов данных, и заканчивая особенностями работы станка на конкретном рабочем месте. В статьях анализируется влияние скорости подачи на формирование шероховатости поверхности при точении, проводятся исследования профилей шероховатости, индексов шероховатости и спектров Фурье, анализ явлений, связанных со стружкой, влияние скоростей подачи на микроструктуру и механические свойства различных материалов и сплавов, смазочно-охлаждающих жидкостей на износ инструмента и шероховатость поверхностей [1-22].

Процессы резания пластичных материалов (сталь, латунь, алюминий) сопровождаются интенсивным наростообразованием, т.е. образованием плотного скопления частиц материала, прочно укрепляющимся на передней поверхности инструмента у режущей кромки [23]. Образование нароста может быть объяснено тем, что при определённых условиях обработки (высокие давления и повышенные температуры в зоне резания) силы трения между передней поверхностью резца и срезаемым слоем металла становятся больше сил внутреннего сцепления обрабатываемого материала, а, при приближении температур в зоне резания к значениям температуры холодной пластической деформации, частицы материала обрабатываемой заготовки прочно сцепляются с передней поверхностью инструмента.

Форма и размеры образуемого нароста постоянно изменяются от минимальных до максимальных значений, проходя цикл «образование – рост – отрыв - образование». Основная часть нароста уносится стружкой, а часть в виде мелких вкраплений вклинивается в заготовку, ухудшая качество поверхности и свойства материала.

В процессе механической обработки материалов лезвийным инструментом значительная часть затраченной механической энергии

(работы) преобразуется в теплоту. Основными зонами тепловыделения являются (рис. 1):

- область наибольших пластических деформаций $Q_Д$ вблизи плоскости скалывания (сдвига) под углом β_1;

- зоны трения в месте контакта стружки с передней поверхностью инструмента $Q_{Т.П.}$ и задних поверхностей резца с заготовкой $Q_{З.П.}$.

Наибольшее количество выделяемой теплоты уносится со стружкой. Несколько меньшая часть теплоты отводится в заготовку и резец, вызывая их нагрев.

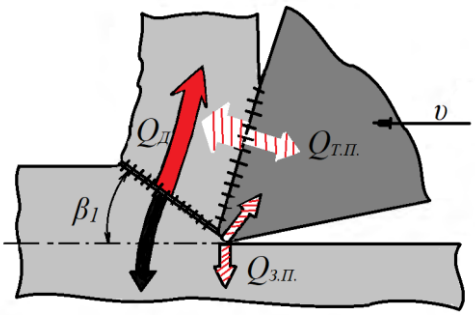


Рис. 1. Источники теплообразования $Q_Д$, $Q_{Т.П.}$, $Q_{Т.П.}$ и потоки отводимого тепла в стружку, резец и деталь

Появление нароста на поверхностях является естественным процессом, возникающим под давлением режущего инструмента на поверхность материала, и, более вероятно, вызвано изменением свойств поверхностного слоя заготовки под воздействием температуры и давления. Исходя из справочных данных, максимальная высота нароста соответствует, примерно, 350°C (типичная температура MS для сталей), что позволяет предположить перерождение мартенсита в аустенит и, как следствие, размягчение верхнего мартенситного слоя в поверхностном слое в процессе резания, который, преобразуясь в аустенит, и образует нарост, уплотняющийся при обратном превращении.

При этом цикл наростообразования приводит к ухудшению точности (наличие микронеровностей в виде ступеней на поверхностях) и качества обработки (повышение шероховатости) поверхностей. При этом структура материала нароста деформирована, а его твердость значительно превышает твердость обрабатываемого материала, за счет чего, до момента отрыва, нарост защищает вершину резца и режущую кромку от преждевременного износа. Угол резания на нароste меньше угла резания на резце, что немного снижает расход мощности на резание.

В связи с этим, за счет повышения производительности, при черновой обработке наростообразование не считается критическим явлением и его влияние считается положительным, а при чистовой обработке - образование нароста следует избегать.

Известно, что скорость образования нароста существенно зависит от скорости резания (наибольшее наростообразование соответствует скоростям резания 18…30 м/мин) и подачи (прямая зависимость), в то время как глубина резания на размеры нароста существенного влияния не имеет. Кроме того размеры нароста находятся в прямой зависимости от угла резания.

Использование скоростей резания до 10-12 м/мин и более 50-70 м/мин позволяет практически исключить нарост на режущем инструменте. Это является одной из причин проведения чистовой обработки на повышенных скоростях резания.

Одним из способов снижения рабочих температур в зоне резания, и, как следствие, уменьшения наростообразования, является использование смазочно-охлаждающих жидкостей.

Целью статьи является обеспечение возможности расчёта скорости резания в зависимости от твёрдости поверхностного слоя (*HB*) и подачи (*s*).

Методы

Основной задачей данной статьи является определение модели для расчёта скорости резания в зависимости от твёрдости поверхностного слоя (*HB*) и подачи (*s*) вида $v = A \cdot HB + B$, определение закономерностей в изменении коэффициентов модели *A* и *B* при изменении подачи для сталей и серого чугуна.

Данная модель облегчит назначение скоростного режима резания резцами с пластинками из твёрдого сплава для сталей и серого чугуна и обеспечит более стабильное качество обрабатываемых изделий.

Результаты

Для выбора подходящих режимов резания конструкторы используют различные справочники, рекомендации производителей инструмента, а также опыт работы на конкретном оборудовании. Во многих справочниках рекомендовано определять скорость резания при точении с помощью специальных таблиц и поправочных коэффициентов. Однако проблема состоит в том, что скорость резания при точении рассчитывается с использованием коэффициентов, которые могут быть различны в различных источниках, часто рекомендуемые значения заданы в виде диапазонов данных без конкретных рекомендаций по их применению [24].

Для достижения цели был проведен анализ справочной таблицы справочника «Режимы резания металлов» [25]. Исходные данные для построения модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рекомендуемые скорости резания деталей из стали и чугуна серого резцами с пластинками из твердого сплава

Обрабатываемый материал			Подача s, в мм/об, до											
Вид материала	механическая характеристика		0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29	0,39	0,52	0,70
	$\sigma_в$	НВ	Скорость резания υ, в м/мин											
Сталь конструкционная углеродистая и легированная	44-49	126-140	245	218	193	172	153	136	120	107	95	75	59	-
	50-55	141-158	218	193	172	153	136	120	107	95	85	67	53	-
	56-62	159-177	193	172	153	136	120	107	95	85	75	59	47	-
	63-70	178-200	172	153	136	120	107	95	85	75	67	53	42	-
	71-79	201-226	153	136	120	107	95	85	75	67	59	47	37	-
	80-89	227-255	136	120	107	95	85	75	67	59	53	42	33	-
	90-100	256-289	120	107	95	85	75	67	59	53	47	37	29	-
Чугун серый		150-156	105	100	95	89	84	79	75	70	66	59	52	46
		157-164	100	95	89	84	79	75	70	66	62	55	49	44
		164-172	95	89	84	79	75	70	66	62	59	52	46	41
		173-181	89	84	79	75	70	66	62	59	55	49	44	39
		182-190	84	79	75	70	66	62	59	55	52	46	41	36
		191-199	79	75	70	66	62	59	55	52	49	44	39	34
		200-219	75	70	66	62	59	55	52	49	46	41	36	32
		220-241	66	62	59	55	52	49	46	44	41	36	32	29
		243-265	59	55	52	49	46	44	41	39	36	32	29	26

Графики изменения рекомендуемых скоростей резания от максимальной прочности при растяжении $\sigma_в$ при различных подачах для сталей в исследованных диапазонах представлены на рис. 2.

Для расчёта скоростей резания от максимальной прочности при растяжении $\sigma_в$ при различных подачах (обработка сталей) могут быть использованы эмпирические зависимости:

s=0.09

$$\upsilon = 0{,}0321 \cdot \sigma_в^2 - 7{,}1496 \cdot \sigma_в + 515{,}69 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (1)$$

s=0.1

$$\upsilon = 0{,}0288 \cdot \sigma_в^2 - 6{,}3953 \cdot \sigma_в + 459{,}76 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (2)$$

s=0.12

$$\upsilon = 0{,}0254 \cdot \sigma_в^2 - 5{,}6577 \cdot \sigma_в + 407{,}5 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (3)$$

s=0.14

$$\upsilon = 0{,}0238 \cdot \sigma_в^2 - 5{,}2061 \cdot \sigma_в + 368{,}4 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (4)$$

s=0.16

$$\upsilon = 0{,}0208 \cdot \sigma_в^2 - 4{,}5801 \cdot \sigma_в + 325{,}74 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (5)$$

s=0.19

$$\upsilon = 0{,}0184 \cdot \sigma_в^2 - 4{,}04 \cdot \sigma_в + 288{,}12 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (6)$$

s=0.22

$$\upsilon = 0{,}0152 \cdot \sigma_в^2 - 3{,}4225 \cdot \sigma_в + 250{,}04 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (7)$$

s=0.25

$$\upsilon = 0{,}0143 \cdot \sigma_в^2 - 3{,}1569 \cdot \sigma_в + 226{,}4 \ (R^2 = 0{,}99) \quad (8)$$

s=0.29

$$\upsilon = 0{,}0128 \cdot \sigma_в^2 - 2{,}8261 \cdot \sigma_в + 201{,}95 \ (R^2 = 0{,}99) \quad (9)$$

s=0.39

$$\upsilon = 0{,}0097 \cdot \sigma_в^2 - 2{,}1693 \cdot \sigma_в + 157{,}19 \ (R^2 = 0{,}99) \quad (10)$$

s=0.52

$$\upsilon = 0{,}0072 \cdot \sigma_в^2 - 1{,}6478 \cdot \sigma_в + 122{,}02 \ (R^2 = 0{,}99) \quad (11)$$

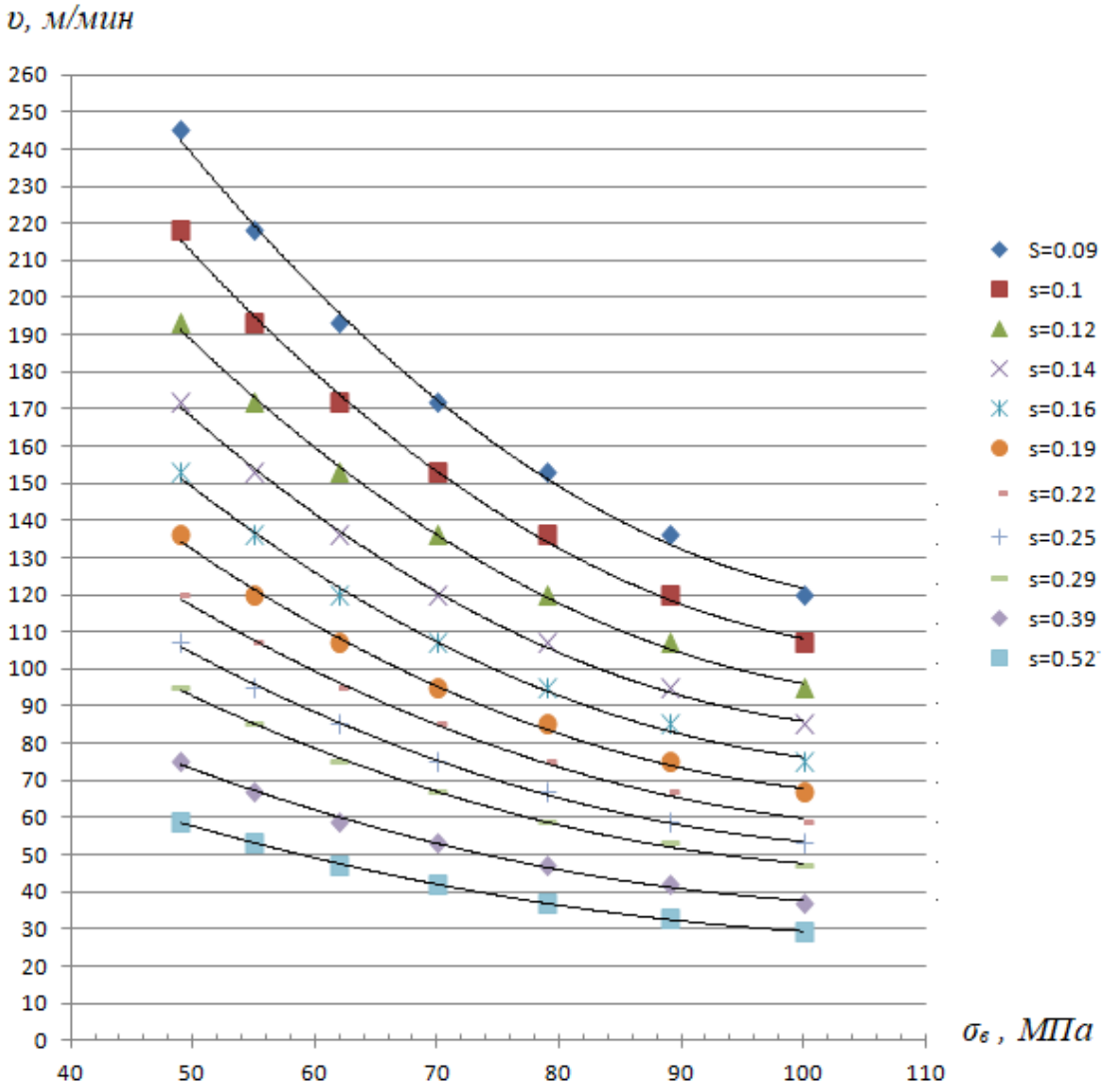


Рис. 2. Графики изменения рекомендуемых скоростей резания от максимальной прочности при растяжении $\sigma_в$ при различных подачах (обработка сталей)

В результате первичного анализа было отмечено, что построение единой модели для всех подач на основании регрессионного анализа не представляется возможным, доверительный интервал для такой модели

составляет 50-75% (в зависимости от количества учитываемых факторов). При этом наблюдается характерная тенденция к снижению рекомендуемой скорости резания с уменьшением прочности при растяжении $\sigma_в$ и увеличением подачи (см. рис. 2).

По результатам анализа промежуточных моделей было принято решение об учёте в регрессионном анализе лишь подачи и твёрдости материалов. Такой подход позволяет принимать решения на основании расчёта твердости стали, исходя из её состава [26], после чего использовать полученные значения твердости для расчёта скорости резания.

В связи с этим были получены регрессионные модели для расчёта скорости резания при обработке сталей и чугуна серого резцами с пластинками из твердого сплава для каждой подачи вида:

$$v, м/мин = A \cdot HB + B \ (R^2 = 0,96) \qquad (12)$$

Коэффициенты A и свободные члены B зависимостей для всех подач представлены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты А и свободные члены С зависимостей для модели (12)

сталь	s	*0,09*	*0,1*	*0,12*	*0,14*	*0,16*	*0,19*
	B	345,795	307,372	272,895	242,423	215,461	190,930
	A	-0,819	-0,728	-0,647	-0,574	-0,510	-0,451
	s	*0,22*	*0,25*	*0,29*	*0,39*	*0,52*	
	B	169,564	150,852	134,087	105,682	83,812	
	A	-0,401	-0,356	-0,317	-0,249	-0,198	
чугун	s	*0,09*	*0,1*	*0,12*	*0,14*	*0,16*	*0,19*
	B	165,704	158,411	149,076	140,536	132,389	124,078
	A	-0,414	-0,401	-0,376	-0,356	-0,335	-0,312
	s	*0,22*	*0,25*	*0,29*	*0,39*	*0,52*	*0,7*
	B	117,536	109,322	104,237	92,907	81,844	72,091
	A	-0,298	-0,273	-0,264	-0,236	-0,206	-0,180

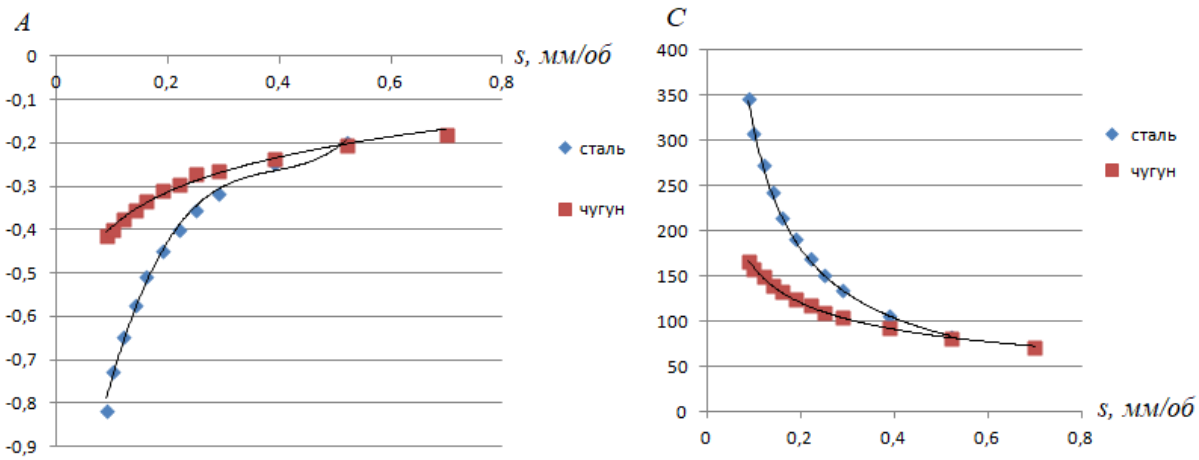
Графики изменения величин коэффициентов A и B модели (12) для сталей и серого чугуна по построенным зависимостям представлены на рисунке 3.

Для расчёта коэффициентов модели (12) могут быть использованы эмпирические зависимости:

- *сталь:*

$$A = 16,584 \cdot s^3 - 19,376 \cdot s^2 - 7,804 \cdot s - 1.3452 \ (R^2 = 0,99) \qquad (13)$$

$$B = 49.891 \cdot s^{(-0.8)} \ (R^2 = 0,99) \qquad (14)$$



а) б)

Рис. 3. Графики изменения величин коэффициентов А (а) и С (б) модели (12) для сталей и серого чугуна

- *чугун:*

$$A = 0{,}1159 \cdot \ln(s) - 0{,}1266 \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (15)$$

$$B = 62.952 \cdot s^{(-0.405)} \quad (R^2 = 0{,}99) \qquad (16)$$

Результаты сравнения экспериментальных данных и данных, рассчитанных по полученным моделям, представлены в таблице 3 для отдельных уровней. Отклонения были рассчитаны для всех вариантов и не превысили 10%, а для большинства уровней (из 77 исследованных для сталей и 108 – для чугуна) составили менее 5%.

Таблица 3. Результаты сравнения экспериментальных данных и данных, рассчитанных по полученным моделям

s, мм/об, до	Сталь (НВ=140 x10^{-1}, МПа)			Чугун (НВ=156x10^{-1}, МПа)		
	$\upsilon_{рез}$ м/мин (справочное)	$\upsilon_{рез\ расч}$ м/мин (12, 13, 14)	Δ,%	$\upsilon_{рез}$ м/мин (справочное)	$\upsilon_{рез\ расч}$ м/мин (12, 15,16)	Δ,%
0,09	245	232,20	5,23	105	103,65	1,29
0,1	218	210,91	3,25	100	98,58	1,42
0,12	193	179,80	6,84	95	90,49	4,75
0,14	172	158,34	7,94	89	84,28	5,30
0,16	153	142,68	6,74	84	79,35	5,54
0,19	136	125,63	7,62	79	73,57	6,88
0,22	120	112,99	5,84	75	69,11	7,86
0,25	107	102,79	3,93	70	65,55	6,35
0,29	95	91,32	3,88	66	61,80	6,37
0,39	75	68,87	8,17	59	55,40	6,09
0,52	59	56,95	3,48	52	50,47	2,95
0,7				46	46,54	-1,17

Анализ коэффициентов перед параметром твёрдости материала и свободных членов модели позволил выявить закономерности, по которым снижаются коэффициенты при увеличении подачи и твёрдости материалов, что позволяет автоматизировать назначение скорости резания при обработке материалов резцами с пластинками из твёрдых сплавов.

Обсуждение

Правильное назначение подачи и скорости резания важно как для обеспечения качества поверхности материала, так и для снижения скорости износа режущего инструмента в процессе металлообработки на станках. И данным направлениям исследования посвящено значительное количество работ [1-23]. Правильный выбор подачи обеспечивает равномерное срезание материала и более высокое качество поверхности. При этом увеличение подачи и скорости обработки позволяет повысить производительность процессов за счет сокращения времени обработки, однако провоцирует создание более высокотемпературных полей в зоне резания, что может привести к получению более грубой шероховатости, увеличению наростооразования, «привариванию» стружки и более быстрому износу инструмента. Снижение величины подачи и скорости резания позволяет получить более гладкую поверхность, однако приводит к увеличению времени обработки и, как следствие, снижению производительности.

Оптимизация подачи и скорости резания позволяет достичь требуемого качества поверхности и повысить срок службы режущего инструмента.

Заключение

Полученные в работе модели для расчёта скорости резания при обработке сталей и чугуна серого резцами с пластинками из твердого сплава для каждой подачи, могут быть использованы при автоматизированном программировании процессов резания на станках с ЧПУ, а также в процессе технологической подготовки производства для упрощенного назначения скорости резания. Полученные зависимости упрощают расчёты в САПР, исключая неоднозначность выбора режима, множества коэффициентов в рекомендуемых диапазонах справочных данных, что делает результаты обработки более предсказуемыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Gassara, B., Sai, W.B. Modeling of spindle speed and feed rate considering the kinematic behavior of CNC lathe in face turning. Int J Adv Manuf Technol 136, 3387–3406 (2025). https://doi.org/10.1007/s00170-024-14978-7 – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-14978-7

[2] Truong, HS., Nguyen, TT., Bui, TA. (2025). Evaluating the Impact of Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness Utilizing a Four-Insert Carbide Face Milling Cutter on CNC Machines. In: Hoang Tien, D., Solanki, V.K., Mahmud, J., Nguyen, T.D.L. (eds) Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing. SETSM 2024. Proceedings in Technology Transfer. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7083-0_34 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-7083-0_34

[3] Chen, Z., Huang, C., Liu, H. et al. Surface integrity and modification of SA508Gr.3Cl.2 RPV steel induced by high-speed face milling process. Int J Adv Manuf Technol 133, 2639–2653 (2024). https://doi.org/10.1007/s00170-024-13803-5 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13803-5#citeas - URL: https://mammp-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40759-020-00045-7#citeas

[4] Tuyboyov Oybek Valijonovich, Toshtemirov Kamol Qahramonovich Tool wear prediction and management strategies in high-speed machining environments // Строительство и образование. 2024. № Спецвыпуск 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tool-wear-prediction-and-management-strategies-in-high-speed-machining-environments (дата обращения: 27.04.2025).

[5] Chen, G., Wu, K., Wang, Y. *et al.* Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition. *Int J Adv Manuf Technol* 127, 1165–1176 (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-11527-6 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11527-6#citeas

[6] Chhotaray, P., Behera, B.C., Mohamed, A., Muduli, K. (2024). Performance Evaluation of Inconel 800 Machining Under Dry Cutting Environment. In: Sahoo, S., Yedla, N. (eds) Recent Advances in Mechanical Engineering. ICRAMERD 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1080-5_24 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1080-5_24#citeas

[7] Chen, G., Wu, K., Wang, Y. et al. Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition. Int J Adv Manuf Technol 127, 1165–1176 (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-11527-6 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11527-6
[8] Bhise, V.Y., Jogi, B.F. (2023). Investigations on the Machining of Inconel X-750: Effect of Cutting Speed, Feed, Forces, Energy Consumption and MRR. In: Pradeep Pratapa, P., Saravana Kumar, G., Ramu, P., Amit, R.K. (eds) Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization. NCMDAO 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3938-9_39 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3938-9_39
[9] Mohsen Soori, Behrooz Arezoo Cutting tool wear prediction in machining operations, a review // Journal of New Technology and Materials (JNTM) - Vol. 12, N°02 (2022) – pp. 15-26 – URL: https://hal.science/hal-03888252/document
[10] Bhushan, R.K. Impact of nose radius and machining parameters on surface roughness, tool wear and tool life during turning of AA7075/SiC composites for green manufacturing. Mech Adv Mater Mod Process 6, 1 (2020). https://doi.org/10.1186/s40759-020-00045-7 -
[11] Magdalena Łazińska, Tomasz Durejko, Tomasz Czujko, Zbigniew Bojar The Effect of the Traverse Feed Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Laser Deposited Fe3Al (Zr,B) Intermetallic Alloy // Materials, May 2018 – V. 11 (5):792 - DOI: 10.3390/ma11050792 - URl: https://www.researchgate.net/publication/325152261_The_Effect_of_the_Traverse_Feed_Rate_on_the_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Laser_Deposited_Fe3Al_ZrB_Intermetallic_Alloy.
[12] Rajendra S Ghatode, Mahindra N Pande, Jeevan R Gaikwad Study of machining parameters while turning austenitic stainless steel AISI304 // International Journal of Academic Research and Development – V.3; Special Issue 2; March 2018 - pp. 14-20 – DOI: https://www.academia.edu/40352408/Study_of_machining_parameters_while_turning_austenitic_stainless_steel_AISI304
[13] Sridhar Atla, Mulugundam Siva Surya Influence of Cutting Fluids on Tool Wear and Surface Roughness During Turning of Aisi 316 Austenitic Stainless Steel // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) - Vol. 6 Issue 07, July – 2017 – pp. 112-115 – URL: https://www.academia.edu/83611584/Influence_of_Cutting_Fluids_on_Tool_Wear_and_Surface_Roughness_During_Turning_of_Aisi_316_Austenitic_Stainless_Steel

[14] D.L Zariatin, Reza Febriatna Analysis of Influence of Spindle Speed and Feeding Speed to Tool Wear and Surface Roughness // Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering_- Vol.1, No. 1, November 2016 - DOI: 10.22219/jemmme.v1i1.4480 – URL: https://www.researchgate.net/publication/318612191_Analysis_of_Influence_of_Spindle_Speed_and_Feeding_Speed_to_Tool_Wear_and_Surface_Roughness
[15] C.H.Shen The importance of diamond coated tools for agile manufacturing and dry machining // Surface and Coatings Technology – V. 86–87, Part 2, 15 December 1996 - pp. 672-677 - DOI: 10.1016 - URL: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02969-6
[16] Rajendrakumar V. Kadi, Suresh T. Dundur Optimization of dry turning parameters on surface roughness and hardness of Austenitic Stainless steel (AISI316) by Taguchi Technique // Journal of Engineering and Fundamentals - Vol. 2(2), pp. 30-41, December, 2015 – DOI: 10.17530 – URL: http://dx.doi.org/10.17530/jef.15.14.2.2
[17] Muataz Hazza F. Al Hazza, Nabilah Bt Md Yusof, Nur Amirah Najwa, Mohd Eikhwan, Mohamad Khazairul, Assem Hatem Taha Experimental study of flank wear in high speed turning of stainless steel AISI 304 // Journal of Advanced Science and Engineering Research - Vol 3, No 2 June (2013) – pp. 96-103 – URL: https://www.academia.edu/64924423/Experimental_study_of_flank_wear_in_high_speed_turning_of_stainless_steel_AISI_304
[18] Nithyanandhan.T, Manickaraj.K and Kannakumar.R. Optimization of Cutting Forces, Tool Wear and Surface Finish in Machining of AISI 304 Stainless Steel Material Using Taguchi's Method. // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, - Vol. 1 - Issue 4, June 2014. - pp. 488-493 – URL: https://ijiset.com/v1s4/IJISET_V1_I4_85.pdf
[19] M.Ramalinga Reddy, P.RavI Kumar. G.Krishna mohana rao. Effect of feed rate on the generation of surface roughness in turning // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) (November 2011) - Vol. 3 No. 11 – pp. 8099-8105 - URL: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/EFFECT%20OF%20FEED%20RATE%20ON%20THE%20GENERATION%20OF%20SURFACE%20ROUGHNESS%20IN%20TURNING.pdf
[20] Ihsan Korkut, Mustafa Kasap, Ibrahim Ciftci, Ulvi Seker Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel // Materials and Design – V. 25 (2004) – pp. 303–305 – URL: https://www.academia.edu/21778446/Determination_of_optimum_cutting_parameters_during_machining_of_AISI_304_austenitic_stainless_steel

[21] Кятуракис Г., Балтрушайтис А., Рудак П. В., Куис Д. В. Влияние скоростей резания и подачи на начальный износ дереворежущего инструмента // Труды БГТУ. 2014. - №2 – Лесная и деревообрабатывающая промышленность – С. 191-192 – URL: https://www.researchgate.net/publication/308750304_vlianie_skorostej_rezania_i_podaci_ha_nacalnyj_iznos_derevorezusego_instrumenta
[22] Отений Я.Н. и др. Силы и напряжения на поверхностях режущего лезвия при резании металлов / Отений Я.Н., Муравьев О.П., Эпов А.А., Туменов Т.Н., Жунусова А.Ш., Ткачева Ю.О., Плешакова Е.А., Ерахтина А.В. // Фундаментальные исследования. 2012. - № 6 (часть 1) - С. 155-157 - URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=29956 .
[23] Скорость резания формула автоматизированного расчёта // Станкостроительный завод. Металлообрабатывающие станки и инструмент – URL: https://www.axissteel.ru/skorost-rezaniya/
[24] Жигалов А. Н., Шатуров Д. Г., Жолобов А. А., Ранцевич А. С. Влияние геометрических параметров микрорельефа на передней поверхности твердосплавного лезвийного инструмента и режимов обработки на процесс наростообразования при низких и средних скоростях резания // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. №3 (68). - URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskih-parametrov-mikroreliefa-na-peredney-poverhnosti-tverdosplavnogo-lezviynogo-instrumenta-i-rezhimov.
[25] Режимы резания металлов. Справочник. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972
[26] Кудрявцев В. Н., Парамонова В. А. Расчётные модели для определения механических свойств некоторых нормализованных сталей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения - № 4 (83)’2023 – С. 19-24 – URL: https://ptsm.donntu.ru/arhiv%20nambe/pdf%20-83/019-024.pdf

V.N. Kudryavtsev[1], V.A. Paramonova[2]

THE EFFECT OF FEED RATE AND SURFACE HARDNESS OF THE WORKPIECE MADE OF STEEL AND CAST IRON ON THE HIGH-SPEED MODE OF CUTTING WITH CUTTERS WITH HARD ALLOY PLATES

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk People's Republic, Russia.

Abstract

The paper considers the issues of metal cutting, considers the conditions in the cutting area and the general issues of the influence of modes on the temperature conditions in the cutting area, build-up, wear of the cutting tool and the quality of the treated surface. Special attention is paid to the reference table used when choosing the cutting speed for machining steel and grey cast iron parts with cutters with hard alloy plates. As a result of processing the reference data, analytical and computational methods, a model was obtained for calculating the cutting speed depending on the hardness of the surface layer (HB) and feed (s) type $\upsilon = A \cdot HB + C$. Patterns in the variation of the coefficients of model A and C with feed changes for steels and gray cast iron have been identified.

Key words: material hardness, feed rate, feed, cutters with hard alloy plates, steel, cast iron grey.

REFERENCES

[1] Gassara, B., Sai, W.B. Modeling of spindle speed and feed rate considering the kinematic behavior of CNC lathe in face turning. Int J Adv Manuf Technol 136, 3387–3406 (2025). https://doi.org/10.1007/s00170-024-14978-7 – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-14978-7

[2] Truong, HS., Nguyen, TT., Bui, TA. (2025). Evaluating the Impact of Cutting Speed and Feed Rate on Surface Roughness Utilizing a Four-Insert Carbide Face Milling Cutter on CNC Machines. In: Hoang Tien, D., Solanki, V.K., Mahmud, J., Nguyen, T.D.L. (eds) Proceedings of the 1st International Conference on Sustainability and Emerging Technologies for Smart Manufacturing. SETSM 2024. Proceedings in Technology Transfer. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7083-0_34 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-7083-0_34

[3] Chen, Z., Huang, C., Liu, H. et al. Surface integrity and modification of SA508Gr.3Cl.2 RPV steel induced by high-speed face milling process. Int J Adv Manuf Technol 133, 2639–2653 (2024). https://doi.org/10.1007/s00170-024-13803-5 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-024-13803-5#citeas - URL: https://mammp-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40759-020-00045-7#citeas

[4] Tuyboyov Oybek Valijonovich, Toshtemirov Kamol Qahramonovich Tool wear prediction and management strategies in high-speed machining environments // Строительство и образование. 2024. № Спецвыпуск 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tool-wear-prediction-and-management-strategies-in-high-speed-machining-environments (дата обращения: 27.04.2025).
[5] Chen, G., Wu, K., Wang, Y. *et al.* Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition. *Int J Adv Manuf Technol* 127, 1165–1176 (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-11527-6 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11527-6#citeas
[6] Chhotaray, P., Behera, B.C., Mohamed, A., Muduli, K. (2024). Performance Evaluation of Inconel 800 Machining Under Dry Cutting Environment. In: Sahoo, S., Yedla, N. (eds) Recent Advances in Mechanical Engineering. ICRAMERD 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1080-5_24 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1080-5_24#citeas
[7] Chen, G., Wu, K., Wang, Y. et al. Effect of rotational speed and feed rate on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy manufactured by additive friction stir deposition. Int J Adv Manuf Technol 127, 1165–1176 (2023). https://doi.org/10.1007/s00170-023-11527-6 - URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11527-6
[8] Bhise, V.Y., Jogi, B.F. (2023). Investigations on the Machining of Inconel X-750: Effect of Cutting Speed, Feed, Forces, Energy Consumption and MRR. In: Pradeep Pratapa, P., Saravana Kumar, G., Ramu, P., Amit, R.K. (eds) Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization. NCMDAO 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3938-9_39 - URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3938-9_39
[9] Mohsen Soori, Behrooz Arezoo Cutting tool wear prediction in machining operations, a review // Journal of New Technology and Materials (JNTM) - Vol. 12, N°02 (2022) – pp. 15-26 – URL: https://hal.science/hal-03888252/document
[10] Bhushan, R.K. Impact of nose radius and machining parameters on surface roughness, tool wear and tool life during turning of AA7075/SiC composites for green manufacturing. Mech Adv Mater Mod Process 6, 1 (2020). https://doi.org/10.1186/s40759-020-00045-7 -
[11] Magdalena Łazińska, Tomasz Durejko, Tomasz Czujko, Zbigniew Bojar The Effect of the Traverse Feed Rate on the Microstructure and Mechanical

Properties of Laser Deposited Fe3Al (Zr,B) Intermetallic Alloy // Materials, May 2018 – V. 11 (5):792 - DOI: 10.3390/ma11050792 - URl: https://www.researchgate.net/publication/325152261_The_Effect_of_the_Traverse_Feed_Rate_on_the_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Laser_Deposited_Fe3Al_ZrB_Intermetallic_Alloy.

[12] Rajendra S Ghatode, Mahindra N Pande, Jeevan R Gaikwad Study of machining parameters while turning austenitic stainless steel AISI304 // International Journal of Academic Research and Development – V.3; Special Issue 2; March 2018 - pp. 14-20 – DOI: https://www.academia.edu/40352408/Study_of_machining_parameters_while_turning_austenitic_stainless_steel_AISI304

[13] Sridhar Atla, Mulugundam Siva Surya Influence of Cutting Fluids on Tool Wear and Surface Roughness During Turning of Aisi 316 Austenitic Stainless Steel // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) - Vol. 6 Issue 07, July – 2017 – pp. 112-115 – URL: https://www.academia.edu/83611584/Influence_of_Cutting_Fluids_on_Tool_Wear_and_Surface_Roughness_During_Turning_of_Aisi_316_Austenitic_Stainless_Steel

[14] D.L Zariatin, Reza Febriatna Analysis of Influence of Spindle Speed and Feeding Speed to Tool Wear and Surface Roughness // Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering_- Vol.1, No. 1, November 2016 - DOI: 10.22219/jemmme.v1i1.4480 – URL: https://www.researchgate.net/publication/318612191_Analysis_of_Influence_of_Spindle_Speed_and_Feeding_Speed_to_Tool_Wear_and_Surface_Roughness

[15] C.H.Shen The importance of diamond coated tools for agile manufacturing and dry machining // Surface and Coatings Technology – V. 86–87, Part 2, 15 December 1996 - pp. 672-677 - DOI: 10.1016 - URL: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02969-6

[16] Rajendrakumar V. Kadi, Suresh T. Dundur Optimization of dry turning parameters on surface roughness and hardness of Austenitic Stainless steel (AISI316) by Taguchi Technique // Journal of Engineering and Fundamentals - Vol. 2(2), pp. 30-41, December, 2015 – DOI: 10.17530 – URL: http://dx.doi.org/10.17530/jef.15.14.2.2

[17] Muataz Hazza F. Al Hazza, Nabilah Bt Md Yusof, Nur Amirah Najwa, Mohd Eikhwan, Mohamad Khazairul, Assem Hatem Taha Experimental study of flank wear in high speed turning of stainless steel AISI 304 // Journal of Advanced Science and Engineering Research - Vol 3, No 2 June (2013) – pp. 96-103 – URL: https://www.academia.edu/64924423/Experimental_study_of_flank_wear_in_high_speed_turning_of_stainless_steel_AISI_304

[18] Nithyanandhan.T, Manickaraj.K and Kannakumar.R. Optimization of Cutting Forces, Tool Wear and Surface Finish in Machining of AISI 304 Stainless Steel Material Using Taguchi's Method. // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, - Vol. 1 - Issue 4, June 2014. - pp. 488-493 – URL: https://ijiset.com/v1s4/IJISET_V1_I4_85.pdf
[19] M.Ramalinga Reddy, P.RavI Kumar. G.Krishna mohana rao. Effect of feed rate on the generation of surface roughness in turning // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST) (November 2011) - Vol. 3 No. 11 – pp. 8099-8105 - URL: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/EFFECT%20OF%20FEED%20RATE%20ON%20THE%20GENERATION%20OF%20SURFACE%20ROUGHNESS%20IN%20TURNING.pdf
[20] Ihsan Korkut, Mustafa Kasap, Ibrahim Ciftci, Ulvi Seker Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel // Materials and Design – V. 25 (2004) – pp. 303–305 – URL: https://www.academia.edu/21778446/Determination_of_optimum_cutting_parameters_during_machining_of_AISI_304_austenitic_stainless_steel
[21] Kyaturakis G., Baltrushaitis A., Rudak P. V., Kuis D. V. The effect of cutting and feeding speeds on the initial wear of wood-cutting tools // Proceedings of BSTU. 2014. - No. 2 – Forestry and woodworking industry – pp. 191-192 – URL: https://www.researchgate.net/publication/308750304_vlianie_skorostej_rezania_i_podaci_ha_nacalnyj_iznos_derevorezusego_instrumenta
[22] Otenii Ya.N. et al. Forces and stresses on the surfaces of the cutting blade when cutting metals / Oteniy Ya.N., Muravyov O.P., Epov A.A., Tumenov T.N., Zhunusova A.Sh., Tkacheva Yu.O., Pleshakova E.A., Yerakhtina A.V. // Fundamental Research. 2012. - No. 6 (part 1) - C. 155-157 - URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=29956.
[23] Cutting speed formula for automated calculation // Machine tool factory. Metalworking machines and tools – URL: https://www.axissteel.ru/skorost-rezaniya/
[24] Zhigalov A. N., Shaturov D. G., Zholobov A. A., Rantsevich A. S. Influence of geometric parameters of microrelief on the front surface of a carbide blade tool and processing modes on the process of build-up at low and medium cutting speeds // Bulletin of the Belarusian-Russian University. 2020. №3 (68). - URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskih-parametrov-mikroreliefa-na-peredney-poverhnosti-tverdosplavnogo-lezviynogo-instrumenta-i-rezhimov.
[25] Metal cutting modes. Guide. – 3rd ed., revised. and additional – M.: Mechanical engineering, 1972

[26] Kudryavtsev V. N., Paramonova V. A. Computational models for determining the mechanical properties of some normalized steels // Progressive technologies and systems of mechanical engineering - № 4 (83)’2023 – С. 19-24 – URL: https://ptsm.donntu.ru/arhiv%20nambe/pdf%20-83/019-024.pdf

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК: 621.7.07
doi:10.18720/SPBPU/2/id-148

М.Г. Лопатов[1], О.С. Тимофеева[2]

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛИСТОВОГО ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА



[1]Максим Геннадьевич Лопатов,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(937)652-3115, E-mail max.lopatov@rambler.ru.



[2]Ольга Сергеевна Тимофеева,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921) 794 8654, E-mail: olga2957869@mail.ru.

Аннотация

Листовое штамповочное производство отличается высокой скоростью и стабильностью процесса изготовления деталей с высокой повторяемостью формы, в связи с чем данная технология широко применяется в условиях массового производства. Однако, в условиях текущей политики импортозамещения и роста числа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, штамповка всё чаще применяется и для изготовления малых серий и единичных образцов продукции. В работе рассмотрены вопросы оптимизации технологической подготовки листового штамповочного производства. Результаты исследований показали, что значительного сокращения длительности ТПП можно достичь за счет внедрения в процессы технологической подготовки производства новых технологий, в частности, аддитивных. Применение современных технологий также может позволить значительно повысить скорость переналадки штамповочного оборудования. В данном исследовании представлен алгоритм применения аддитивных технологий в листовом штамповочном производстве.

Ключевые слова: Технологическая подготовка производства, листовая штамповка, аддитивные технологии, формообразующая деталь, мелкосерийное производство.

Введение

Согласно стратегии технологического развития Российской Федерации, на период до 2030 года национальная экономика должна обеспечивать производство высокотехнологичной продукции – чипов и другой микроэлектроники, высокоточных станков и робототехники, авиакосмической техники, беспилотников, телекоммуникационной техники и программного обеспечения. При этом доля отечественных товаров в общем объёме потребления должна составить не менее 75% [1]. Условиями создания такой продукции являются обязательное использование средств цифрового проектирования, применение информационных технологий мониторинга и управления процессами технологической подготовки производства (ТПП), а также применение новых технологий.

Конструкции современных приборов содержат множество различных деталей, для изготовления которых, как правило, применяются различные способы обработки материалов: механическая обработка резанием, обработка давлением, литьё под давлением, электрохимические, электрофизические способы обработки и другие. С помощью листовой штамповки изготавливают множество деталей приборов. Данный способ обработки отличается высокой повторяемостью, скоростью и дешевизной при производстве крупных партий изделий. Согласно статистике, предоставленной службой главного технолога авиаприборостроительного предприятия, способом листовой штамповки получают примерно 35-40% деталей приборов (рис. 1).



Рис. 1. Распределение способов обработки материалов на приборостроительном предприятии

Существующая в настоящее время стратегия импортозамещения способствует появлению большого числа опытно-конструкторских работ, в связи с чем необходимо изготавливать мелкие серии изделий и единичные образцы. В связи с тем, что длительность технологической подготовки производства в таких случаях превышает длительность непосредственно процесса штамповки, выявлять способы сокращения временных и финансовых затрат на процессы подготовки производства. Одним из важнейших показателей конкурентоспособного производства является показатель его гибкости – скорость переналадки. Применение новейших технологий может позволить вывести скорость переналадки оборудования на новый уровень.

По мнению авторов данной работы, перспективным направлением развития идей быстрой переналадки является внедрение аддитивных технологий для изготовления сменных формообразующих деталей (пуансон/нож и матрица).

Аддитивные технологии являются одной из самых быстроразвивающихся технологий и находят своё применение в различных областях [2-11]. Благодаря большому ассортименту используемых для печати материалов, а также разнообразным технологиям трёхмерной печати открываются широчайшие перспективы применения аддитивных технологий. К преимуществам аддитивных технологий относят эффективность при изготовлении сложных геометрических форм, высокую скорость изготовления изделий, а также относительную дешевизну оборудования и материалов. Однако, у данной технологии существуют и ограничения: используемые полимерные материалы могут не иметь требуемых физически свойств, а рабочие поверхности напечатанных деталей, как правило, требуют дополнительной обработки, что увеличивает длительность процесса.

В настоящее время осуществляются попытки внедрения аддитивных технологий в процессы технологической подготовки производства в различных областях промышленности. Многие исследователи уже исследовали потенциал внедрения аддитивных технологий в производственные процессы. Например, известны случаи повышения эффективности литьевого [12], штамповочного [13] и фрезерного [14] производств.

В России аддитивные технологии для инструментального производства – это относительно новая область. Несмотря на широкое применение аддитивных технологий в других отраслях, полное понимание их технических, инженерных и экономических аспектов отсутствует.

Методы

Задачей данной исследовательской работы является создание и апробация алгоритма внедрения аддитивных технологий в процесс технологической подготовки листового штамповочного производства. Для оценки эффекта от внедрения полимерную штамповую оснастку планируется использовать в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также для создания тестовых образцов деталей.

Благодаря проведённому в работе [15] анализу известно о возможности сокращения длительности и стоимости подготовки производства вплоть до 60% в условиях мелкосерийного производства. Все авторы отмечают, что применение аддитивных технологий для изготовления сменного комплекта формообразующих деталей (ФОД) может позволить сократить время ТПП штамповочного производства. В работах указывается, что длительность и стоимость изготовления полимерного комплекта ФОД с применением аддитивных технологий значительно ниже, чем изготовление такого же комплекта с помощью традиционных методов металлообработки (эрозионные, фрезерные и токарные работы).

Изготовленный с применением аддитивных технологий комплект ФОД из металлического порошка не уступает по прочностным характеристикам комплекту, изготовленному с применением традиционных технологий, однако на данный момент нет точного ответа из металлического порошка комплекта.

Результаты

В результате проведенного исследования был разработан алгоритм по внедрению аддитивных технологий в процесс ТПП:

1. Выбор объекта для изготовления методом штамповки, выбор штампа;
2. Проектирование объекта и ФОД в системе автоматического проектирования;
3. Моделирование технологического процесса в CAE-системе и выбор оптимального материала оснастки для 3D печати;
4. Выбор технологии печати и модели принтера для 3D печати в зависимости от технических требований к изделию;
5. Изготовление оснастки, штамповка изделия;
6. Анализ полученных результатов, выявление зависимостей, добавление информации в базу знаний и рекомендаций по выбору материалов 3D печати.

Главной целью данного алгоритма является составление базы данных для производства, благодаря которой появится возможность быстро и

безошибочно подбирать оптимальную технологию и подходящие для конкретных случаев материалы трёхмерной печати.

Далее представлена апробация части алгоритма. В качестве объекта для эксперимента было выбрано изделие из тонколистового (толщина 1 мм) алюминия (рис. 2). Величина партии - 50 деталей. В качестве САПР выбрана программа «Компас-3Д». В будущих исследованиях планируется использование модуля «Штампы-3Д», благодаря которого может сократиться не только время изготовления ФОД, но и время проектирования. На данный момент разработчик модуля проявил интерес к данному исследованию и готов предоставить данный модуль в пользование на безвозмездной основе.

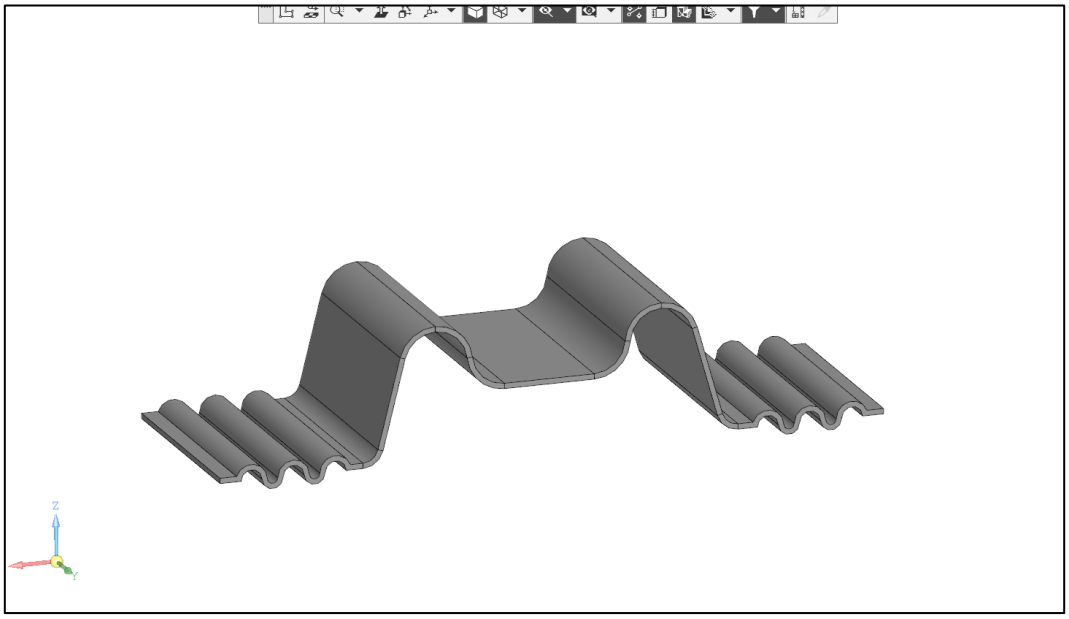


Рис. 2. Трёхмерная модель изделия

В качестве CAE системы выбрана программа «Simufact Forming», благодаря которой можно моделировать процессы штамповки, а также заниматься решением задач отладки и оптимизации технологических процессов (рис. 3).

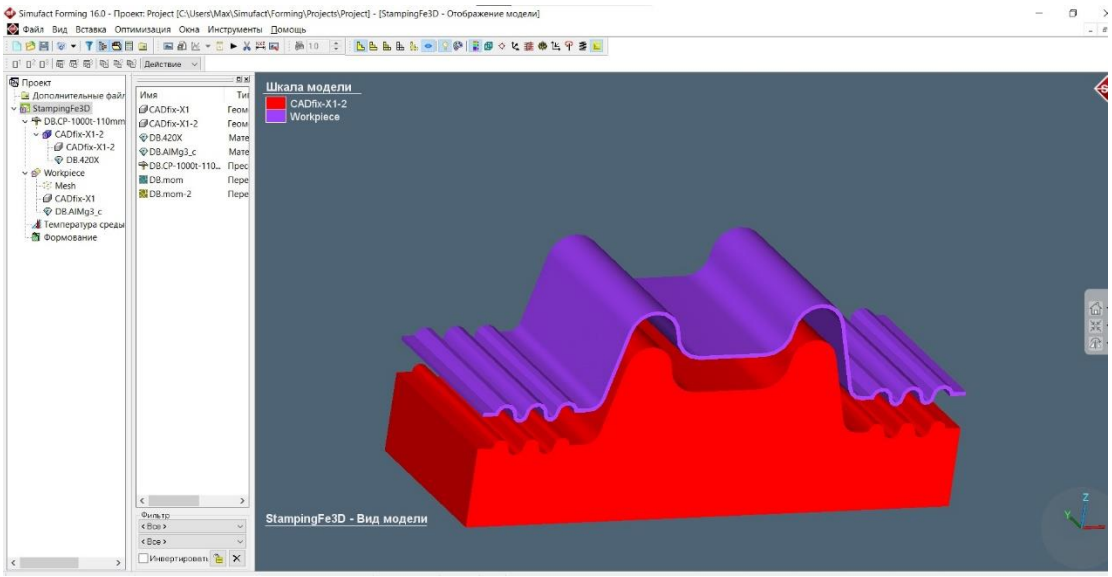


Рис. 3. Моделирование процесса штамповки в CAE-системе «Simufact Forming»

Для реализации экспериментального процесса штамповки выбран штамп ручного действия (рис. 4).



Рис. 4. Ручной пресс

В качестве аддитивного оборудования выбран FDM-принтер, а в качестве материала ФОД - полимер PETG. Данная технология 3D-печати является относительно дешёвой, а PETG пластик обладает достаточной прочностью для штамповки изделий из тонколистового алюминия.

Согласно исследованиям других авторов, таких ФОД хватает на 500-1000 рабочих ходов штампа (500-1000 отштампованных деталей), что соответствует мелкой серии. Стоит отметить, что у выбранной детали сложная геометрическая форма и изготовление ФОД (рис. 5,6) для такой детали классическим способом требует применения двух видов станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что усложняет технологию изготовления, а, следовательно, длительность и итоговую стоимость изделия.

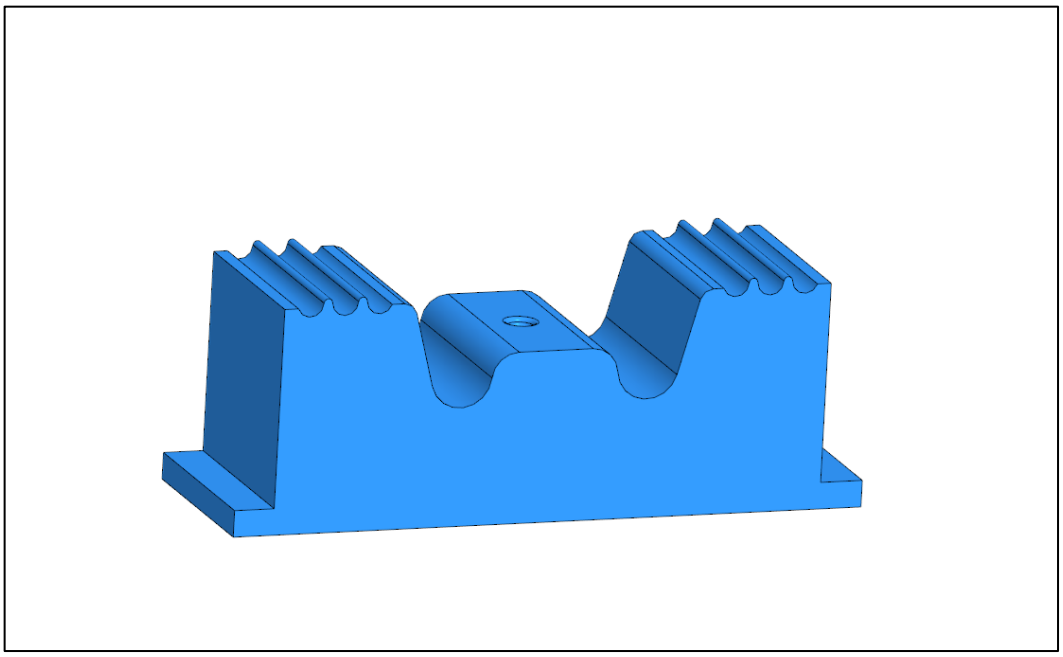


Рис. 5. Матрица

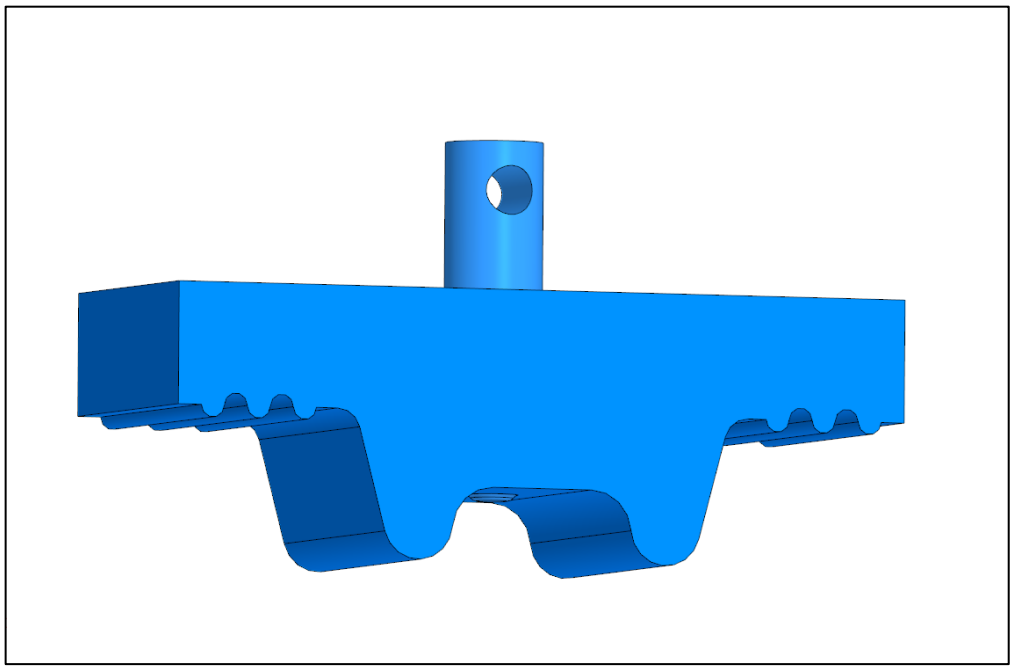


Рис. 6. Пуансон

На данном этапе исследования принято решение, что изготовление будет производиться на специализирующемся на трёхмерной печати предприятии. Для сравнения, был сделан заказ на опытно-экспериментальном производстве, где изготовление ФОД будет производиться с применением станков с ЧПУ. Сравнение предварительной стоимости и длительности изготовления ФОД представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение стоимости и времени изготовления оснастки

	Метод изготовления оснастки	
	ЧПУ (Фрезерная и эрозионная обработка)	Аддитивное (FDM-принтер)
Стоимость работы	55 тыс. руб.	15-20 тыс. руб.
Коэффициент использования материала	30-40%	90-100%
Стоимость материала	64 руб./кг	1500 руб./кг
Машинное время изготовления	15-20 часов	14-20 часов

Исходя данных, приведенных в таблице можно сделать вывод, что аддитивный метод (FDM-печать) изготовления оснастки обладает существенными преимуществами перед традиционным методом ЧПУ-обработки (фрезерная и эрозионная обработка) в отношении стоимости и использования материала. Хотя стоимость материала для FDM-печати значительно выше (1500 руб./кг против 64 руб./кг), более высокий коэффициент использования материала (90-100% против 30-40%) приводит к существенному снижению общей стоимости изготовления. Также стоит отметить, что вес полимерных ФОД значительно ниже ФОД изготовленных традиционными способами с помощью станков с ЧПУ. Время изготовления в обоих случаях же сопоставимо. Также стоит отметить, что вследствие использования двух станков с ЧПУ возникает вероятность брака или ошибки.

В итоге, несмотря на более высокую стоимость материала, аддитивный метод (FDM-печать) оказывается экономически более выгодным, благодаря значительному снижению отходов и стоимости работы.

Обсуждение

Результаты исследования показали, что благодаря внедрению аддитивных технологий можно существенно сократить длительность и стоимость изготовления штамповой оснастки. Данный результат призван в первую очередь показать, что аддитивные технологии – крайне перспективное направление для повышения конкурентоспособности промышленных предприятий.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие аддитивных технологий (синтез новых материалов, появление более совершенных 3D принтеров и тд.), что обуславливает повышение конкурентоспособности и получение экономической выгоды предприятиями, инвестирующими в данную область уже на текущий момент.

На текущий момент исследователи независимо друг от друга проводят экспериментальные исследования с изготовлением полимерных ФОД [16-20]. Однако эти эксперименты направлены лишь на определение принципиальной возможности реализации процесса штамповки с применением полимерной оснастки, что свидетельствует о необходимости проведения комплексных исследований, направленных на оптимизацию технологических параметров процесса печати, оценку долговечности полимерных инструментов, а также на изучение влияния различных факторов, таких как параметры печати, свойства полимерных материалов и других на качество получаемых изделий.

Заключение

Для полного раскрытия потенциала применения аддитивных технологий необходимо исследование взаимозависимостей выбора материалов, выявления требований к процессу печати и ограничений использования таких технологий. Обобщение и структуризация результатов уже проведенных экспериментов может существенно ускорить решение поставленной задачи, а также привлечь новых исследователей к решению данной задачи.

Применение изготовленной с помощью аддитивных технологий оснастки может быть эффективным решением при проверке правильности конструкции на этапах опытно-конструкторских работ или же применяться в мелкосерийном производстве при изготовлении малых серий изделий. В ходе дальнейшей исследовательской работы будут изготовлены описанные в работе ФОД, а также произведены эксперименты с большим количеством комбинаций материалов печати и материалов заготовок. Глобальным результатом данной работы будет являться обобщённая база знаний для выбора оптимальных материалов и технологий трёхмерной печати, в

зависимости от параметров изготавливаемой детали. Данная база будет удобным инструментом для быстрого и эффективного проектирования и производства оснастки, сокращая длительность и стоимость разработки и изготовления единичных опытных образцов и малых партий продукции. Она позволит инженерам-технологам принимать обоснованные решения при выборе оптимальных материалов и параметров печати для конкретных задач, минимизируя риски и повышая эффективность процесса ТПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Концепция технологического развития на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. N 1315-р;

[2] Егоров, К. Н. Аддитивные технологии в медицине: области и технологии применения, преимущества, недостатки и перспективы развития / К. Н. Егоров, С. А. Егорова, В. Г. Петрякова // Перспективы развития науки в современном мире : Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Уфа, 29 июня 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2021. – С. 21-41.

[3] Нагибович, О. А. Современное состояние и перспективы клеточных технологий, аддитивного производства и тканевой инженерии в военной медицине / О. А. Нагибович, А. С. Голота, А. Б. Крассий // Военно-медицинский журнал. – 2019. – Т. 340, № 4. – С. 60-63.

[4] Смуров, И. Ю. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность / И. Ю. Смуров, С. Г. Конов, Д. В. Котобан // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 2(14). – С. 11-22. – EDN TONSTV.

[5] Дремухин, М. А. Применение аддитивных технологий в машиностроении для изготовления формообразующей оснастки / М. А. Дремухин, В. Н. Наговицин // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 1(39). – С. 21-28. – DOI 10.26732/j.st.2022.1.03.

[6] Суворов, А. П. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей / А. П. Суворов, А. В. Кузовкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 2(41). – С. 9-15. – EDN YPZERJ.

[7] Чемодуров, А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А. Н. Чемодуров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 210-217.

[8] Мирошниченко, В. С. Аддитивные технологии в литейном производстве / В. С. Мирошниченко, А. Н. Голофаев, Н. А. Тараненко // Металлургия XXI столетия глазами молодых: СБОРНИК ДОКЛАДОВ V международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 22 мая 2019 года / Отв. ред. Кочура В.В.. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2019. – С. 111-113.
[9] Гайсина, Д. Г. Аддитивные технологии в ювелирном производстве / Д. Г. Гайсина // Research and development - 2024: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 20 мая 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 34-40.
[10] Лунева, Д. А. Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 90-101. – DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08.
[11] 3D-печать в строительстве / Н. И. Ватин, Л. И. Чумадова, И. С. Гончаров [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1(52). – С. 27-46. – DOI 10.18720/CUBS.52.3.
[12] Яблочников, Е. И. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов / Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, А. В. Пирогов // Металлообработка. – 2013. – № 5-6(77-78). – С. 74-80. – EDN SBOFEH.
[13] Fabio Tondini, Ulfar Arinbjarnar, Alberto Basso, Chris Valentin Nielsen, 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production, Procedia CIRP, Volume 103, 2021, Pages 91-96, ISSN 2212-8271
[14] Бруев, В. Н. Применение гибридных технологий в аэрокосмической промышленности / В. Н. Бруев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей LXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 декабря 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 88-90. – EDN VOQPYU.
[15] Лопатов М.Г., Тимофеева О.С. Применение аддитивных технологий в технологической подготовке листового штамповочного производства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2025. - Т. 68. - № 4
[16] Определение механических свойств вытяжного инструмента, изготовленного методом FDM-печати // Сережкин М.А., Гроссман М.Ф. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 4 (360). С. 172-183.

[17] Klimyuk D., Serezhkin M., Plokhikh A. Application of 3D printing in sheet metal forming // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol.38. P. 1579–1583
[18] Frohn-Sörensen, P., Geueke, M., Tuli, T.B. et al. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing. Int J Adv Manuf Technol 115, 2623–2637 (2021).
[19] Schuh G., Bergweiler G., Bickendorf P., Fiedler F., Colag C. Sheet metal forming using additively manufactured polymer tools // Procedia CIRP. 2020. Vol.93. P. 20–25.
[20] Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe, Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer, Procedia Manufacturing, Volume 15, 2018, Pages 737-742, ISSN 2351-9789,

M.G. Lopatov, O.S. Timofeeva

PERSPECTIVES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES APPLICATION FOR TECHNOLOGICAL PREPARATION OF SHEET METAL STAMPING PRODUCTION

ITMO University, Russia

Abstract

Sheet metal stamping is characterized by high speed and stability of the process of manufacturing parts with high repeatability of shape, therefore, this technology is widely used in the conditions of mass production. However, under the current policy of import substitution and the growing number of research and development work, stamping is increasingly used for the manufacture of small series of products. The paper considers the issues of optimization and reduction of time of technological preparation of sheet metal stamping production. The results of the research have shown that significant changes are noted due to the introduction of new technologies, in particular, additive technologies, into the processes of technological preparation of production. The application of modern technologies can also allow for a significant increase in the speed of changeover of stamping equipment. This study presents an algorithm for the application of additive technologies for sheet metal stamping production.

Key words: Technological preparation of production, sheet metal stamping, additive technologies, forming part, small-scale production.

REFERENCES

[1] The concept of technological development for the period up to 2030, approved by the order of the Government of the Russian Federation from 20 May 2023 N 1315-r;

[2] Egorov, K. N. Additive technologies in medicine: areas and technologies of application, advantages, disadvantages and prospects of development / K. N. Egorov, S. A. Egorova, V. G. Petryakova // Prospects for the development of science in the modern world : Collection of scientific articles on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Ufa, 29 June 2021. - Ufa: Limited Liability Company 'Scientific and Publishing Centre "Vestnik nauki", 2021. - C. 21-41.
[3] Nagibovich, O. A. Current state and prospects of cell technologies, additive manufacturing and tissue engineering in military medicine / O. A. Nagibovich, A. S. Golota, A. B. Krassiy // Military Medical Journal. - 2019. - T. 340, № 4. - C. 60-63.
[4] Smurov, I. Yu. On the introduction of additive technologies and production in the domestic industry / I. Yu. Smurov, S. G. Konov, D. V. Kotoban // Novosti materialovedeniya. Science and Technology. - 2015. - № 2(14). - C. 11-22. - EDN TONSTV.
[5] Dremukhin, M. A. Application of additive technologies in mechanical engineering for manufacturing of moulding tooling / M. A. Dremukhin, V. N. Nagovitsin // Spacecrafts and technologies. - 2022. - T. 6, № 1(39). - C. 21-28. - DOI 10.26732/j.st.2022.1.03.
[6] Suvorov, A. P. Use of additive technologies in the production of shaped surfaces / A. P. Suvorov, A. V. Kuzovkin // Bulletin of P. A. Solovyov Russian State Automobile Technical Academy named after P. A. Solovyov. - 2017. - № 2(41). - C. 9-15. - EDN YPZERJ.
[7] Chemodurov, A. N. Application of additive technologies in the production of engineering products / A. N. Chemodurov // Izvestia Tula State University. Technical Sciences. - 2016. - № 8-2. - C. 210-217.
[8] Miroshnichenko, V. S. Additive technologies in foundry production / V. S. Miroshnichenko, A. N. Golofaev, N. A. Taranenko // Metallurgy of the XXI century through the eyes of the young: Collection of reports of the V international scientific-practical conference of young scientists and students, Donetsk, 22 May 2019 / Edited by V. V. Kochura. - Donetsk: Donetsk National Technical University, 2019. - C. 111-113.
[9] Gaisina, D. G. Additive technologies in jewellery production / D. G. Gaisina // Research and development - 2024: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, May 20, 2024. - Petrozavodsk: International Centre for Scientific Partnership 'New Science' (IP Ivanovskaya I.I.), 2024. - C. 34-40.
[10] [Luneva, D. A. Application of 3d-printing in construction and prospects of its development / D. A. Luneva, E. O. Kozhevnikova, S. V. Kaloshina // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture. - 2017. - T. 8, № 1. - C. 90-101. - DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08.

[11] 3D printing in construction / N. I. Vatin, L. I. Chumadova, I. S. Goncharov [et al] // Construction of unique buildings and structures. - 2017. - № 1(52). - С. 27-46. - DOI 10.18720/CUBS.52.3.
[12] [Yablochnikov, E. I. Effectiveness of additive technologies for manufacturing of injection moulds and in preparation of production of products from thermoplastic polymeric materials / E. I. Yablochnikov, A. A. Gribovsky, A. V. Pirogov // Metalloobrabotka. - 2013. - № 5-6(77-78). - С. 74-80. - EDN SBOFEH.
[13] Fabio Tondini, Ulfar Arinbjarnar, Alberto Basso, Chris Valentin Nielsen, 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production, Procedia CIRP, Volume 103, 2021, Pages 91-96, ISSN 2212-8271
[14] Bruev, V. N. Application of hybrid technologies in the aerospace industry / V. N. Bruev // Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations : collection of articles of the LXII International Scientific and Practical Conference, Penza, 15 December 2022. - Penza: Science and Enlightenment (IP Gulyaev G.Yu.), 2022. - С. 88-90. - EDN VOQPYU.
[15] Lopatov, M.G.; Timofeeva, O.S. Application of the additive technologies in the technological preparation of the sheet stamping production (in Russian) // Izvestia vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Instrumentation - 2025. - Т. 68. - № 4
[16] [Determination of the mechanical properties of the drawing tool made by FDM-printing // Serezhkin, M.A.; Grossman, M.F. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. № 4 (360). С. 172-183.
[17] [Klimyuk D., Serezhkin M., Plokhikh A. Application of 3D printing in sheet metal forming // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol.38. P. 1579-1583
[18] Frohn-Sörensen, P., Geueke, M., Tuli, T.B. et al. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing.Int J Adv Manuf Technol 115, 2623-2637 (2021).
[19] Schuh G., Bergweiler G., Bickendorf P., Fiedler F., Colag C. Sheet metal forming using additively manufactured polymer tools // Procedia CIRP. 2020. Vol.93. P. 20-25.
[20] Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe, Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer, Procedia Manufacturing, Volume 15, 2018, Pages 737-742, ISSN 2351-9789,

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 62-213:681.7-1/-9:691.175:621.375.826
doi:10.18720/SPBPU/2/id-149

П.А. Пьяе[1], К.П. Помпеев[2], О.С. Васильев[3]

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА



[1]Пьяе Пьое Ай,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79602658741, E-mail: northernstar.phyo@gmail.com



[2]Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru



[3]Олег Сергеевич Васильев,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79500419019, E-mail: tesla_90@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается вопрос создания лазерных установок, структура которых формируется по модульному принципу, что обеспечивает их переконфигурацию в соответствии с потребностями заказчика. В отличие от традиционных непереконфигурируемых лазерных систем, предназначенных для выполнения конкретных задач, предлагаемая концепция рассматривает лазерную головку как функциональный модульный инструмент. Лазерная установка, созданная по модульному принципу, включает в себя силовой модуль, лазерный модуль, модуль управления, функциональный модульный инструмент и модуль осей перемещения. Особое внимание уделяется разработке компактных, легких и эргономичных пластиковых корпусов лазерных головок, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий. Такой подход позволит создавать кастомизированное производственное оборудование,

адаптируемое под различные виды лазерной обработки и способное функционировать в труднодоступных местах.

Ключевые слова: модульная лазерная установка, переконфигурируемое оборудование, функциональный модульный инструмент, лазерная головка, модульный принцип, кастомизация, полимерные материалы, аддитивные технологии

Введение

Большинство современных лазерных установок представляют собой единые, как правило, непереконфигурируемые конструкции, предназначенные для выполнения определенного вида работ, и неперестраиваемые под выполнение каких-либо других видов лазерной обработки. Например, лазерная установка для проведения гравировальных или маркировочных работ не предназначена для выполнения работ по лазерной резке или сварке [1-3]. Это разные виды лазерного оборудования, каждый из которых спроектирован для решения узкоспециализированных задач, что значительно ограничивает функциональную гибкость этих устройств и увеличивает издержки при необходимости выполнения различных технологических операций.

Такой подход к проектированию лазерных установок существенно ограничивает их применение в условиях современного производства, требующего быстрой адаптации и гибкости технологического оборудования. При этом производители вынуждены приобретать несколько различных типов лазерных установок для решения разнообразных задач, что приводит к увеличению капитальных затрат и площадей, занимаемых оборудованием.

Целью данной работы является создание такой модульной структуры лазерной установки, которая обеспечивала бы возможность переконфигурации установки и быстрое подключение модулей друг к другу для изменения характеристик получающегося оборудования в соответствии с потребностями заказчика, в котором лазерная головка является функциональным модульным инструментом.

Реализация данной концепции позволит существенно расширить функциональные возможности лазерного оборудования, сократить затраты на его приобретение и эксплуатацию, а также обеспечить гибкость производственных процессов.

Модульный принцип, как основа метода создания перспективного лазерного оборудования

Современная тенденция создания перестраиваемого, быстро переналаживаемого и переконфигурируемого оборудования приводит к

необходимости проектирования такого оборудования по модульному принципу [4-21]. С этой точки зрения в лазерном оборудовании в качестве функционального модуля можно выделить его лазерную головку и рассматривать ее как функциональный модульный инструмент, встраиваемый в различное оборудование (технологическую установку, станок или промышленный робот) и быстро присоединяемый к нему, а также используемый для высокоэффективной обработки [21]. При этом для любой лазерной установки, построенной по модульному принципу, в общем случае, можно выделить следующие составляющие: силовой модуль (блок питания); лазерный модуль (источник лазерного излучения, например, волоконный лазер); модуль управления установкой (персональный компьютер со специализированным программным обеспечением); функциональный модульный инструмент (лазерная головка); модуль осей (линейных и поворотных) перемещений лазерной головки. При этом монтаж модулей лазерной установки целесообразно проводить на сборную (стационарную или мобильную) конструкцию.

Как уже было сказано выше, в современных условиях любое оборудование, в том числе лазерное, должно быть:

- перестраиваемым [4, 5];
- быстро переналаживаемым [9-13];
- переконфигурируемым [4, 6-8];
- модульным [14-21].

Перестройка оборудования представляет собой переход от одного процесса к другому, когда оборудование адаптируется для выполнения различных задач, например, от гравирования (маркировки) к созданию QR-кодов.

Переналадка оборудования представляет собой его наладку на изготовление других изделий из-за их сменны, или его переналадку, например, при изменении размеров однотипных изготовливаемых изделий, или изменение отдельных элементов, например, замену объектива для настройки фокусного расстояния. Это происходит внутри одной конфигурации оборудования.

Переконфигурация оборудования связана с изменением его структуры и характеристик его составных частей, например, применительно к лазерному оборудованию замену источника лазерного излучения на более мощный или установку нового модуля, такого, как поворотное (делительное) устройство. Это позволяет использовать оборудование для разных задач, например, для лазерного 2D- или 3D-гравирования, либо лазерной обработки плоских поверхностей или поверхностей вращения.

Модульность оборудования связана с возможностью быстрой замены его составных частей. С точки зрения реализации модульного принципа при проектировании производственного оборудования, составляющими

модульной лазерной установки являются взаимозаменяемые функциональные блоки, которые могут быть оперативно интегрированы в единую систему.

На рисунке 1 представлена предлагаемая модульная структура лазерной установки, а также схема внедрения ее лазерной головки (ЛГ), рассматриваемой как функциональный модульный инструмент, в обрабатывающий центр (ОЦ) с ЧПУ [22-24].

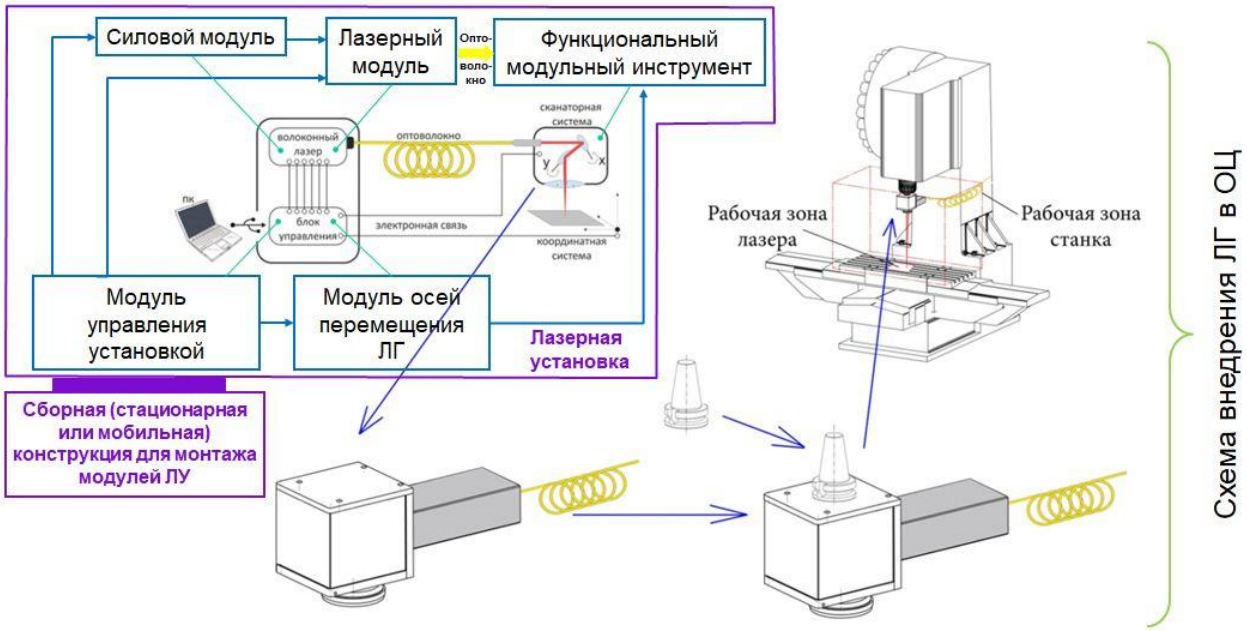


Рис. 1. Модульная структура лазерной установки и схема внедрения ЛГ в ОЦ

Для монтажа представленных на рисунке 1 модулей лазерной установки необходимо использование сборной (стационарной или мобильной) конструкции, обеспечивающей быстрое соединение и разъединение компонентов, а также их надежную фиксацию в процессе эксплуатации. Такая архитектура позволяет не только адаптировать оборудование под различные технологические задачи, но и оперативно заменять вышедшие из строя модули без необходимости полного демонтажа установки.

Особенности использования лазерных головок для труднодоступных мест

Лазерная обработка изделий в труднодоступных местах замкнутого пространства требует перемещения в зону обработки лазерного инструмента, в качестве которого можно рассматривать различные лазерные головки, устанавливаемые консольно на специальных кронштейнах, выдвижных стрелах или руке робота. В связи с этим лазерные головки должны обладать с одной стороны компактными

размерами, а с другой – малой массой для обеспечения их точного позиционирования без перекосов.

Работа в ограниченном пространстве предъявляет повышенные требования к маневренности и эргономике лазерного инструмента. Необходимость точного позиционирования головки в труднодоступных местах определяет важность минимизации ее массы и габаритов при сохранении всех функциональных характеристик. Кроме того, конструкция должна обеспечивать защиту оптических элементов от загрязнений и повреждений, возникающих при работе в стесненных условиях.

В то же время с точки зрения эргономики объект, перемещаемый в труднодоступные места, должен обладать кроме компактных размеров еще и обтекаемой формой, что снижает вероятность зацепления за элементы конструкций и облегчает маневрирование в ограниченном пространстве. Аэродинамический профиль корпуса также способствует лучшему отводу продуктов лазерной обработки от рабочей зоны, что повышает качество обработки и срок службы оптических элементов.

Указанные особенности использования и эргономики лазерных головок для труднодоступных мест определяют их требуемый форм-фактор, при изменении которого должны сохраняться свойства объекта (изделия), в данном случае это работоспособность лазерной головки.

Инновационные подходы к созданию лазерных головок

Обеспечить требуемый форм-фактор лазерных головок, то есть их компактные размеры, обтекаемую форму и малую массу, способны, во-первых, замена металлического материала корпусных деталей лазерных головок на пластик (полимерный материал), а во-вторых, изменение их конструкции для изготовления деталей на аддитивных установках [25, 26].

Применение современных высокотехнологичных полимерных материалов позволяет значительно снизить массу лазерной головки при сохранении необходимой прочности и жесткости конструкции. Дополнительным преимуществом использования полимеров является возможность создания более сложных форм, оптимизированных с точки зрения аэродинамики и эргономики.

Аддитивные технологии открывают новые возможности для проектирования внутренней структуры лазерных головок, позволяя создавать оптимизированные конструкции с внутренними каналами охлаждения, интегрированными элементами крепления и точно рассчитанными зонами армирования в местах повышенной нагрузки. Это обеспечивает повышенную надежность и долговечность изделия при минимальной массе.

Кроме того, применение аддитивных технологий значительно сокращает время разработки и внедрения новых моделей лазерных головок, позволяя быстро адаптировать конструкцию под конкретные требования заказчика и специфику выполняемых работ. Возможность быстрого прототипирования и итеративной доработки конструкции существенно снижает затраты на разработку и повышает конкурентоспособность предлагаемых решений.

Для производства деталей полимерных корпусов лазерных головок, используемых в лазерных установках «ТурбоМаркер» и «МиниМаркер2», был опробован ряд аддитивных технологий, таких как, FDM, SLA и SLS, из которых наилучший результат с учетом иссследования разработанных консрукций корпусов ЛГ в CAE-системе [25, 26] был получен при использовании технологии SLS, при печати их деталей из полиамида марки ПА12.

Результаты

Возможности современного аддитивного оборудования и область применения полиамида марки ПА12 позволили выбрать этот материал для 3D-печати полимерных деталей корпуса ЛГ. Его механические характеристики представлены в таблице 1. Полиамид ПА12 легче дюралюминия более чем в 2,7 раза, поэтому его использование существенно снизит расход материала и материалоемкость конечного изделия [25, 26].

Таблица 1. Механические свойства материала ПА12

Характеристика	Единицы измерения	Минимальное значение	Максимальное значение
Прочность на изгиб	МПа	70	85
Плотность	кг/м^3	1010	1020
Коэффициент трения		0.3	0.4
Сила удара	Дж/см	0.5	2
Модуль сдвига	МПа	300	500
Предел прочности	МПа	35	55
Модуль Юнга	МПа	1270	2600
Относительное удлинение	%	120	300

Анализ конструкции корпуса лазерной головки (см. рисунок 2, *а*), входящей в состав лазерной установки «ТурбоМаркер» [22, 23], показал, что одновременно с заменого металлического материала на пластик можно

некоторые узлы ЛГ вынести за пределы ее корпуса. Это с одной стороны позволило уменьшить размеры самого корпуса и снизить его материалоёмкость, а с другой – сделать лазерную головку более компактной.

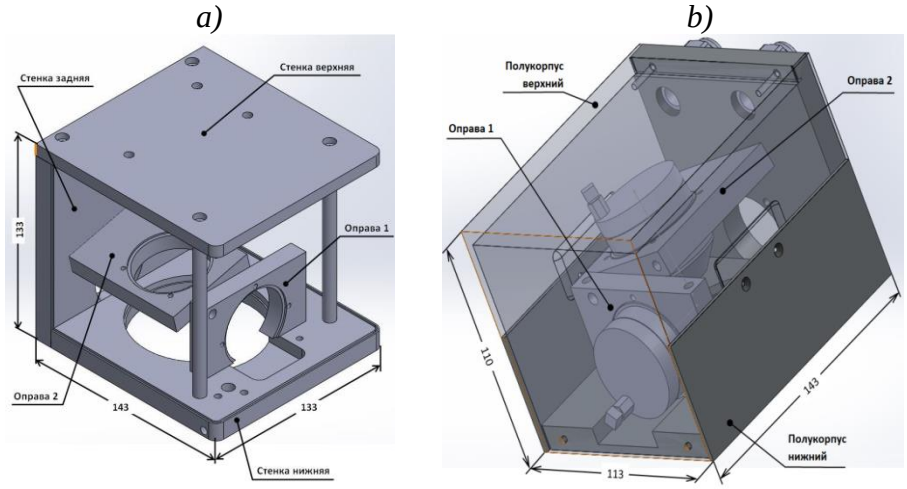


Рис. 2. Конструкция корпуса ЛГ лазерной установки «ТурбоМаркер» до и после изменения его топологии: *a)* с исходной топологией; *b)* с измененной топологией

При этом в корпусе ЛГ была изменена конструкция его нижней, задней и верхней стенок, а также кожуха, в результате которой из четырех простых деталей были получены две комбинированные более сложные по своей конструкции – полукорпус нижний и полукорпус верхний (см. рисунок 2, *б*). За счет вывода управляющей платы за пределы корпуса ЛГ удалось уменьшить его габаритные размеры по высоте и ширине. Кроме того, были внесены изменения в конструкцию опор сканаторов, чтобы обеспечить их крепление внутри корпуса специальными шпильками вместо винтов, а также для обеспечения внешнего подключения кабелей сканаторов к управляющей плате, вынесенной за пределы корпуса ЛГ, было предложено использовать их специальные пластиковые выводы, заворачиваемые в заднюю стенку полукорпуса нижнего [25, 26].

Анализ существующей конструкции лазерной головки (см. рисунок 3, *а*), входящей соответственно в состав лазерной установки «МиниМаркер 2», также позволил сделать вывод о наличии возможности вынесения управляющих плат сканаторов за пределы корпуса ЛГ. Другой вывод заключается в том, что габариты размещаемых в корпусе ЛГ сканаторов влияют на возможность в той или иной степени сократить размеры корпуса. С учетом этих выводов была проведена модификация конструкции деталей корпуса. В итоге это позволило уменьшить габаритные размеры корпуса ЛГ (см. рисунок 3, б), то есть обеспечить его компактность, а также сохранить собираемость и ремонтопригодность самой ЛГ.

a) *b)*

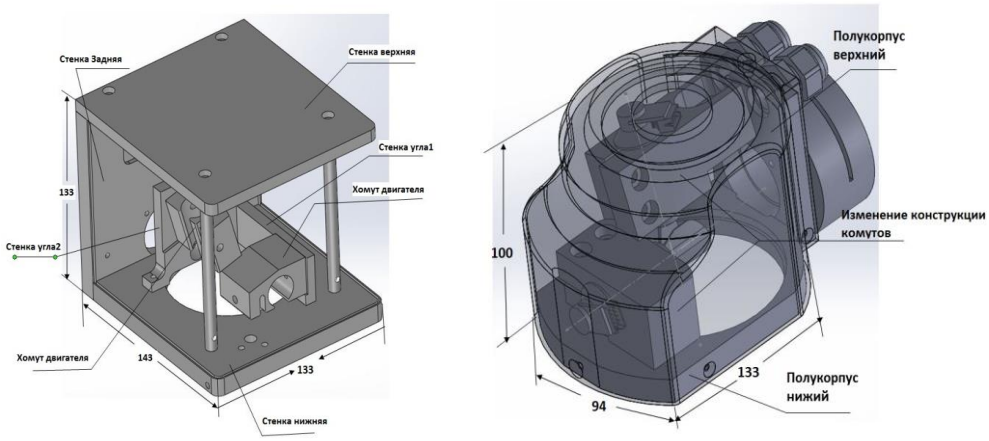


Рис. 3. Конструкция корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2» до и после изменения его топологии: *a)* с исходной топологией; *b)* с измененной топологией

Так для лазерной установки «ТурбоМаркер» удалось сократить размеры корпуса ЛГ по его ширине (Ш) и высоте (В) без глубины (Г) со 133 мм до 113 мм и 110 мм соответственно (см. рисунок 2) и общее количество деталей корпуса довести до четырех [25, 26], а для лазерной установки «МиниМаркер 2», у которой сканаторы по габаритам приблизительно в два раза меньше, удалось сократить все три габаритных размера (Ш×В×Г) со 133×133×143 мм до 94×100×133 мм (см. рисунок 3).

В последнем случае дополнительно за счет изменения конструкции хомутов, удерживающих сканаторы, а также их объединения между собой и с нижним полукорпусом в единую конструкцию общее количество деталей корпуса сократилось до двух и увеличилась жесткость нижнего полукорпуса.

Для проверки корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2» на собираемость и выявления недостатков его конструкции в качестве первых опытных образцов были изготовлены его детали на 3D-принтере (см. рисунок 4), которые затем были подвергнуты окончательной постобработке.

a) *b)* *c)*

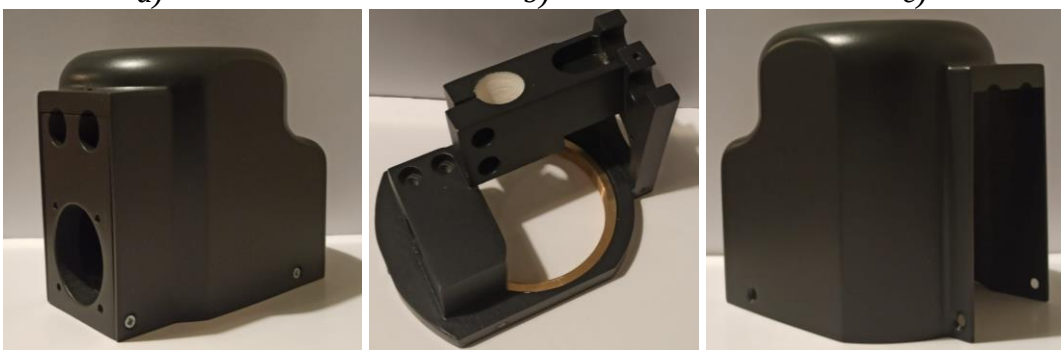


Рис. 4. Детали первого опытного корпуса лазерной головки, изготовленные из полиамида ПА 12 на 3D-принтере по технологии SLS: *a)* корпус лазерной головки в сборе; *b)* нижний полукорпус; *c)* верхний полукорпус

Обсуждение

Для проверки работоспособности ЛГ она была собрана и установлена на лазерный маркировщик «МиниМаркер 2» вместо штатной ЛГ (см. рисунок 5).

a) *b)*

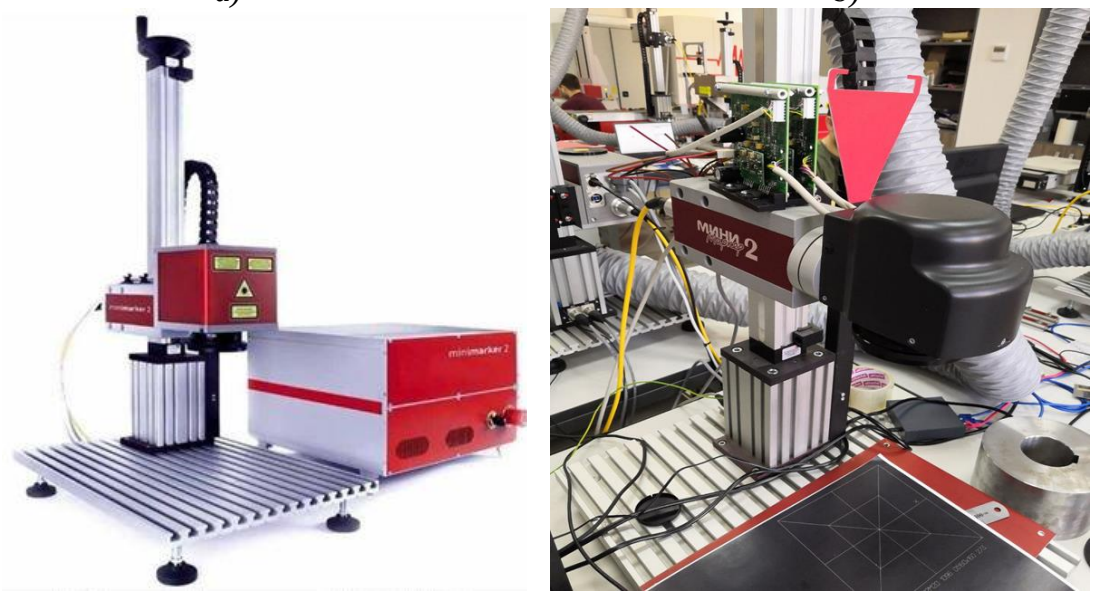


Рис. 5. Лазерный маркировщик «МиниМаркер 2», оснвщенный: *a)* штатной ЛГ; *b)* ЛГ с модифицированным полимерным корпусом

При этом в первую очередь были проверены на собираемость как конструкция полимерного корпуса ЛГ, так и ЛГ в целом. При всей «легкости» сборки корпуса и самой ЛГ были выявлены недостатки его конструкции и изготовления, а также определены способы их устранения. Детальный анализ этих недостатков способствовал дальнейшему совершенствованию как конструкторских решений, так и производственных процессов.

Первый недостаток заключается в том, что тонкие стенки верхнего полукорпуса после его изготовления на 3D-принтере в отличие от сборочной 3D-модели корпуса неплотно прилегают к боковым поверхностям нижнего полукорпуса по всему периметру. Из-за нарушения герметичности конструкции в образующиеся щели со временем при эксплуатации лазерной установки в цехе будет проникать пыль и влажность, что неудовлетворительно скажется на функционировании сканаторов и зеркал, расположенных в корпусе ЛГ, и ввинченном в него объективе, а также на передаче лазерного луча в зону обработки.

Второй недостаток связан с тем, что резьбы под крепление полукорпусов друг к другу и хомута снаружи к задней стенке нижнего полукорпуса при завинчивании в них стальных винтов «срываются» после поджатия соединяемых деталей друг к другу. Срыв резьбы не только затрудняет сборку и обслуживание устройства, но и может привести к

необходимости полной замены деталей, что увеличивает стоимость и время производства.

При ручном нарезании резьбы М14 в отверстиях, большая часть которых расположена на задней стенке нижнего полукорпуса, а малая часть – торце верхнего полукорпуса, требовалось выполнить такое закрепление в тисках предварительно собранного корпуса, которое не обеспечить на фрезерном станке с ЧПУ. Этот недостаток указывает на проблемы технологичности конструкции.

Для устранения первого недостатка в конструкцию полукорпусов было введено их соединение по периметру по типу «паз-шип». Второй недостаток был устранен заменой резьбовых отверстий гладкими немного большего диаметра и введением в конструкцию нижнего полукорпуса специальных углублений под гайки, ориентирующих их так, чтобы они не проворачивались при завертывании винтов особенно при поджатии соединяемых деталей друг к другу. От выпадения гаек из углублений проводилась их фиксация силиконовым герметиком. Третий недостаток был устранен отказом от резьбовых отверстий и тем, что в месте расположения этих отверстий и сопряжения полукорпусов в конструкцию верхнего полукорпуса введены два специальных зубца, входящих в пазы нижнего полукорпуса с получением гладких сквозных отверстий, образующих специальный вывод кабелей сканаторов для их внешнего подключения к управляющим платам, вынесенным за пределы корпуса ЛГ, одновременно поджимающих эти кабели.

Кроме того, на основе опыта проектирования корпуса ЛГ для лазерной установки «ТурбоМаркер» с анализом его прочности и жесткости в CAE-модуле CAD-системы SolidWorks в конструкцию нижнего полукорпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2», в его нижнюю стенку введены выборки и ребра жесткости для уменьшения расхода полимерного материала при его изготовлении. При использовании сплошных деталей корпуса ЛГ предлагаемой конструкции второго опытного образца его материалоемкость снижается в 5,1 раза, а при использовании деталей с выборками и ребрами жесткости – в 5,5 раз.

Получившаяся новая конструкция верхнего и нижнего полукорпусов позволила отказаться от проведения их окончательной постобработки. После перепроектирования корпуса ЛГ он также был изготовлен на 3D-принтере (см. рисунок 6) для сборки второй опытной ЛГ.

При этом полная сборка первой опытной ЛГ, несмотря на выявленные недостатки конструкции ее корпуса, и ее монтаж в лазерную установку показали, что оптическая система не нарушена и ее юстировка была проведена без каких-либо проблем, то есть установка оказалась полностью готовой к эксплуатации.

a) *b)* *c)*



Рис. 6. Детали второго опытного корпуса лазерной головки, изготовленные из полиамида ПА 12 на 3D-принтере по технологии SLS: *a)* корпус лазерной головки в сборе; *b)* нижний полукорпус; *c)* верхний полукорпус

Одним из условий снижения материалоемкости и внесения изменений в конструкцию корпуса ЛГ является сохранение его прочности и жесткости, так как их значительное снижение может привести к недопустимому отклонению лазерного луча от вертикали, и, следовательно, отразиться на функционировании самой лазерной головки. Для выяснения этого обстоятельства в CAE-модуле CAD-системы SolidWorks был проведен сравнительный анализ прочности и жесткости корпуса ЛГ.

Результаты сравнительного анализа, проведенные в CAE-модуле CAD-системы SolidWorks, для варианта конструкции корпуса ЛГ, входящей в состав лазерной установки «ТурбоМаркер», представлены в [25, 26], а для варианта конструкции корпуса ЛГ, входящей в состав лазерной установки «МиниМаркер 2» на рисунках 7 и 8. Для каждого варианта конструкции корпуса ЛГ проверялась его прочность под действием силы тяжести, возникающей под собственным весом.

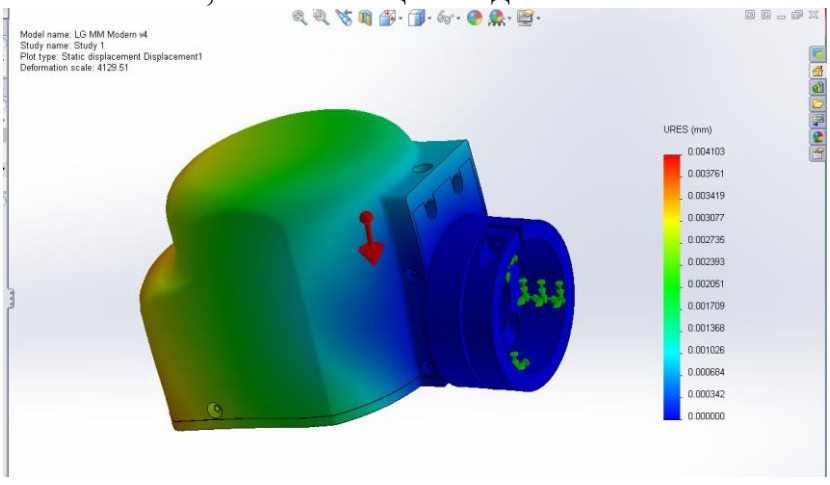


Рис. 7. Результат моделирования деформации пластикового корпуса ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2»

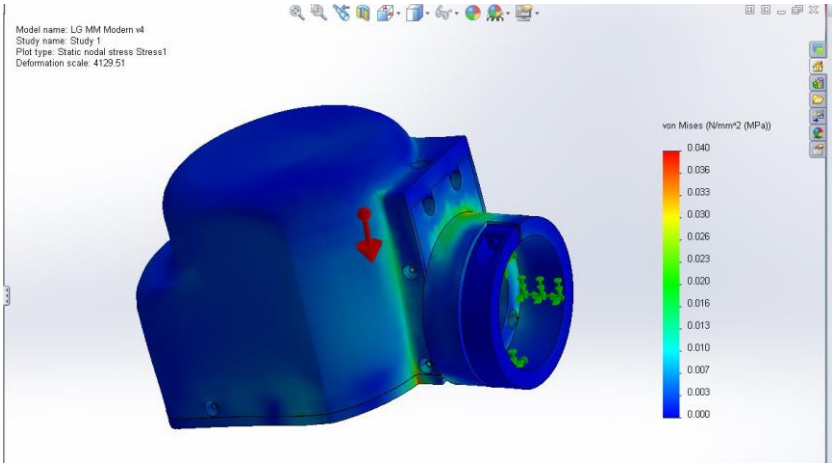


Рис. 8. Результат моделирования растягивающих напряжений, возникающих в пластиковом корпусе ЛГ лазерной установки «МиниМаркер 2»

Результаты моделирования процесса деформации для вариантов корпуса ЛГ убедительно показали, что для его деталей, выполненных из дюралюминия Д16, можно заменить материал на пластик PA 12 и изготовить их на 3D-принтере по технологии SLS. Также эффективным является введение в конструкцию деталей корпуса выборок и ребер жесткости, так как его материалоемкость при этом существенно снижается (в 5,5 раза).

Заключение

Таким образом, разработка компактных, легких и обтекаемой формы пластиковых корпусов лазерных головок, подлежащих изготовлению на аддитивном оборудовании и позволяющих использовать лазерные головки различного вида в качестве функционального лазерного инструмента, является актуальной, а внедрение модульного принципа в структуру лазерных установок позволит создавать модульное производственное оборудование, обеспечивающее возможность изменения его технических характеристик за счет его переконфигурации в соответствии с потребностями заказчика, то есть обеспечивать его кастомизацию.

Реализация предложенной концепции модульного лазерного оборудования с использованием современных материалов и технологий производства открывает перспективы создания нового поколения многофункциональных лазерных комплексов, способных эффективно решать широкий спектр технологических задач при минимальных затратах на приобретение и эксплуатацию. Это соответствует современным тенденциям развития производственных технологий, направленным на повышение гибкости, универсальности и экономической эффективности технологического оборудования.

Благодарность: Авторы выражают благодарность компании ООО «Лазерный центр» за дополнительную информацию, предоставленные консультации, оборудование и помощь в проведении испытаний опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю.Технологические аспекты маркировки изделий машиностроения преци-зионным импульсным лазером // Современное машино-строение. Наука и образование: материалы 4-й Международной научно-практической конференции / Под ред. М. М. Радкевича и А. Н. Евграфова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 1177–1187. 1308 с.

[2] Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay. Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 1, N 469. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012124.

[3] Larin M. V., Pevzner Y. B., Grinin O. I., Lasota I. T. The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1, N 1109. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012036.

[4] Шаховской, А. В. Автоматизация производственных линий при процессе перенастройки оборудования / А. В. Шаховской, В. Н. Власова, Е. Г. Ротанов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(18). – С. 72-78. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-2-72-78.

[5] Авторское свидетельство № 1585141 A1 СССР, МПК B25H 3/02. Перестраиваемая тара : № 4366716 : заявл. 30.12.1987 : опубл. 15.08.1990 / А. С. Суляев, В. Ф. Филаретов, Г. И. Хвощевский ; заявитель ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.В.В.КУЙБЫШЕВА.

[6] Босинзон, М. А. Проектирование и наладка мехатронных устройств перестраиваемого (реконфигурируемого) Оборудования / М. А. Босинзон, Е. Г. Нахапетян, Е. В. Макальская // Приводная техника. – 2007. – № 2. – С. 4-13.

[7] Дегтярев, А. Р. Надежность реконфигурирующихся комплексов интегрированной модульной авионики / А. Р. Дегтярев, С. К. Киселев // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1(43). – С. 25-30.

[8] J. Wang, J. Shan, J. Li, J. Zhang. (2011). The Reconfigurable Design of Stone Grinding Equipment. Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vols. 230-232, pp 324-328.

[9] Губарев, А. В. Система SMED или быстрая переналадка оборудования / А. В. Губарев, А. А. Рубцова // NovaInfo.Ru. – 2022. – № 132. – С. 20-21.
[10] Лялькова, А. С. Бережливое производство как инструмент повышения эффективности деятельности предприятия. Быстрая переналадка (SMED) / А. С. Лялькова, Е. В. Конышева // Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 10 июня 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ИРОК", Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2022. – С. 304-310. – DOI 10.34755/IROK.2022.12.37.041.
[11] Архипов, А. В. Метод рационального упорядочения работ на технологической линии при наличии переналадок оборудования / А. В. Архипов, А. В. Сошников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 3: Экономические, гуманитарные и общественные науки. – 2020. – № 3. – С. 3-8. – DOI 10.46418/2079-8210_2020_3_1.
[12] Малышев, Е. Н. Групповой подход как решение задачи сокращения времени на переналадку загрузочных устройств технологического оборудования в машиностроении / Е. Н. Малышев, В. А. Федоров // Advances in Science and Technology : Сборник статей LVI международной научно-практической конференции, Москва, 31 октября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2023. – С. 90-91.
[13] Быков, Ю. М. Уменьшение времени переналадки технологического оборудования ремонтного производства / Ю. М. Быков, С. Ю. Быков, А. Г. Схиртладзе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2013. – № 6. – С. 08-09.
[14] O.M. Zaleta, O.Yu. Povstyanoy, L.F. Ribeiro, R.G. Redko, T.Ye. Bozhko, T.I. Chetverzhuk (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
[15] Александров, В. А. Принцип модульности в построении современных робототехнических систем / В. А. Александров, И. В. Меркурьев // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2(57). – С. 112.
[16] M.Ya. Afanasev, Yu.V. Fedosov, A.A. Krylova, S.A. Shorokhov (2017). Modular industrial equipment in cyber-physical production system: Architecture and integration. 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT), pp. 1-7, doi: 10.23919/FRUCT.2017.8250158.
[17] Разработка модульной конструкции технологического оборудования с ЧПУ для использования в образовательной деятельности / А. А.

Букин, Д. Н. Гопанцов, О. Ю. Дунаевская, А. С. Бинчуров // Современные тенденции развития системы подготовки обучающихся: региональная практика : Материалы международной научной конференции, Красноярск, 03 декабря 2024 года. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2025. – С. 358-361.
[18] Григорьева, Н. С. Принципы модульной технологии и конструкции в сборочном производстве / Н. С. Григорьева // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : Материалы III межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 19–23 сентября 2017 года / Научный редактор Б.В. Соколов. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 102-104.
[19] Наупарац, Д. Функциональная модульность при проектировании электрогидравлических систем привода движения затворов в составе гидромеханического оборудования на объектах гидротехники / Д. Наупарац, Д. Пршич // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2024. – Т. 311. – С. 26-36.
[20] Остриков О.М., Рюмцев А.А. Новый метод использования принципов модульности в конструкции беспилотных летательных аппаратов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 59-62.
[21] Мареев, Е. Л. Модульные инструментальные системы - основа высокоэффективной обработки / Е. Л. Мареев, К. А. Украженко // Шестьдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции, Ярославль, 22 апреля 2015 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2015. – С. 497-500.
[22] Николаев А.Д., Пьяе П.А., Помпеев К.П., Васильев О.С. Модернизация обрабатывающих центров посредством интеграции в их состав лазерных систем // Современное машиностроение. Наука и образование [материалы конф. MMESE] – 2018. – № 7. – С. 506-515.
[23] Николаев А.Д., Пьяе П.А., Помпеев К.П., Васильев О.С., Горный С.Г. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // Металлообработка – 2019. – № 5(113). – С. 26-33.
[24] Nikolaev A.D., Phyo A.P., Pompeev K.P., Vasilev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their

composition // International Review of Mechanical Engineering – 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 100-104.
[25] Пьяе П.А., Помпеев К.П., Николаев А.Д., Васильев О.С., Горный С.Г. Модернизация конструкции корпуса лазерной головки с учетом возможностей аддитивного оборудования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2022. – Т. 65. – № 1. – С. 49-57.
[26] Pompeev K., Pyae P., Vasilev O., Gorny S. Analysis, topology modification and modeling of the laser head casing taking into account the capabilities of additive equipment // Journal of Physics: Conference Series – 2021, Vol. 1753, No. 1, pp. 012037.

P.A.Pyae[1], K.P.Pompeev[2], O.S.Vasilev[3]

PROSPECTS FOR CREATING LASER INSTALLATIONS BASED ON A MODULAR PRINCIPLE

[1, 2] ITMO University, St. Petersburg, Russia;
[3] Laser Centre LLC, St. Petersburg, Russia.

Abstract

The paper examines the issue of creating laser systems with a structure formed according to a modular principle, which ensures their reconfiguration according to customer needs. Unlike traditional non-reconfigurable laser systems designed for specific tasks, the proposed concept considers the laser head as a functional modular tool. A laser system created according to the modular principle includes a power module, a laser module, a control module, a functional modular tool, and a movement axis module. Special attention is paid to the development of compact, lightweight, and ergonomic plastic laser head housings manufactured using additive technologies. This approach will allow the creation of customized production equipment adaptable to various types of laser processing and capable of functioning in hard-to-reach places.

Key words: Modular laser installation, reconfigurable equipment, functional modular instrument, laser head, modular principle, customization, polymer materials, additive technologies

REFERENCES

[1] Petkova A.P., Ganzulenko O.Y. Technological aspects of marking machine-building products with a precision pulse laser // Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the 4th

International scientific-practical conference / Ed. by M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2014. pp. 1177-1187. 1308 p. (rus.)
[2] Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay. Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 1, N 469. DOI: 10.1088/1757-899X/469/1/012124.
[3] Larin M.V., Pevzner Y.B., Grinin O.I., Lasota I.T. The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness // J. of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1, N 1109. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012036.
[4] Shakhovskoy A.V., Vlasova V.N., Rotanov E.G. Automation of production lines during equipment reconfiguration process // Bulletin of Tver State Technical University. Series: Technical Sciences. – 2023. – № 2(18). – pp. 72-78. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-2-72-78. (rus.)
[5] Author's certificate № 1585141 A1 USSR, IPC B25H 3/02. Reconfigurable container: № 4366716: applied 30.12.1987: published 15.08.1990 / A.S. Sulyaev, V.F. Filaretov, G.I. Khvoshchevsky; applicant FAR EASTERN POLYTECHNIC INSTITUTE NAMED AFTER V.V. KUIBYSHEV. (rus.)
[6] Bosinzon M.A., Nakhapetyan E.G., Makalskaya E.V. Design and adjustment of mechatronic devices for reconfigurable equipment // Drive Technology. – 2007. – № 2. – pp. 4-13. (rus.)
[7] Degtyarev A.R., Kiselev S.K. Reliability of reconfigurable integrated modular avionics complexes // Automation of Control Processes. – 2016. – № 1(43). – pp. 25-30. (rus.)
[8] J. Wang, J. Shan, J. Li, J. Zhang. (2011). The Reconfigurable Design of Stone Grinding Equipment. Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vols. 230-232, pp 324-328.
[9] Gubarev A.V., Rubtsova A.A. SMED system or quick equipment changeover // NovaInfo.Ru. – 2022. – № 132. – pp. 20-21. (rus.)
[10] Lyalkova A.S., Konysheva E.V. Lean production as a tool for improving enterprise efficiency. Quick changeover (SMED) // Challenges of modernity and strategies for society development in the new reality: Collection of materials of the VIII International Scientific and Practical Conference, Moscow, June 10, 2022. – Moscow: Limited Liability Company "IROK", Limited Liability Company "ALEF Publishing", 2022. – pp. 304-310. – DOI 10.34755/IROK.2022.12.37.041. (rus.)
[11] Arkhipov A.V., Soshnikov A.V. Method for rational ordering of work on the technological line in the presence of equipment changeovers // Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 3: Economic, Humanitarian and Social Sciences. – 2020. – № 3. – pp. 3-8. – DOI 10.46418/2079-8210_2020_3_1. (rus.)

[12] Malyshev E.N., Fedorov V.A. Group approach as a solution to the problem of reducing the time for changeover of loading devices of technological equipment in mechanical engineering // Advances in Science and Technology: Collection of articles of the LVI international scientific-practical conference, Moscow, October 31, 2023. – Moscow: Limited Liability Company "Aktualnost.RF", 2023. – pp. 90-91. (rus.)
[13] Bykov Y.M., Bykov S.Y., Skhirtladze A.G. Reducing the changeover time of technological equipment for repair production // Repair. Restoration. Modernization. – 2013. – № 6. – pp. 08-09. (rus.)
[14] O.M. Zaleta, O.Yu. Povstyanoy, L.F. Ribeiro, R.G. Redko, T.Ye. Bozhko, T.I. Chetverzhuk (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.
[15] Alexandrov V.A., Merkuryev I.V. The principle of modularity in the construction of modern robotic systems // Gyroscopy and Navigation. – 2007. – № 2(57). – p. 112. (rus.)
[16] M.Ya. Afanasev, Yu.V. Fedosov, A.A. Krylova, S.A. Shorokhov (2017). Modular industrial equipment in cyber-physical production system: Architecture and integration. 21st Conference of Open Innovations Association (FRUCT), pp. 1-7, doi: 10.23919/FRUCT.2017.8250158.
[17] Development of modular design of CNC technological equipment for use in educational activities / A.A. Bukin, D.N. Gopantsov, O.Y. Dunaevskaya, A.S. Binchurov // Modern trends in the development of the training system for students: regional practice: Materials of the international scientific conference, Krasnoyarsk, December 03, 2024. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2025. – pp. 358-361. (rus.)
[18] Grigorieva N.S. Principles of modular technology and design in assembly production // Promising directions for the development of domestic information technologies: Materials of the III interregional scientific-practical conference, Sevastopol, September 19-23, 2017 / Scientific editor B.V. Sokolov. – Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2017. – pp. 102-104. (rus.)
[19] Nauparats D., Prshich D. Functional modularity in the design of electrohydraulic drive systems for gate movement as part of hydromechanical equipment at hydraulic engineering facilities // Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev. – 2024. – Vol. 311. – pp. 26-36. (rus.)
[20] Ostrikov O.M., Ryumtsev A.A. New method of using modularity principles in the design of unmanned aerial vehicles // Bulletin of Brest State

Technical University. Series: Mechanical Engineering. – 2019. – № 4 (117). – pp. 59-62. (rus.)
[21] Mareev E.L., Ukrazhenko K.A. Modular tool systems - the basis of highly efficient processing // Sixty-eighth All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Undergraduates and Postgraduates of Higher Educational Institutions with International Participation: collection of conference materials, Yaroslavl, April 22, 2015. – Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2015. – pp. 497-500. (rus.)
[22] Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their composition // Modern Mechanical Engineering. Science and Education [conf. materials MMESE] – 2018. – № 7. – pp. 506-515. (rus.)
[23] Nikolaev A.D., Pyae P.A., Pompeev K.P., Vasiliev O.S., Gorny S.G. Introduction of laser processing systems into multi-operation machining centers // Metalworking – 2019. – № 5(113). – pp. 26-33. (rus.)
[24] Nikolaev A.D., Phyo A.P., Pompeev K.P., Vasilev O.S. Modernization of machining centers through integration of laser systems into their composition // International Review of Mechanical Engineering – 2020, Vol. 14, No. 2, pp. 100-104.
[25] Pyae P.A., Pompeev K.P., Nikolaev A.D., Vasiliev O.S., Gorny S.G. Modernization of the laser head housing design taking into account the capabilities of additive equipment // News of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering – 2022. – Vol. 65. – № 1. – pp. 49-57. (rus.)
[26] Pompeev K., Pyae P., Vasilev O., Gorny S. Analysis, topology modification and modeling of the laser head casing taking into account the capabilities of additive equipment // Journal of Physics: Conference Series – 2021, Vol. 1753, No. 1, pp. 012037.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.197
doi:10.18720/SPBPU/2/id-150

А.А. Ковалев[1], Н.В. Рогов[1]

ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ КОРРОЗИЕСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛИ МАШИН С УЧЕТОМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК



[1]Артем Александрович Ковалев,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: (910)445-0210, E-mail: kovalevarta@gmail.com.



[2]Николай Вадимович Рогов,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
Тел.: (968)852-6721, E-mail: nikolayrogov_24@mail.ru.

Аннотация

Рассматриваются распространенные в машиностроительной отрасли методы нанесения коррозиестойких покрытий на корпусные детали машин с учётом их эксплуатационно-технических характеристик. Разработана формализованная методика, основанная на многокритериальном выборе эффективного метода нанесения. Установлено, что полимерное порошковое покрытие обеспечивает наилучшее сочетание коррозионной стойкости, технологичности, экономичности и экологичности.

Ключевые слова: коррозиестойкие покрытия, методы нанесения покрытий, корпусные детали, методика выбора коррозиестойких покрытий, полимерные порошковые покрытия.

Введение

Коррозия металлических деталей является одним из наиболее существенных внешних воздействующих факторов снижения долговечности и надёжности деталей машин. Данный процесс, связанный с химическим или электрохимическим взаимодействием материала с окружающей средой, приводит к постепенному разрушению его поверхностных слоёв, что неизбежно отражается на эксплуатационно-технических характеристиках изделий. Особенно значима эта проблема проявляется в тех случаях, когда машины эксплуатируются в условиях повышенной влажности, широких температурных колебаний, воздействия агрессивных жидкостей и газов. Примерами могут служить авиационная техника, двигатели, насосные агрегаты, где требования к надёжности деталей и сборочных единиц чрезвычайно высоки [1-4].

Наиболее уязвимыми к коррозии являются ответственные изделия, такие как корпусные детали, например, редукторов, двигателей, насосов, работающих в условиях агрессивных сред, а также вибраций, высоких нагрузок и под давлением. Учитывая высокую стоимость подобных изделий, а также возможные последствия их отказа, задача повышения их коррозионной стойкости становится актуальной. Необходимо отметить, что выбор метода защиты требует учёта целого комплекса факторов – от материала, геометрии детали и условий эксплуатации до особенностей условий производства.

Современные технологии предлагают широкий спектр методов нанесения коррозиестойких покрытий, отличающихся не только составом применяемых материалов, но и технологическими режимами, трудоёмкостью, стоимостью и экологичностью. В данных условиях возникает необходимость в достоверной оценке каждого из распространенных в машиностроительной отрасли методов, что требует применения формализованных подходов, основанных на количественных критериях. Такая оценка позволит определить наиболее эффективный метод нанесения коррозиестойких покрытий для конкретных типов изделий с учётом различных факторов, определяющих их ресурс (в частности, физико-механические свойства покрытий, их толщина, пористость, шероховатость) и влияющих на затраты производства [5-7].

Настоящее исследование направлено на разработку и применение методики оценки различных методов нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин. В качестве объекта анализа выбраны корпусные элементы плунжерных насосов, используемые в авиационной технике. Эти детали подвергаются интенсивному воздействию агрессивных сред и соответственно требуется их защита. Целью работы является выбор эффективного метода нанесения коррозиестойких покрытий,

обеспечивающего необходимый уровень защиты при минимальных производственных затратах.

Методы

Для выбора метода нанесения коррозиестойких покрытий на корпусные детали машин необходимо провести анализ технологий защиты металла. В настоящее время применяется широкий спектр методов нанесения покрытий, обеспечивающие не только защитные коррозиестойкие, но и декоративные свойства поверхностей корпусных деталей [8-12].

В первую очередь целесообразно выделить металлические покрытия, сформированные следующими базовыми методами: горячее и холодное цинкование, никелирование, хромирование и алитирование.

Вторую большую группу составляют неметаллические неорганические покрытия, полученные воронением, оксидированием, пассивацией и фосфатированием.

В отдельную категорию необходимо выделить лакокрасочные покрытия (ЛКП), обладающие широким спектром декоративных и защитных свойств, и полимерные порошковые покрытия – наиболее прогрессивная технология, основанная на нанесении термореактивного или термопластичного порошка с последующим оплавлением. Такие покрытия обеспечивают высокий уровень защиты от коррозии, устойчивость к УФ-излучению, агрессивным химическим веществам и истиранию [13-15].

Для корректного сравнения вышеперечисленных методов была разработана формализованная методика, основанная на многокритериальном выборе, включающая следующие этапы.

1. Формирование матрицы параметров – каждая строка соответствует критерию (например, толщина покрытия, коррозионная стойкость, адгезия и т.д.), а каждый столбец – определённому методу нанесения коррозиестойкого покрытия.
2. Нормализация данных – так как параметры имеют различные физические размерности и шкалы, все они переводятся в балльную оценку по 100-балльной шкале, где 100 – наилучшее значение среди всех методов, а 0 – наихудшее.
3. Весовая коррекция (при необходимости) – методика допускает назначение весов различным критериям в зависимости от приоритетов конкретного производства (например, приоритет на минимальную энергоёмкость или на высокую адгезию).
4. Суммирование баллов по каждому способу – итоговая оценка отражает обобщённую эффективность метода и позволяет осуществить

ранжирование рассматриваемых вариантов нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин.

Критерии для оценки предлагается сгруппировать по пяти блокам:

– качество покрытия: коррозионная стойкость, адгезия, толщина;

– экономичность: сырьевые затраты, стоимость оборудования, коэффициент использования материала;

– технологичность: энергоёмкость, возможность автоматизации, требования к подготовке;

– временные затраты: на подготовку состава, поверхности, нанесение и последующую обработку;

– экологичность нанесения покрытия.

Результаты

Результатом применения предложенной выше методики стала сравнительная оценка типовых методов нанесения коррозиестойких покрытий. Каждый из методов был проанализирован по двенадцати количественным критериям, охватывающим ключевые эксплуатационные, технологические и экономические аспекты.

Исходные данные были получены как из литературных источников, так и из нормативной и справочной документации. Значения критериев включали:

– коррозионную стойкость покрытия (в г);

– толщину покрытия (в мкм);

– адгезию (в баллах);

– сырьевые затраты (в руб/м²);

– энергоёмкость (в кВт);

– стоимость оборудования (в тыс. руб.);

– коэффициент использования материала (от 0 до 1);

– время на подготовку оборудования;

– время подготовки поверхности;

– время нанесения покрытия;

– время последующей обработки;

– экологичность (оценивалась бинарно: безопасно/опасно).

После приведения всех характеристик к единому масштабируемому виду (в баллах от 0 до 100) и нормализации значений были рассчитаны суммарные оценки по каждому способу. Итоговые баллы характеризуют общий рейтинг метода – чем выше сумма, тем более предпочтительным он является с учётом рассмотренных критериев.

Результаты анализа показали следующее.

1. Полимерное порошковое покрытие получило наивысшую суммарную оценку – 851 балл, что обусловлено его высокой коррозионной стойкостью, низкой энергоёмкостью, высокой адгезией и минимальными затратами на последующую обработку. Кроме того, оно требует значительно меньшее время подготовки и нанесения по сравнению с другими методами.

2. Хромирование и холодное цинкование заняли второе и третье места соответственно (636 и 630 баллов). Они обладают высокой прочностью покрытия, но требуют либо значительных затрат энергии (в случае хромирования), либо обеспечивают ограниченную долговечность при экстремальных климатических условиях (в случае цинкования).

3. Фосфатирование и оксидирование показали сбалансированные, но умеренные результаты (607 и 595 баллов). Эти методы не обеспечивают максимальных защитных характеристик, однако являются экономичными и характеризуются низкими требованиями к технологическому обеспечению.

4. Никелирование оказалось неэффективным в суммарной оценке по причине высокой стоимости и энергозатрат (577 баллов), несмотря на хорошие физико-химические свойства покрытия.

5. Лакокрасочные покрытия продемонстрировали противоречивые результаты: отличные показатели по времени и стоимости нанесения, но слабые – по стойкости и долговечности. Суммарный балл – 629.

6. Наименьшие оценки получили воронение (500 баллов) и пассивирование (568 баллов), что объясняется их ограниченной коррозионной стойкостью и узкой областью применения.

7. Для наглядности полученные данные были представлены в виде столбчатой диаграммы сравнения (рис. 1). Диаграмма отражает выраженное преимущество полимерного порошкового метода над альтернативными технологиями.

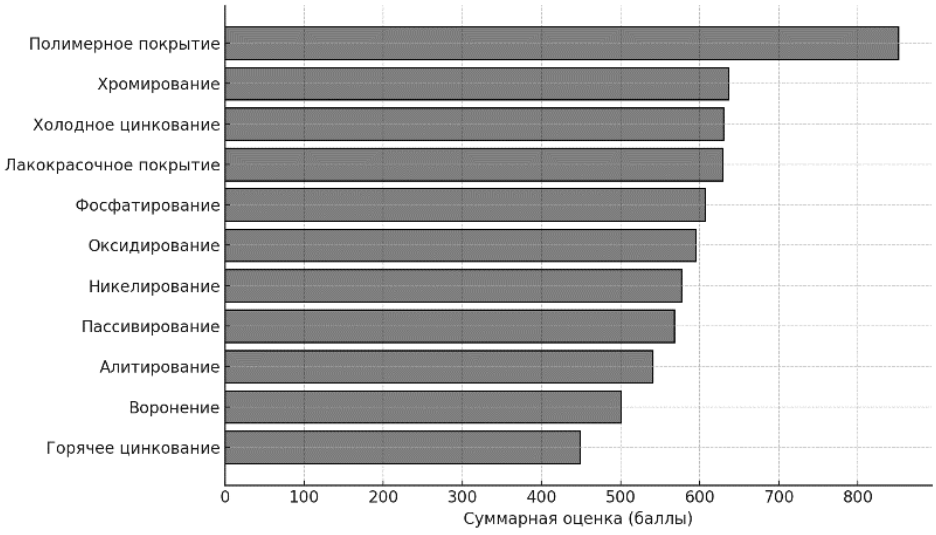


Рис. 1. Сравнение методов нанесения коррозиестойких покрытий

8. На основании этих результатов можно сделать вывод, что формализованный подход позволяет не только выбрать эффективный метод покрытия для конкретных условий, но и выявить слабые места технологий, что целесообразно учитывать при разработке технологических процессов.

Обсуждение

Результаты, полученные с помощью многокритериального анализа, подтверждают важность системного подхода к выбору метода нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин. Предложенная методика позволяет учесть совокупность эксплуатационных, технологических, экономических и экологических характеристик. Это особенно важно в условиях рыночной конкуренции, где высокие требования к надёжности выпускаемых изделий сочетаются с необходимостью оптимизации производственных затрат.

Один из ключевых выводов работы заключается в том, что не существует универсального метода нанесения коррозиестойких покрытий, который бы обеспечивал наилучшие показатели по всем критериям одновременно. Например, хромирование обеспечивает высокие показатели в отношении твёрдости и, соответственно, износостойкости, но требует значительных энергозатрат, применения агрессивных электролитов и соблюдения условий производственной безопасности. Лакокрасочные покрытия выигрывают по простоте и дешевизне нанесения, но быстро теряют защитные свойства в условиях абразивного или химического воздействия.

Таким образом, при выборе метода необходимо опираться на целевую область применения покрытия. Если изделие будет эксплуатироваться при высоких механических нагрузках и в условиях агрессивной среды (например, в авиационных плунжерных насосах), ключевыми критериями становятся коррозионная стойкость и прочность. В этих условиях наиболее сбалансированный результат показывает метод нанесения полимерного порошкового покрытия.

Следует также подчеркнуть, что полимерные порошковые покрытия обеспечивают высокую технологическую гибкость. Они могут применяться как для массового, так и для мелкосерийного производства. Кроме того, процесс может быть легко автоматизирован: применяются роботизированные системы напыления, которые обеспечивают равномерность слоя и минимизируют участие оператора, снижая риск дефектов и увеличивая повторяемость результата. При этом покрытие формируется из одного слоя без необходимости грунтовки или

многослойного нанесения, что значительно сокращает общее время производственного цикла.

С точки зрения экологической безопасности полимерные порошковые составы выгодно отличаются от гальванических методов, поскольку не содержат хроматов, кислот и тяжёлых металлов, а неиспользованный порошок может быть возвращён в технологический цикл. Это делает метод предпочтительным в условиях современных требований к экологичности и принципам ресурсосбережения.

Также стоит отметить, что предложенная методика оценки может быть адаптирована к конкретным условиям производства. Например, если есть ограничения по стоимости оборудования, можно ввести соответствующий весовой коэффициент для данного критерия. Аналогично, приоритет может быть отдан времени нанесения или энергоэффективности, если технологическая линия работает в режиме высокой производственной загрузки.

Выводы

Разработана и апробирована формализованная методика сравнительной оценки методов нанесения коррозиестойких покрытий на корпусные детали машин, основанная на многокритериальном анализе с учётом эксплуатационных, технологических, экономических и экологических параметров. Методика включает нормализацию разноразмерных показателей, балльную оценку по каждому критерию, а также возможность весовой корректировки в зависимости от приоритетов производства, что обеспечивает её универсальность и адаптивность к различным условиям.

Выполненный анализ по разработанный методике подтвердил, что наивысшие баллы соответствуют способу нанесения полимерных порошковых покрытий, что обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, низкой энергоёмкостью, технологичностью и экологической безопасностью. Установлено, что ни один из альтернативных методов не обладает превалирующим преимуществом по рассмотренным критериям и их положительные характеристики нивелируются эксплуатационными или технологическими ограничениями.

Предложенная методика может быть использована при проектировании и оптимизации технологических процессов в машиностроении для выбора эффективного метода нанесения коррозиестойких покрытий на детали машин с учетом их эксплуатационно-технических характеристик, а также при разработке новых способ защиты от коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Мухаметшина Р.М., Петров А.В. Влияние технического состояния на экологическую безопасность дорожно-строительных машин // Техника и технология транспорта. 2018. № 1 (6). С. 13.

[2] Медведев М.С. Современные способы защиты металла от коррозии// Эпоха науки. 2019. №20. С. 182-185.

[3] Ковалев А.А., Тищенко Л.А., Антипин М.А., Шаховцев М.М. Обеспечение однородности оксидной пленки на поверхности монокристаллических кремниевых подложек в процессе их термического оксидирования // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. №4. С. 170-177.

[4] Говорков А.С. Методика количественной оценки технологичности конструкции изделий авиационной техники // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. №1. С. 31-37.

[5] Blankenship, K., & Manuel, J. (2025). Two-Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges. Transportation Research Record, 0(0).

[6] Shinde, V. (2024). EIS Study of Anticorrosive Nanocomposite Films. In Novel Anti-Corrosion and Anti-Fouling Coatings and Thin Films (eds H. Murthy, V.J. Pillai, K.P. Kumar and M. Cowan).

[7] Rzaij, D.R., Mahmoudi, E., Yong, N.L. et al. Synthesis and characterizations of hybrid nanocomposite coatings for enhanced anticorrosion performance. J Coat Technol Res (2025).

[8] Multidimensional Hybrid Metal Phosphonate Coordination Networks as Synergistic Anticorrosion Coatings. A. Fanourgiakis, E. Chachlaki, N. Plesu, D. Choquesillo-Lazarte, A. M. Kirillov, and K. D. Demadis. Inorganic Chemistry 2024 63 (34), 16018-16036.

[9] Zh. Li, Y. Huang, T. Guo et al. Enhancing anticorrosion performance of metals by incorporating cellulose nanofibrils/α-ZrP composite as nanofiller into water-based coating. Carbohydrate Polymers. Volume 347, 2025, 122755.

[10] Han Zhang et al 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2740 012021.

[11] Kaixuan Ye, Zili Li; Toward Ceramic Anticorrosion Coatings: A Review. CORROSION 1 October 2020; 76 (10): 895–917.

[12] Taveira L.V. et al. // Corrosion Science. 2010. V. 52. P. 2813–2818.

[13] Бобров, Г. В. Теория и технология формирования неорганических покрытий: Монография / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор. - Москва : Альфа-М, 2014. - 928 с.

[14] Слепцов О.В. Фофанов Б.А. Шальнев А.Н. Соловьев К.А. Химическое осаждение никелевых покрытий и их коррозионная устойчивость // Физико-химические проблемы строительного материаловедения. №1. - 2008. -С.47-51.

[15] Нагурянская Ю.Н. Исследование свойств оксидных пленок металлических катализаторов // Качество в производственных и социально-экономических системах. – 2014. Том 2. С. 252-256.

A.A. Kovalev, N.V. Rogov

SELECTION OF AN EFFECTIVE METHOD FOR APPLYING CORROSION-RESISTANT COATINGS TO MACHINE PARTS CONSIDERING THEIR PERFORMANCE AND TECHNICAL CHARACTERISTICS

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract

The commonly used methods for applying corrosion-resistant coatings to machine housing components in the mechanical engineering industry are examined, taking into account their operational and technical characteristics. A formalized methodology based on a multi-criteria approach for selecting the most effective coating method has been developed. It has been established that polymer powder coating offers the best combination of corrosion resistance, manufacturability, cost-effectiveness, and environmental safety.

Key words: corrosion-resistant coatings, coating application methods, housing components, methodology for selecting corrosion-resistant coatings, polymer powder coatings.

REFERENCES

[1] Mukhametshina R.M., Petrov A.V. Influence of Technical Condition on the Environmental Safety of Road Construction Machines // *Transport Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (6). P. 13. (rus.)
[2] Medvedev M.S. Modern Methods of Metal Corrosion Protection // *Epoch of Science*. 2019. No. 20. P. 182–185. (rus.)
[3] Kovalev A.A., Tishchenko L.A., Antipin M.A., Shakhovtsev M.M. Ensuring the Uniformity of the Oxide Film on the Surface of Monocrystalline Silicon Wafers During Thermal Oxidation // *Bulletin of Moscow Aviation Institute*. 2018. Vol. 25. No. 4. P. 170–177. (rus.)
[4] Govorkov A.S. Methodology for Quantitative Assessment of the Technological Effectiveness of Aircraft Product Design // *Bulletin of Moscow Aviation Institute*. 2013. Vol. 20. No. 1. P. 31–37. (rus.)
[5] Blankenship K., Manuel J. Two-Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges. *Transportation Research Record*. 2025. 0(0).

[6] Shinde V. EIS Study of Anticorrosive Nanocomposite Films. In: *Novel Anti-Corrosion and Anti-Fouling Coatings and Thin Films*. Eds: H. Murthy, V.J. Pillai, K.P. Kumar, M. Cowan. 2024.
[7] Rzaij D.R., Mahmoudi E., Yong N.L. et al. Synthesis and Characterizations of Hybrid Nanocomposite Coatings for Enhanced Anticorrosion Performance. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2025.
[8] Fanourgiakis A., Chachlaki E., Plesu N., Choquesillo-Lazarte D., Kirillov A.M., Demadis K.D. Multidimensional Hybrid Metal Phosphonate Coordination Networks as Synergistic Anticorrosion Coatings. *Inorganic Chemistry*. 2024. Vol. 63 (34). P. 16018–16036.
[9] Li Zh., Huang Y., Guo T. et al. Enhancing Anticorrosion Performance of Metals by Incorporating Cellulose Nanofibrils/α-ZrP Composite as Nanofiller into Water-Based Coating. *Carbohydrate Polymers*. 2025. Vol. 347. 122755.
[10] Zhang H. et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2740. 012021.
[11] Ye K., Li Z. Toward Ceramic Anticorrosion Coatings: A Review. *CORROSION*. 2020. Vol. 76 (10). P. 895–917.
[12] Taveira L.V. et al. *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. P. 2813–2818.
[13] Bobrov G.V., Ilyin A.A., Spektor V.S. *Theory and Technology of Inorganic Coatings Formation: Monograph*. Moscow: Alfa-M, 2014. 928 p. (rus.)
[14] Sleptsov O.V., Fofanov B.A., Shalnev A.N., Solovyov K.A. Chemical Deposition of Nickel Coatings and Their Corrosion Resistance // *Physico-Chemical Problems of Construction Materials Science*. 2008. No. 1. P. 47–51. (rus.)
[15] Naguryanskaya Yu.N. Study of Properties of Oxide Films on Metal Catalysts // *Quality in Production and Socio-Economic Systems*. 2014. Vol. 2. P. 252–256. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.373.826:621.375.826:621.7.09:544.032.65:67.02:621.715.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id-151

М.Н. Ткаченко[1], К.П. Помпеев[2], О.С. Васильев[3], А. Рамос-Веласкес[4]

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКА ИЗМЕНЕНИЯ ХОДА ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА В ПРОСТРАНСТВЕ



[1]Максим Николаевич Ткаченко,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79187885467, E-mail: maxim.tkachenko00@inbox.ru



[2]Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru



[3]Олег Сергеевич Васильев,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79213097890, E-mail: tesla_90@mail.ru



[4]Алехандро Рамос-Веласкес,
ООО «Лазерный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79520974027, E-mail: alexandroramosv@itmo.ru

Аннотация

В работе рассматриваются методы получения микроотверстий и полостей сложной формы, а также конусных отверстий путем их механической, электрофизической, электрохимической обработки и лазерной обработки. Выявлены основные проблемы, возникающие при формировании таких конструкционных элементов, где особое внимание уделено лазерной перфорации. В работе предложена технология, позволяющая обеспечить лазерную обработку микроотверстий с прямыми стенками, а также конических отверстий со степенью расширения от входа

к выходу в контролируемом диапазоне. Представлена конструкция блока лазерной головки, позволяет расширить ход распространения луча в пространстве и реализовать предлагаемую технологию лазерной перфорации отверстий.

Ключевые слова: лазерная сканирующая система, лазерная обработка, лазерное сверление, лазерная перфорация, микроотверстия, оптическая система.

Введение

В настоящее время в приборостроительной отрасли четко обозначилась тенденция повышения требований к качеству деталей, обеспечить которое можно на основе совершенствования и разработки эффективных технологий их формообразования [1, 2].

Значительная часть всей номенклатуры деталей приборов представляет собой различные осесимметричные, в том числе с тонкими стенками, а также плоские детали, в конструкции которых присутствуют такие элементы, как отверстия малого размера (микроотверстия), а также конусные отверстия и полости разной формы [3].

Использование лазерных технологий в процессах формообразования таких конструкционных элементов обладает рядом преимуществ в том числе: локальностью процесса обработки, отсутствием режущего инструмента и высокой производительностью. При этом спектр обрабатываемых материалов достаточно широк. Однако для обеспечения требуемой формы конструктивных элементов существенным ограничением является форма лазерного излучения и ограничение в диапазоне хода распространения лазерного луча в пространстве [4-7].

Методы обработки микроотверстий и полостей

Механическая обработка микроотверстий и полостей. В настоящее время существуют различные методы обработки отверстий малого диаметра и полостей сложной формы. Традиционным методом является механическая обработка спиральными сверлами. Однако во время этой операции возникают трудности, связанные с воздействием сил резания на инструмент [1].

Применение механического сверления при обработке микроотверстий имеет существенные недостатки, ключевым из которых является высокое отношение длины сверла к его диаметру. При этих условиях инструмент имеет низкую жесткость, что приводит к его частой поломке, а повышение прочностных характеристик сверла кратно повышает его стоимость.

Зачастую после выполнения сверления отверстия в месте выхода сверла остаются заусенцы, а для получения точных отверстий необходима

их доработка разверткой (рис. 1) [1]. Но такой способ сложно применять при получении микроотверстий ввиду того, что трудно изготовить нужный для этого инструмент. Учитывая перечисленные недостатки обработка сверлением высокопрочных металлов и сплавов, керамики, алмазов и т.п. может быть затруднительна.

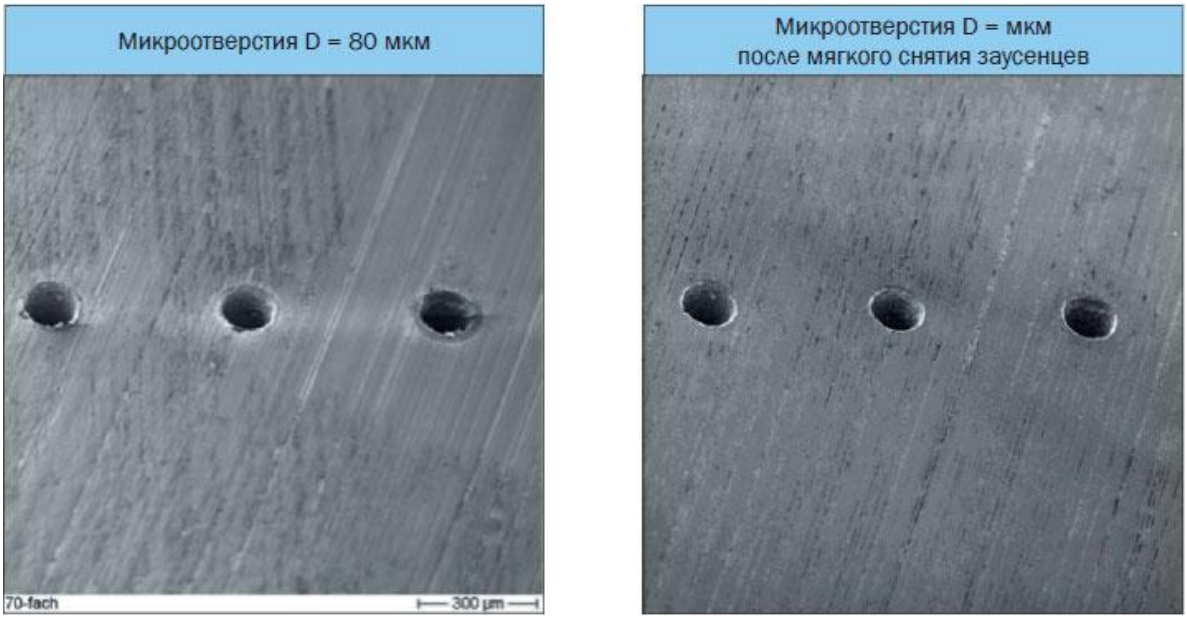


Рис. 1. Обработка микроотверстий спиральным сверлом с последующим снятием образовавшихся заусенцев

Также необходимо помнить, что инструменты, используемые при механической обработке, обычно имеют определенную геометрию, которая ограничивает возможные формы отверстий. Так, сверла имеют круглое поперечное сечение рабочей части, что делает возможным обработку только цилиндрических (конических) отверстий. Фрезерные инструменты могут создавать полости, сквозные окна и отверстия разной формы поперечного сечения, но они также имеют свои ограничения из-за геометрии своих режущих кромок.

Немеханические методы обработки микроотверстий и полостей. В приборостроении для выполнения отверстий малого диаметра широко используются комбинированные методы обработки, в частности, электроэрозионный и электрохимический [1]. При таком способе образуется неравномерный дефектный слой, зачастую возникают высокие значения шероховатости, форма и размер получаемых отверстий ограничены толщиной электроэрозионной проволоки, также возможны затруднения при проектировании средств технологического оснащения. В целом, появляются повреждения на внутренней поверхности и на входе в отверстие [8-11].

Для удаления дефектного слоя и доводки отверстий малого диаметра применяется электрохимическая обработка, заключающаяся в анодном растворении материала. Такой комбинированный способ обработки имеет

низкую производительность и не одинаково эффективен для различных типов обрабатываемых металлических и неметаллических (керамика, кристаллы и т.п.) материалов [12].

Лазерная обработка микроотверстий и полостей сложной формы. Современным решением обработки разнообразных материалов является лазер. Лазерная обработка имеет значительные преимущества перед механическими, химическими и электрическими методами воздействия на материал: бесконтактность, размер рабочего инструмента, локальность процесса, высокая производительность и т.д. [13, 14] Лазерная перфорация позволяет получать различные по форме отверстия в разных материалах, включая труднообрабатываемые сплавы [15].

Существует два способа лазерного сверления: прошивка отверстия лазерным пучком, которое может быть получено либо единичным импульсом (рис. 2, *а*), либо импульсной ударной прошивкой (рис. 2, *б*); а также сверление подвижным отклоненным лазерным лучом, применяющее метод лазерной пробивки отверстий (рис. 2, *в*) или спиральной перфорации (рис. 2, *г*) [16, 17].

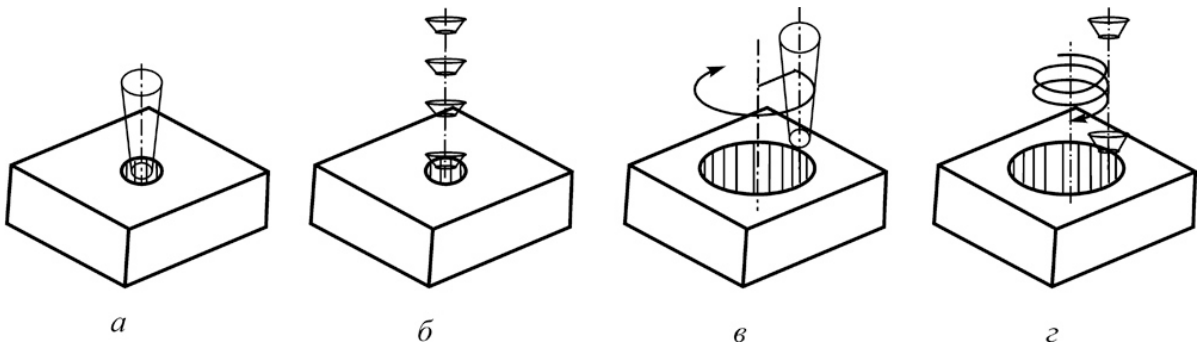


Рис. 2. Схемы лазерного сверления: *а* – прошивка единичным импульсом; *б* – импульсная прошивка; *в* – контурная резка; *г* – спиральная резка

Распространенным способом лазерной обработки микроотверстий является спиральная резка. В данном случае обработка проводится с предварительным получением стартового отверстия импульсной прошивкой в центре с дальнейшим выходом луча на заданный контур и перемещением по нему. Лазерный луч перемещается по периметру и постепенно углубляет отверстие, понижая фокальное положение с каждым вращением по спирали. Перегретый материал в процессе выбрасывается вверх под действием давления паров отдачи и газовой струи. Фокус лазерного луча регулируется таким образом, чтобы он всегда находился на дне отверстия [18].

По данной технологии возможно получать отверстия диаметром от 300 мкм. Кроме того, можно обрабатывать не только отверстия, но и полости различных форм. Также стоит отметить, что спиральная обработка особенно

эффективна в тех случаях, когда диаметр обрабатываемого отверстия близок к диаметру фокального пятна.

Обработка лазером несет испарительный (абляционный) характер, удаление материала происходит в области фокального пятна, где концентрируется максимальная плотность энергии. При таких условиях фокусировка луча происходит по форме «песочных часов» (рис. 3), что не позволяет обеспечить по всей его длине равномерный съем материала со стенок отверстий и полостей [19].

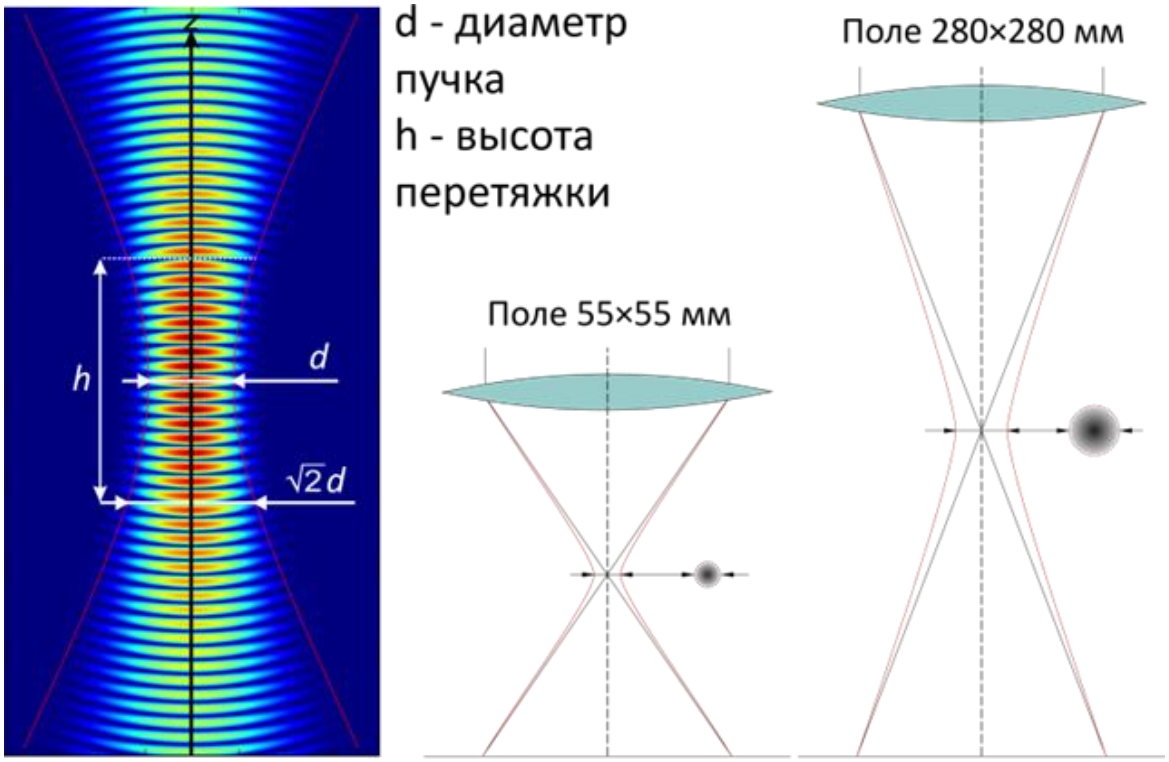


Рис. 3. Форма «песочных часов» при лазерном сверлении

В этом случае полученные отверстия и полости имеют наклонные стенки и низкое качество поверхностей, а глубина обработки ограничена диаметром фокусного пятна (рис. 4).

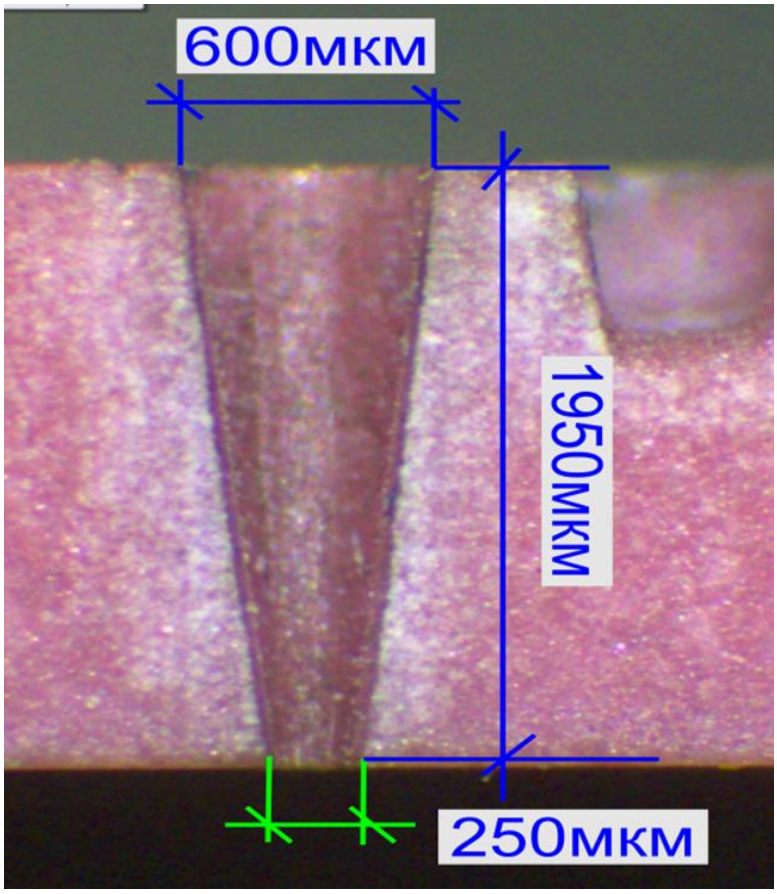


Рис. 4. Конусное отверстие, полученное лазерным сверлением корундовой керамики

Предлагаемое решение

Для того чтобы обеспечить удаление материала только в зоне фокального пятна предлагается сформировать оптическую систему, которая позволит отклонять лазерный луч в сторону. Изменяя угол отражения луча и траекторию его перемещения, можно управлять формой и размерами отверстия как в сечении, перпендикулярном оси, так и осевом (рис. 5) [20].

Однако, при отклонении луча в сторону, происходит изменение диаметра пятна. Это говорит о том, что плотность энергии и форма испарения изменяются в зависимости от положения луча на плоскости. При таких условиях получение отверстий и полостей с ровными стенками нереализуемо, так как невозможно сфокусировать излучение в нулевой точке поля, при позиционировании излучения под углом в какой-либо ненулевой координате [20].

Следовательно, требуется добиться движения луча состоящего из двух синхронизированных вращений. Одно вращение перемещает ось луча поперек заготовки, а другое вращает сам луч.

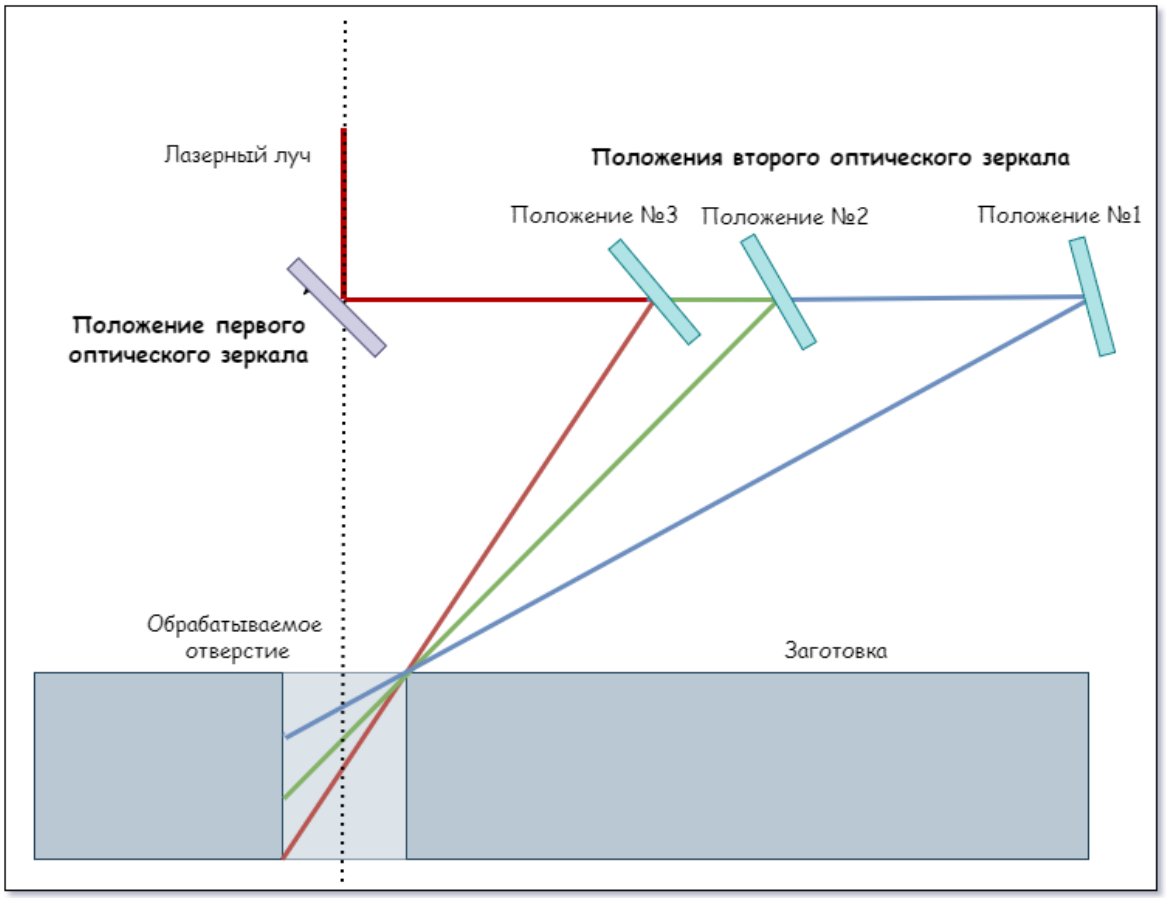


Рис. 5. Принцип действия метода спирального сверления при помощи оптических отклоняющих элементов

Подобно режущим кромкам механического спирального сверла, всегда одна и та же часть лазерного луча контактирует со стенкой отверстия за время одного оборота. Если вращение луча отсутствует, то форма сечения отверстия воспроизводит профиль луча [20]. Оба вращательных движения могут быть реализованы с помощью вращения оптических отражающих элементов.

При наклоне луча относительно оси вращения выходящий луч описывает конус. Угол конуса определяет входной диаметр, а смещение позволит контролировать наклон стенок отверстий [20]. Изменяя два параметра, наклон и сдвиг, можно создавать цилиндрические микроотверстия, а также конические отверстия со степенью расширения от входа к выходу.

Результаты

Для увеличения диапазона распространения лазерного луча в пространстве предлагается разработать блок, интегрируемый в лазерную установку. В основе оптической сканирующей системы данного блока, используются отклоняющие оптические зеркала. Использование зеркал в

качестве основных оптических элементов обусловлено их способностью эффективно отражать лазерное излучение, обеспечивая точное управление траекторией луча.

Два зеркала, располагаются последовательно, где первое – отклоняет лазерный луч на угол 90° по направлению ко второму зеркалу, второе, в свою очередь, – осуществляет дальнейшее отклонение лазерного луча к обрабатываемой поверхности. При этом обеспечивается возможность регулировки угла падения луча к поверхности материала.

Очевидно, что при изменении угла поворота второго зеркала для достижения требуемого наклона лазерного луча, необходимо также обеспечить соответствующее изменение расстояния между первым и вторым зеркалами для того, чтобы сохранить фокусное пятно лазерного луча на заданной оси вращения, обеспечить точность обработки и прямолинейность стенок отверстий и полостей.

Таким образом, для обеспечения требуемой функциональности оптической системы необходимо предусмотреть механизм, который позволит не только изменять угол наклона второго зеркала, но и регулировать расстояние между двумя зеркалами.

Общий вид разработанной конструкции блока лазерной головки представлен на рис. 6. Блок крепится к нижней крышке головки посредством трех специализированных стоек (поз. 1), обеспечивающих надежную фиксацию и жесткость конструкции.

К корпусу блока с использованием подшипникового узла (поз. 2) крепится зубчатое колесо (поз. 3). Зубчатое колесо выступает в качестве ключевого элемента, обеспечивающего вращение всей оптической системы, в том числе – отклоненного лазерного луча.

На зубчатом колесе закреплены две параллельные линейные направляющие (поз. 4). На них расположены держатели оптических зеркал (поз. 5), которые имеют возможность перемещения вдоль направляющих. На держателях установлены воротки (поз. 6) для ручной настройки угла наклона зеркал.

На рис. 7 представлен вид конструкции блока головки снизу.

В случае необходимости работы лазерного станка в “стандартном” режиме (без отклонения луча) первый держатель с зеркалом может быть отодвинут. В таком положении лазерный луч проходит через насадку, не отклоняясь от первоначальной траектории, и воздействует на обрабатываемую поверхность под прямым углом. Это позволяет сохранить исходный функционал лазерной установки.

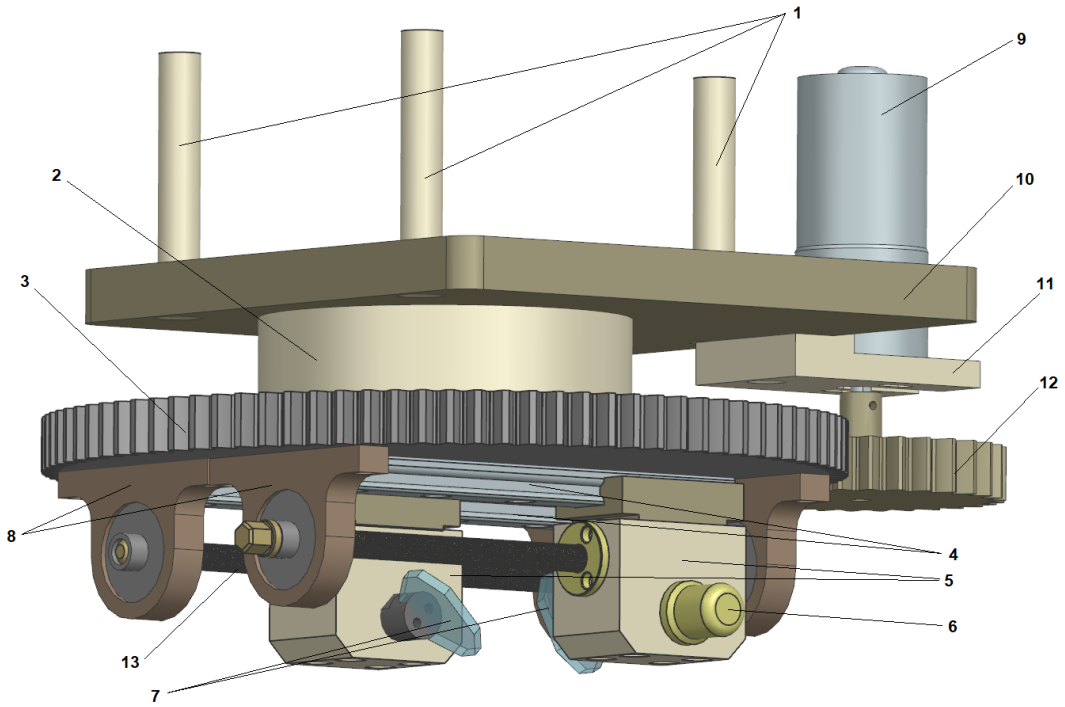


Рис. 6. Общий вид блока изменения хода распространения луча для модификации лазерной сканирующей системы наведения, где 1 – стойка, 2 – корпус, с подшипниковым узлом, 3 – зубчатое колесо, 4– линейная направляющая, 5 – держатель зеркала, 6 – вороток, 7 – оптическое отражающее зеркало, 8 – подшипниковый узел, 9 – мотор, 10 – верхняя крышка блока, 11 – кронштейн для крепления мотора, 12 – шестерня.

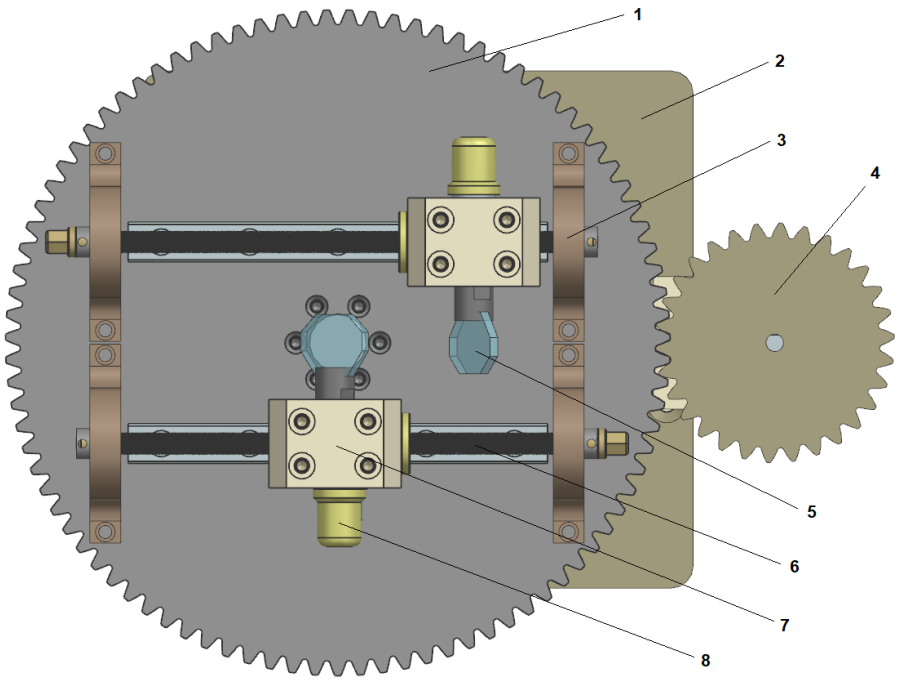


Рис. 7. Блок лазерной головки, изменяющий ход распространения луча для модификации лазерной сканирующей системы. Вид снизу, где 1 – зубчатое колесо, 2 – верхняя крышка блока, 3 – подшипниковый узел, 4 – шестерня, 5 – оптическое отражающее зеркало, 6 – ходовой винт, 7 – держатель зеркала, 8 – вороток.

Обсуждение

Предлагаемая конструкция блока лазерной головки, позволяет расширить ход распространения луча в пространстве (рис. 8). Изменение угла подхода лазерного луча к обрабатываемой поверхности позволяет удалять материал только в зоне фокального пятна, а при углублении отверстия обеспечить корректировку фокусного расстояния. Использование предлагаемой технологии позволяет получать микроотверстия с прямыми стенками, а также конические отверстия с регулируемой степенью расширения от входа к выходу.

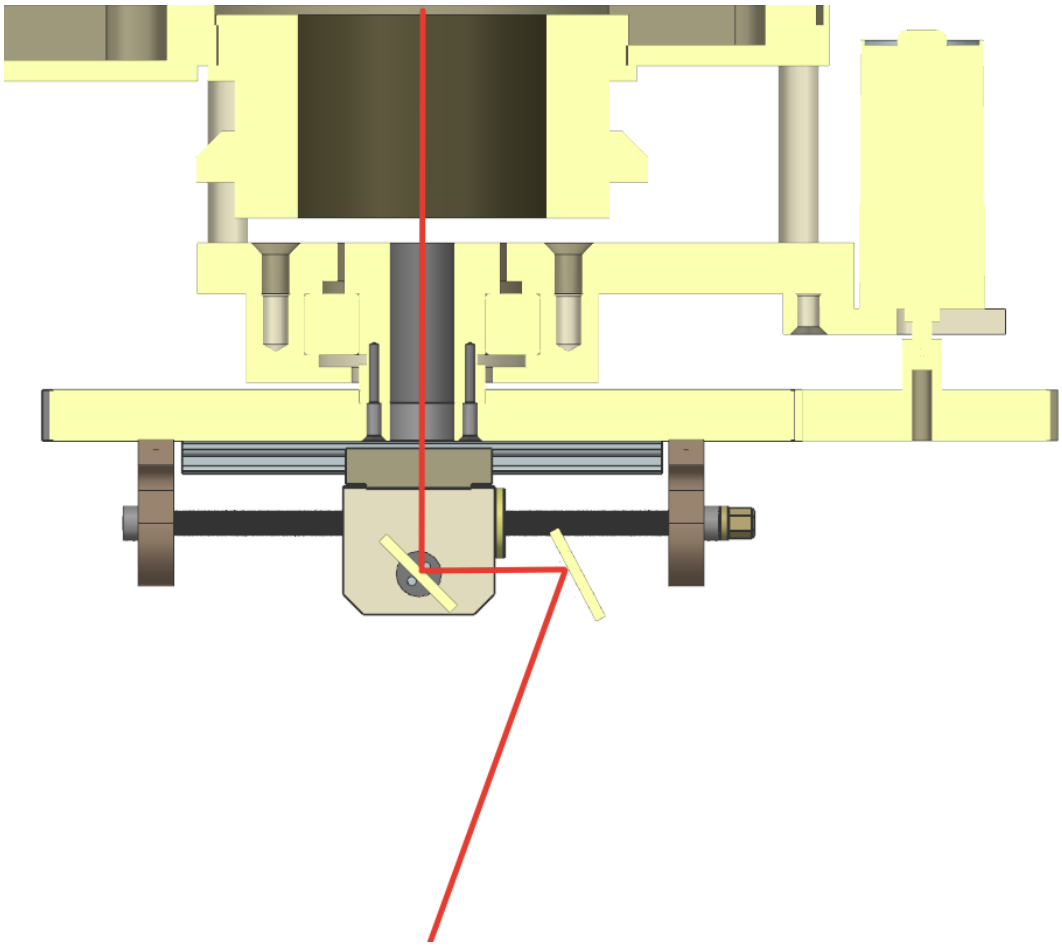


Рис. 8. Ход распространения отклоненного лазерного луча с использованием отражающих оптических элементов

Предлагаемая конструкция также имеет и недостатки, снижение влияния которых будет осуществляться в будущем. Так при обработке отверстий требуется обеспечить точное позиционирование оптических зеркал, их калибровку после установки, а также точную регулировку угла наклона. Для этого необходимо доработать конструкцию оптических

державок, реализовав вращение зеркал, например, с помощью зубчатой или винтовой передачи.

Блок лазерной головки оснащен мотором (см. рисунок 6, поз. 9), вращающим оптическую систему при заданных оборотах, что позволяет получать только цилиндрические и конические отверстия. Для обработки полостей сложной формы требуется обеспечить дискретное вращение зубчатого колеса и, как следствие, всей оптической системы изменения хода распространения луча. При этом вращение должно быть синхронизировано с системой управления лазерной установки.

Также стоит отметить, что перемещение и регулировка угла наклона оптических зеркал выполняются вручную, в этом случае процесс перфорации имеет низкую производительность в сравнении с традиционными методами обработки. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение автоматизации работы с блоком изменения хода лазерного луча в пространстве для лазерной установки.

Заключение

Совершенствование технологических процессов получения микроотверстий и полостей сложной формы является важной задачей для предприятий приборостроительной отрасли. При этом технологии лазерной перфорации являются наиболее приоритетными ввиду отсутствия режущего инструмента, локальности процесса обработки, высокой производительности и возможности обработки различных материалов. Однако структура лазерного луча не позволяет получать микроотверстия и полости сложной формы из-за неравномерного распределения энергии в луче.

Для решения данной проблемы была предложена технология, позволяющая расширить ход распространения лазерного луча в пространстве, что делает возможным получение цилиндрических микроотверстий, а также конических, с регулируемой степенью расширения входного и выходного диаметра.

Для реализации предложенной технологии был разработан блок лазерной головки, обеспечивающий отклонение лазерного луча и его вращения. Однако конструкция модуля имеет и недостатки, ключевыми из которых являются: низкая производительность процесса обработки при работе установки с интегрированным блоком, а также недостаточная точность позиционирования оптических элементов системы. Дальнейшая работа будет направлена на модернизацию предложенной технологии обработки и реализующую ее конструкцию блока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Колганова Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия: дис. – ЕН Колганова: Ростов н/Д, 2022. – 169 с.

[2] Николаев А. Д. и др. Внедрение систем лазерной обработки в состав многооперационных обрабатывающих центров // Металлообработка. – 2019. – №. 5 (113). – С. 26-33.

[3] Ломакин И. В. и др. Высокоэффективные технологии получения отверстий малого диаметра в деталях жидкостных ракетных двигателей //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – №. 3 (135). – С. 5.

[4] Nasedkin Yu. V., Khmelnitsky A. K. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012041.

[5] Larin M. V., Pevzner Y. B., Grinin O. I., Lasota I. T. The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012036.

[6] Николаев А. Д., Помпеев К. П. Совершенствование лазерной головки за счет изменения топологии деталей ее корпуса и способа крепления коллиматора // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – №. 4. – С. 300-306.

[7] Andreev A. O., Kosenko M. S., Petrovskiy V. N., Mironov V. D. Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling // Journal of Physics. Conf. Ser. 2016. Vol. 691, N 1. P. 012007.

[8] Резюков И. В., Резюкова Л. В. Современное состояние электрофизических методов размерной обработки отверстий малого диаметра в деталях из хрупких неметаллических материалов // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №. 1. – С. 76-85.

[9] Кудеников Е. Ю., Бойко А. Ф. Исследование профиля прецизионных отверстий, получаемых методом электроэрозионной обработки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 3. – С. 103-106.

[10] Оглезнев Н. Д., Абляз Т. Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №. 4-2. – С. 396-398.

[11] Владыкин А. В., Макаров В. Ф. Повышение эффективности обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов на основе применения метода электроэрозионного сверления // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. ПА Соловьева. – 2010. – №. 2. – С. 29-37.

[12] Рахимянов Х. М., Леонтьев И. А., Василевская С. И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и

электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – №. 10. – С. 64.
[13] Przestacki D., Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials // Journal of Physics. Conf. Ser. 2014. Vol. 483, N 1. P. 012019.
[14] Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay. Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system // IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 469, N 1. P. 012124.
[15] Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 5, N 12. Pp. 437-441.
[16] Бессонов Д. А. и др. Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – Т. 4. – №. 1 (81). – С. 69-76.
[17] Абрамов Д. В., Хорьков К. С., Прокошев В. Г. (2013) Способ пробивки микроотверстий лазерным импульсным излучением. Патент РФ №2492036 С1.
[18] Хайруллина Л. Р., Смородин Ф. К. Технология лазерного сверления и резки отверстий в изделиях авиастроения // Вестник Казанского государственного технического университета им. АН Туполева. – 2016. – Т. 72. – №. 2. – С. 38-41.
[19] Васильев, О.С., Вейко, В.П., Горный, С.Г., Рузанкина, Ю.С. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82. – № 12. – С. 70–77, ISSN 0030–4042.
[20] Ткаченко М. Н. и др. Перспективы использования оптической сканирующей системы с измененными пространственными характеристиками распространения луча // Современное машиностроение: наука и образование 2024: материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, с.721-736. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-133.

M. N. Tkachenko[1], K.P. Pompeev[2], O.S. Vasilev[3], A. Ramos-Velasquez[4]

MODERNIZATION OF THE LASER SCANNING HEAD BY USING A BLOCK FOR CHANGING THE COURSE OF THE LASER BEAM IN SPACE

[1,2]ITMO University, St. Petersburg, Russia;
[3,4]Laser Center LLC,St. Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers methods for obtaining micro-holes and cavities of complex shape, as well as conical holes by their mechanical, electrophysical, electrochemical and laser processing. The main problems that arise during the formation of such structural elements, where special attention is paid to laser perforation, are identified. The paper proposes a technology that allows laser processing of micro-holes with straight walls, as well as conical holes with a degree of expansion from the inlet to the outlet in a controlled range. The design of the laser head unit is presented, which makes it possible to expand the beam propagation in space and implement the proposed technology of laser hole perforation.

Keywords: laser scanning system, laser processing, laser drilling, laser perforation, micro-hole, optical system.

REFERENCES

[1] Kolganova E. N. Technological support for vibration processing of parts with small grooves and holes: Dissertation – E.N. Kolganova: Rostov n/D, 2022. – 169 p. (rus.)
[2] Nikolaev A. D. et al. Implementation of laser processing systems in multi-operation machining centers // Metalworking. – 2019. – No. 5 (113). – Pp. 26-33. (rus.)
[3] Lomakin I. V. et al. Highly efficient technologies for obtaining small diameter holes in liquid rocket engine parts // Engineering Journal: Science and Innovations. – 2023. – No. 3 (135). – P. 5. (rus.)
[4] Nasedkin Yu. V., Khmelnitsky A. K. Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic thin sheets // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012041.
[5] Larin M. V., Pevzner Y. B., Grinin O. I., Lasota I. T. The use of single-mode fiber laser for welding of stainless steel thin thickness // Journal of Physics. Conf. Ser. 2018. Vol. 1109, N 1. P. 012036.

[6] Nikolaev A. D., Pompeev K. P. Improvement of laser head by changing the topology of its housing parts and the method of collimator attachment // Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering. – 2021. – Vol. 64. – No. 4. – Pp. 300-306. (rus.)
[7] Andreev A. O., Kosenko M. S., Petrovskiy V. N., Mironov V. D. Prototyping of Dental Structures Using Laser Milling // Journal of Physics. Conf. Ser. 2016. Vol. 691, No. 1. P. 012007.
[8] Rezukov I. V., Rezukova L. V. Current state of electrophysical methods for dimensional processing of small diameter holes in parts made of brittle non-metallic materials // Bulletin of Chuvash State University. – 2016. – No. 1. – Pp. 76-85. (rus.)
[9] Kudenikov E. Yu., Boyko A. F. Investigation of the profile of precision holes obtained by electrical erosion processing // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2017. – No. 3. – Pp. 103-106. (rus.)
[10] Ogleznev N. D., Abyaz T. R. Influence of electrical erosion processing modes on the accuracy of hole production // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 15. – No. 4-2. – Pp. 396-398. (rus.)
[11] Vladikhin A. V., Makarov V. F. Increasing the efficiency of small diameter hole processing in heat-resistant alloy parts using electrical erosion drilling // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technology Academy named after P. A. Solovyov. – 2010. – No. 2. – Pp. 29-37. (rus.)
[12] Rakhimyanov K. M., Leontiev I. A., Vasilevskaya S. I. Technological prospects for combining electrical erosion and electrochemical processes in processing small diameter holes // Science-intensive technologies in machine engineering. – 2016. – No. 10. – P. 64. (rus.)
[13] Przestacki D., Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials // Journal of Physics. Conf. Ser. 2014. Vol. 483, No. 1. P. 012019.
[14] Mohd Noor Firdaus Bin Haron, Fadlur Rahman Bin Mohd Romlay. Parametric study of laser engraving process of AISI 304 Stainless Steel by utilizing fiber laser system // IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 469, No. 1. P. 012124.
[15] Maksarov V. V., Khalimonenko A. D. Quality assurance during milling of precision elements of machines components with ceramic cutting tools // International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 5, No. 12. Pp. 437-441.
[16] Bessonov D. A. et al. Study of the features of using short and ultrashort pulsed laser radiation for precision microprocessing of materials. Review and analysis // Bulletin of Saratov State Technical University. – 2015. – Vol. 4. – No. 1 (81). – Pp. 69-76. (rus.)

[17] Abramov D. V., Khor'kov K. S., Prokoshev V. G. (2013) Method of drilling microholes with laser pulsed radiation. Patent RUS №2492036 C1. (rus.)
[18] Khairullina L. R., Smorodin F. K. Technology of laser drilling and cutting of holes in aerospace products // Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. – 2016. – Vol. 72. – No. 2. – Pp. 38-41. (rus.)
[19] Vasilev O. S., Veiko V. P., Gorny S. G., Ruzankina Yu. S. Laser installation for microstructuring the surface of metal using fiber laser // Optical Journal. – 2015. – Vol. 82. – No. 12. – P. 70–77, ISSN 0030–4042. (rus.)
[20] Tkachenko M. N. et al. Prospects for using an optical scanning system with modified spatial characteristics of beam propagation // Modern mechanical engineering: science and education 2024: proceedings of the 13th International Scientific Conference, Russia, June 20 / Ed. by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. – SPb.: POLITECH-PRESS, 2024, pp. 721-736. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-133. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.7
doi:10.18720/SPBPU/2/id-152

Ши Шуанюань[1], Д.Н. Шабалин[2],
Янь Чуаньчао[3], Лян Юаньцзе[4]

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОДАЧИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛЯ СТАЛИ 40Х ЗА СЧЕТ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И СТРУЖКОДРОБЛЕНИЯ



[1]Ши Шуанюань
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79119952622, E-mail: bravoshi@yandex.ru.



[2]Дмитрий Николаевич Шабалин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110382374, E-mail: shadmit@yandex.ru.



[3]Янь Чуаньчао
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110053226, E-mail: ychuanchao@mail.ru.



[4]Лян Юаньцзе
Sichuan Tianhu Tools Manufacturing Co . , Ltd
Китай, Чэнду
Тел.: +8618982941527, E-mail: skytiger1@126.com

Аннотация

Режимы резания, это скорость резания, подача и глубина резания, влияют износ режущих инструментов. В то же время результат

стружкодробления тоже зависит от этих параметров, особенно подача. Поэтому, чтобы оптимизировать подачу при токарной обработке Стали 40Х можно использовать метод соединения износа режущих инструментов и результат стружкодробления.

Ключные слава: режим резания, износ, стружкодробление

Введение

Сталь 40Х - это конструкционная легированная сталь, отличающаяся высокой прочностью, износостойкостью и ударной вязкостью. За эти свойства эта сталь применяется в многочисленных отраслях промышленности, в том числе обработки деталей валов, шатунов, болтов, зубчатых колес и т.д.

Хотя и были проведены многочисленные исследования по обработке Стали 40Х, исследований по образованию стружки пока ещё слишком мало и недостаточно.

Во время точения образуется стружки. По правилам образуется 4 вида основного стружки, именно элементные, суставчатые, сливные, и стружка надлома. При любом случае, образование стружки не способствует от точности обработки, причем стружки царапаются поверхности деталей и станки.

Таким образом надежный способ стружкодробления и износы при таких условиях очень важны. В настоящее время предельная длина завитой спирали стружки не должна превышать 100 мм. [1-7]

Способ стружкодробления

Применение естественного способа стружкодробления состоит в том, что режущий инструмент обрабатывает поверхность заготовки с начала и до времени остановки. При получении стружки есть возможность наблюдать её форму от соответствующих режимов резания.

Литературная теория

По правилам рекомендательный диапазон режимов резания следующий: скорость резания 60-120м/мин подача 0.1-0.3мм/об, глубина резания 0.5-3мм. Фактический диапазон, применяемый в производстве, не такой. [8-15]

В 2015 году китайские ученые сделали эксперимент при резании материала 40Х и осмотр износа инструментов после резания. Размер заготовки был ϕ100*40. Они определили, что не рекомендуется использовать подачу при диапазоне 0.1-0.15 мм/об, температура резания быстро повышается, и изменяется стружкодробление. А при использовании подачи больше чем 0.2 мм/об эффективность стружкодробления улучшается

(рис. 1 и 2).[2,7,8]

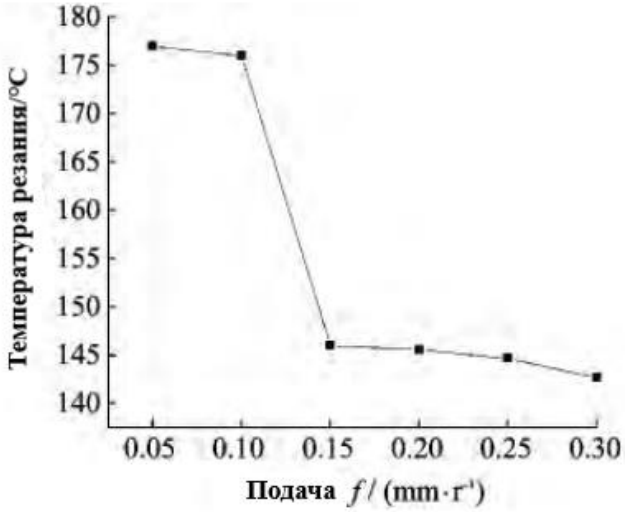


Рис. 1. Зависимость между подачей и температурой резания

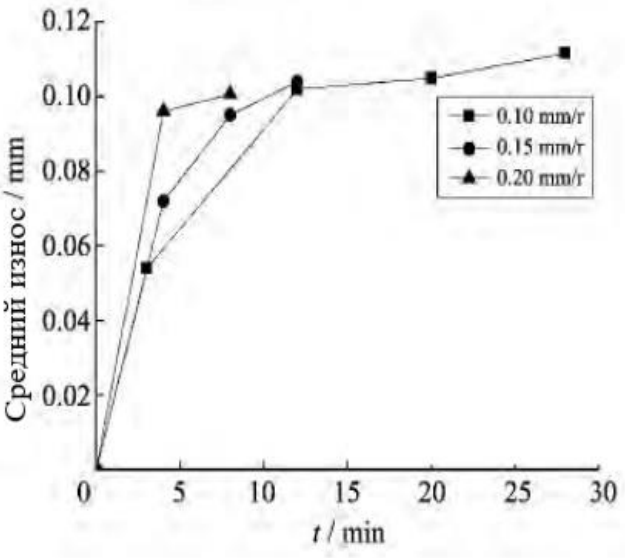


Рис. 2. Зависимость между подачей и износом инструмента

По рис. 1 и рис. 2 можем предположить, что подача 0.15 мм/об является определенной точкой, после этой точки уменьшается зависимость между подачей, температурой и износом инструмента. Несмотря на то, что срок службы инструмента снижается, но скорость его снижения невелика. Причем с точки зрения стружкодробления эти режимы благоприятные, в пределах определенного диапазона подачи.

Эксперименты по стружкодроблению

Выполнены эксперименты стружкодробления станком с ЧПУ, диаметр заготовки Ф35, длина резания 60 мм. Тип инструмента DNMG150408,

материал 40Х, скорость шпинделя 700 об/мин, глубина резания 1мм. Объект исследования - изменение стружки при замедлении подачах.

Экспериментальные установки представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 3. Заготовка и станок с ЧПУ



Рис. 4. Режущий инструмент

Первая группа экспериментов была проведена при подаче 0.2 мм/об, 0.25 мм/об, 0.3 мм/об, использовании при каждой подаче длины резания 20 мм. Эксперимент повторялся 3 раза.

Получены следующие стружки (рис. 5):

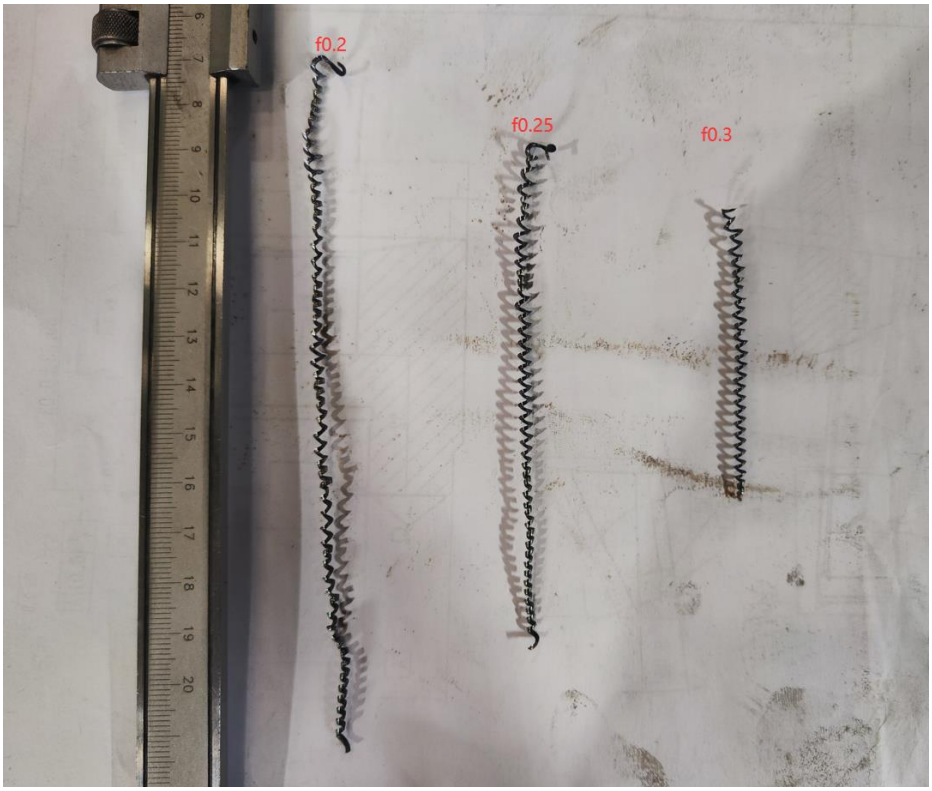


Рис. 5. Статус стружки

Вторая группа опытов была проведена при подачах 0.2 мм/об, 0.15 мм/об, 0.1 мм/об, 0.05 мм/об. Также было 3 раза повторения. Полученные стружки представлены на рис. 6.

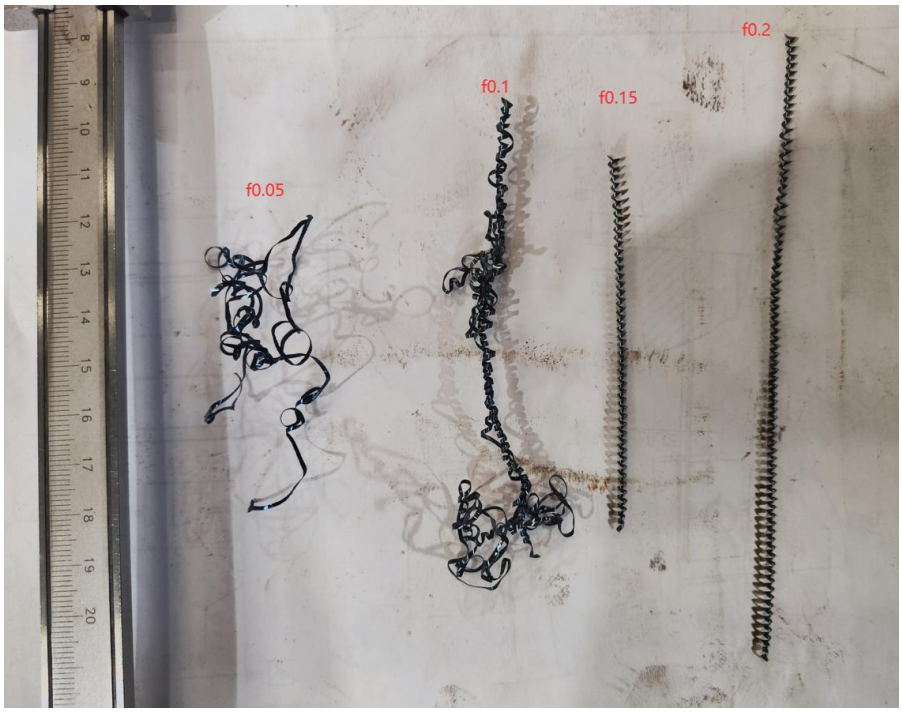


Рис. 6. Статус стружки

Причем после точения шероховатость поверхности заготовки

отличается друг друга (рис.7).

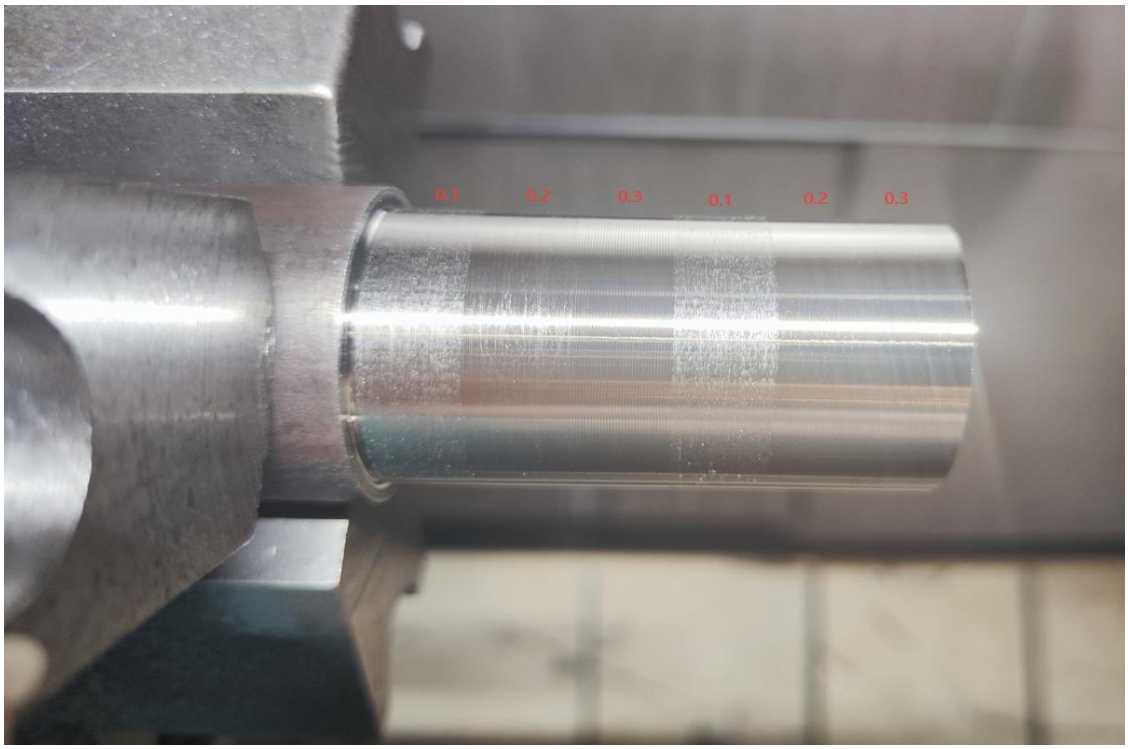


Рис. 7. Шероховатость после точения

Заключение

По заданной теории и экспериментальных результатах рациональная подача для Стали 40Х для получения производительности и качаства поверхностного слоя должна превышать 0.3 мм/об. Длина стружки со спиралью должна быть меньше 100 мм.

Выводы

Выполнен эксперимент для анализа подачи при получении соответствующий стружки и объединение с износом инструментом, при следующих экспериментальных условиях:

1. Чтобы оптимизировать эффективность стружкодробления, подача должна быть целью оптимизация, и должна превышать 0.3мм/об.
2. За счёт увеличения подачи формообразование стружки стабильно.
3. С точки зрения шероховатости, если подача менее 0.2мм/об, качество поверхностного слоя лучше.
4. Метод стружкодробления необходимо рассматривать в сочетании с режимами резания и соответствующими геометриями режущих инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ши Шуанюань, Михайлов С. В. Методика расчета рациональной периодичности изменения режимов резания для управления принудительным стружкодроблением на станках с ЧПУ / Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Инновационные идеи в машиностроении" ИИМ-2022, – С-П 24–26 мая 2022 г./под ред. д. техн.наук, проф. А. А. Поповича, д. техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С 209-213. https://elibrary.ru/item.asp?id=49769302

[2] Gao-Shengli , SUN-Fujian, QU-Shengguan. Machining Performance of Cemented Carbide Tool with a Chip-Groove in Dry Cutting 40Cr steel. 2015. JOUNRAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION) VOL.36 №.2 pp.150-155 https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2015&filename=HBGG201502013&uniplatform=OVERSEA&v=DznskVP72cS1C_0NMNwemg0cZb_kmtNrmCTIe57OK1kihKssC6hca5P0UM4APs_r

[3] Бурдинн П. В., Михайлов С. В. Оптимизация токарной обработки материалов по критерию наименьшей себестоимости с учетом стружкодробления / Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Инновационные идеи в машиностроении" ИИМ-2022, – С-П 24–26 мая 2022 г./под ред. д. техн.наук, проф. А. А. Поповича, д. техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С 19-24. https://elibrary.ru/item.asp?id=49558556

[4] Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение. Наука и образование. 2022. № 11. С. 341-354 https://elibrary.ru/item.asp?id=48693494

[5] Глухов В.В., Гасюк Д.П. Аудит систем менеджмента качества.- Санкт-Петербург, 2019 – 358 с. https://lib.dm-centre.ru/lib/document/gpntb/ESVODT/8df2d39b2ae0d1de424e979d170aaa4b/

[6] Хрусталева И.Н., Гасюк Д.П., Черных Л.Г., Степанов С.Н., Лаптев А.А. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования // Наука и бизнес : пути развития. 2022.№ 7 (133). С.147-152 https://elibrary.ru/item.asp?id=49461903

[7] Han Wen-qiang, He Hui-bo, Li Hua-ying, Yang Jun, Nie Chao-yin. A Study of the Major Parameters Influencing the Cutting Force of 40Cr Stell. 2013 Journal of Southwest University(Natural Science Edition) VOL.35 №6

pp.109-116
https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD2013&filename=XNND201306021&uniplatform=OVERSEA&v=Ooh9Rykm5tlL0ri4mkmKX3JBP5_zEy1QElkoetdSaO-m8lASG2kXorVZPGzxq9e5

[8] Song Y C , Nezu K , Park C H , et al. Tool wear control in single -crystal diamond cutting of steel by using the ultra-intermittent cutting method. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2009, 49(3-4) pp. 339-343 https://www.peeref.com/works/10729670

[9] Ларионова Т.А., Ларионов Е.О. Влияние режимов резания и геометрии режущего инструмента на параметры шероховатости поверхности при точении титановых сплавов //Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Инновационные идеи в машиностроении" ИИМ-2022, – С-П 24–26 мая 2022 г./под ред. д. техн.наук, проф. А. А. Поповича, д. техн. наук, проф. Д. П. Гасюка. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С 13-18 https://elibrary.ru/item.asp?id=49558547

[10] Михайлов С.В., Ковеленов Н.Ю., Болотских С.В. Технологические условия обеспечения шерховатости поверхности при токарной обработке материалов инструментов с СМП. Станкоинструмент. – 2016. -№ 1(2). – С. 76-79 https://www.stankoinst.ru/journal/article/5157?ysclid=ma3sz5u47r702953343

[11] Косова В.А., Гасюк Д.П. К вопросу анализа условий разработки технологических процессов машиностроительных предприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021.№2. С.655-658 https://elibrary.ru/item.asp?id=44895083

[12] Diniz E A, Gomes D M, Braghini A J. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. Journal of Materials Processing Technology, 2005 ,159 (2) pp:240-248 https://www.researchgate.net/publication/223520825_Turning_of_hardened_steel_with_interrupted_and_semi-interrupted_cutting

[13] Ильин И.В. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И.В. Ильин. – Санкт-петербург, 2018. - 289с https://elibrary.ru/item.asp?id=34871102

[14] Анисимов Е.Г., Анисимов В.Г., Солохов И.В. Проблемы научно-методического обеспечения межведомственного информационного взаимодействия // Военная мысль. 2017. № 12. С 45-51 https://elibrary.ru/item.asp?id=30752551

[15] Глухов В.В., Гасюк Д.П. Управление качеством.- Санкт-Петербург, 2013. С 399 https://aldebaran.one/author/gluhov_vladimir/kniga_upravlenie_kachestvo

m_uchebnik_dlya_vuzov/?ysclid=ma3t4a4s6r702053854

Shi Shuangyuan[1], D.N. Shabalin[1], Yan Chuanchao[1], Liang Yuanjie[2]

THE CHOICE OF RATIONAL FEED RATES DURING TURNING FOR 40CR STEEL BY COMBINING THE WEAR OF CUTTING TOOLS AND CHIP CRUSHING

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Sichuan Tianhu Tools Manufacturing Co., Ltd. China

Abstract

The cutting mode is affected by the wear of cutting tools, it is the cutting speed, feed and cutting depth that is affected. At one time, the result of chip crushing also depends on these parameters, especially the feed. Therefore, in order to optimize the feed during turning for 40Cr, use the method of combining the wear of cutting tools and the result of chip crushing.

Key words: cutting mode, wear, chip crushing

REFERENCES

[1] Shi Shuangyuan, Mikhailov S. V. Methodology for calculating the rational periodicity of changing cutting modes to control forced chip breaking on CNC machines / Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists "Innovative ideas in mechanical engineering" IIM-2022, - St. Petersburg, May 24-26, 2022 / edited by D.Sc. (Eng.), prof. A. A. Popovich, D.Sc. (Eng.), prof. D.P. Gasyuk. - St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. - P. 209-213. https://elibrary.ru/item.asp?id=49769302

[2] Gao-Shengli , SUN-Fujian, QU-Shengguan. Machining Performance of Cemented Carbide Tool with a Chip-Groove in Dry Cutting 40Cr steel. 2015. Jounral of north university of china (Natural science edition) VOL.36 №.2 pp.150-155 https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2015&filename=HBGG201502013&uniplatform=OVERSEA&v=DznskVP72cS1C_0NMNwemg0cZb_kmtNrmCTIe57OK1kihKssC6hca5P0UM4APs_r

[3] Burdin P. V., Mikhailov S. V. Optimization of turning of materials based on the criterion of lowest cost taking into account chip breaking / Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists "Innovative ideas in mechanical engineering" IIM-2022, - St. Petersburg, May 24-26, 2022 / edited by D.Sc. (Eng.), prof. A. A.

Popovich, D.Sc. (Eng.), prof. D.P. Gasyuk. - St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. - P. 19-24. https://elibrary.ru/item.asp?id=49558556
[4] Gasyuk D.P., Kosova V.A. The problem of choosing the optimal variant of the technological process for manufacturing mechanical engineering products in modern conditions // Modern mechanical engineering. Science and education. 2022. No. 11. P. 341-354. https://elibrary.ru/item.asp?id=48693494
[5] Glukhov V.V., Gasyuk D.P. Audit of quality management systems. - St. Petersburg, 2019 - 358 p. https://lib.dm-centre.ru/lib/document/gpntb/ESVODT/8df2d39b2ae0d1de424e979d170aaa4b/
[6] Khrustaleva I.N., Gasyuk D.P., Chernykh L.G., Stepanov S.N., Laptev A.A. Improving the efficiency of the assembly process based on simulation modeling // Science and business: development paths. 2022. No. 7 (133). P.147-152. https://elibrary.ru/item.asp?id=49461903
[7] Han Wen-qiang, He Hui-bo, Li Hua-ying, Yang Jun, Nie Chao-yin. A Study of the Major Parameters Influencing the Cutting Force of 40Cr Stell. 2013 Journal of Southwest University (Natural Science Edition) VOL.35 №6 pp.109-116. https://chn.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD2013&filename=XNND201306021&uniplatform=OVERSEA&v=Ooh9Rykm5tlL0ri4mkmKX3JBP5_zEy1QElkoetdSaO-m8lASG2kXorVZPGzxq9e5
[8] Song Y C, Nezu K , Park C H , et al. Tool wear control in single -crystal diamond cutting of steel by using the ultra-intermittent cutting method. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 2009, 49(3-4) pp. 339-3434. https://www.peeref.com/works/10729670
[9] Larionova T.A., Larionov E.O., Influence of cutting modes and cutting tool geometry on surface roughness parameters during turning of titanium alloys // Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists "Innovative ideas in mechanical engineering" IIM-2022, - St. Petersburg May 24-26, 2022 / edited by D.Sc. (Eng.), prof. A.A. Popovich, D.Sc. (Eng.), prof. D.P. Gasyuk. - St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2022. - P. 13-18. https://elibrary.ru/item.asp?id=49558547
[10] Mikhailov S.V., Kovelenov N.Yu., Bolotskikh S.V. Technological conditions for ensuring surface roughness during turning of tool materials with SMP. Stankoinstrument. - 2016. - No. 1 (2). - P. 76-79. https://www.stankoinst.ru/journal/article/5157?ysclid=ma3sz5u47r702953343
[11] Kosova V.A., Gasyuk D.P., On the issue of analyzing the conditions for the development of technological processes of machine-building enterprises //

Bulletin of the Tula State University. Technical sciences. 2021. No. 2. P. 655-658. https://elibrary.ru/item.asp?id=44895083
[12] Diniz E A, Gomes D M, Braghini A J. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. Journal of Materials Processing Technology, 2005 ,159 (2) pp:240-2484. https://www.researchgate.net/publication/223520825_Turning_of_hardened_steel_with_interrupted_and_semi-interrupted_cutting
[13] Ilyin I.V. Mathematical methods and tools for assessing the effectiveness of investments in innovative projects / I.V. Ilyin. - St. Petersburg, 2018. – 289 p.
[14] https://elibrary.ru/item.asp?id=34871102
[15] Anisimov E.G., Anisimov V.G., Solokhov I.V. Problems of scientific and methodological support of interdepartmental information interaction // Military Thought. 2017. No. 12. P. 45-51. https://elibrary.ru/item.asp?id=30752551
[16] Glukhov V.V., Gasyuk D.P. Quality Management. - St. Petersburg, 2013. P. 399. https://aldebaran.one/author/gluhov_vladimir/kniga_upravlenie_kachestvom_uchebnik_dlya_vuzov/?ysclid=ma3t4a4s6r702053854

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.73.043: 004.896
doi:10.18720/SPBPU/2/id-153

С.Н. Кункин[1], А.С. Платонова[2], Л.Б. Аксенов[3]

РАЗРАБОТКА ГРУППОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ТОРЦЕВОЙ РАСКАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТИ



[1]Кункин Сергей Николаевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79043343607, E-mail: kunkin@spbstu.ru



[2]Платонова Александра Сергеевна
Национальный исследовательский университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79213975162, E-mail: asplatonova@itmo.ru



[3]Аксенов Леонид Борисович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79219316786, E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru

Аннотация

В статье представлен результат использования искусственного интеллекта для распознавания геометрических групп деталей, изготавливаемых обработкой металлов давлением. В качестве объекта исследования выбраны пять групп осесимметричных деталей, производимых с применением холодной торцевой раскатки. Для распознавания принадлежности деталей к этим группам синтезирована сверточная нейронная сеть, построенная на базе TensorFlow и API Keras. После обучения сети степень распознавания для выбранных пяти групп составляла не менее 90%. Предлагаемый подход определения геометрической группы деталей позволяет отойти от субъективной оценки геометрии деталей, и осуществить полную цифровизацию процесса

проектирования с реализацией преимуществ группового метода изготовления.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, торцевая раскатка, нейронная сеть, распознавание, групповая технология, группы поковок

Введение

Созданные теоретические основы построения и использования искусственного интеллекта [1-5] в настоящее время активно реализуются в решении многих практических задач, в том числе, в машиностроении [6]. Россия вошла в число мировых лидеров по стандартизации применения технологий искусственного интеллекта – за последние пять лет был создан фонд более чем из 120 ГОСТов [7]. Среди них специальный стандарт, регламентирующий применение искусственного интеллекта в машиностроении [8].

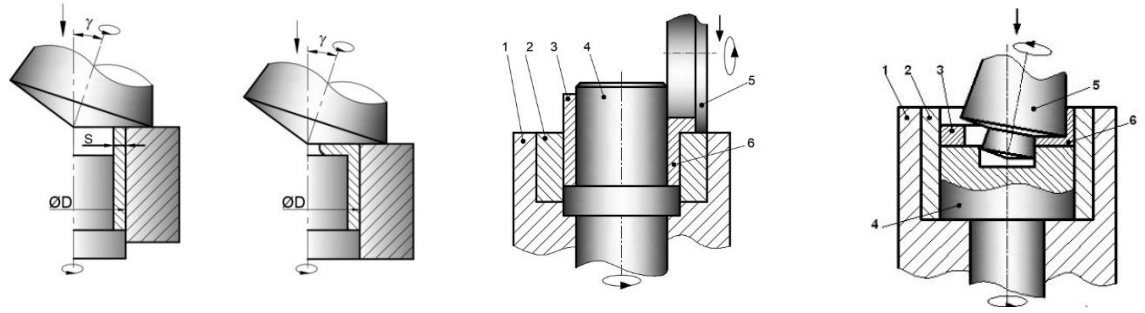
Примеры применения искусственного интеллекта в машиностроении в основном затрагивают проблемы контроля и повышения качества продукции [9]. Это относится и к процессам обработки металлов давлением [10]. Однако искусственный интеллект может сыграть положительную роль в организации производства. Так, использование нейросетей может оказаться весьма эффективным при анализе геометрии изготавливаемых деталей с целью внедрении группового метода обработки, реализуя все преимущества этого метода. Типизация технологических процессов, предложенная А.П. Соколовским [11], и групповой метод обработки, развитый С. П. Митрофановым для механических цехов [12], в заготовительном производстве основаны на классификации геометрически однородных деталей в отдельные группы, для изготовления которых требуется общие оборудование, оснастка, приспособления и т.д. Этот подход, в значительной мере развитый для традиционных процессов ковки, объемной и листовой штамповки, еще не охватывает все процессы обработки металлов давлением, в том числе и процессы торцевой раскатки.

Цель работы: определить возможность использования нейросети для определения геометрической группы для деталей изготавливаемых процессом холодной торцевой раскатки.

Метод исследования

Среди многочисленных технологий обработки металлов давлением значительное место занимает процесс торцевой раскатки. Технология торцевой раскатки является разновидностью процессов локального деформирования, со сложным движением инструмента относительно обрабатываемой детали. По сравнению со многими технологиями ковки и

штамповки эта технология, созданная в начале XX века [13, 14], является сравнительно молодой. Теоретические основы этой технология были сформулированы только в конце XX века [15], а технологические возможности еще продолжают исследоваться [16-18]. Для реализации этой технологии создаются новые, оригинальные, инновационные машины, что позволяет реализовать различные технологические приемы раскатки [19]. Применение в процессе торцевой раскатки конических и цилиндрических валков, разнообразного вспомогательного инструмента, активного и пассивного приводов для вращения заготовки обеспечивают широкие возможности этого процесс для получения деталей разнообразной геометрии из полых, прутковых и кольцевых заготовок (рис. 1).



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Примеры процессов торцевой раскатки при производстве осесимметричных деталей: раскатка внутреннего фланца на трубной заготовке коническим валком (а); раскатка наружного фланца на трубной заготовке цилиндрическим валком (б); раскатка внутреннего фланца из кольцевой заготовки (в)
1 – обойма, 2 – матрица, 3 – заготовка, 4 – оправка, 5 – валок, 6 - деталь

Детали, изготовляемые торцевой раскаткой, в зависимости от их конфигурации подразделяют на три основные группы, при этом каждая из групп разделяется на подгруппы численностью от трех до шести (Рис. 2). Принадлежность детали к одной из групп в значительной мере определяет технологию ее изготовления: вид и количество раскатных валков, применение оправки Обычно подгруппа для детали выбирается технологом субъективно, исходя из общих рекомендаций и собственного опыта. Применение нейронных сетей для распознавания групп поковок открывает новые возможности для формализации решения этой проблемы.

Для различных задачи классификации изображений широко используются модели, предобученные на больших наборах данных изображений. В работе для определения принадлежности деталей к одной из технологических групп использовалась предобученная сверточная нейронная сеть ResNet50V2 [20]. Нейросеть была построена на базе TensorFlow [21] и API Keras [22], которые обеспечили возможность работы с моделями типа Sequential [23]. Сеть состояла из 50 слоев, что позволило ей улавливать сложные паттерны [24] и особенности в данных. Нейросеть

этого класса уже была успешно использована для процесса распознавания типа поковок изготавливаемых на горизонтально-ковочных машинах [25].

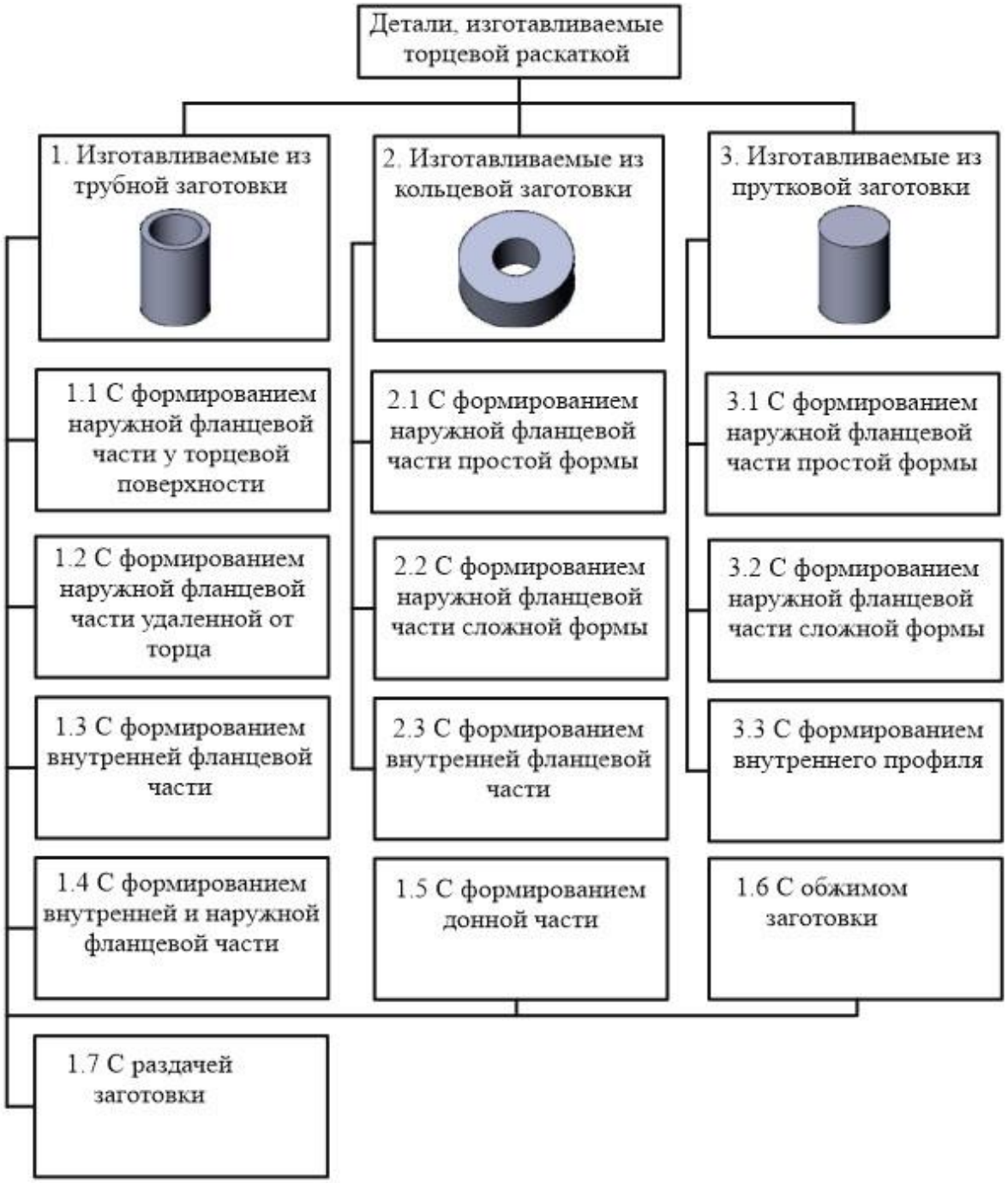
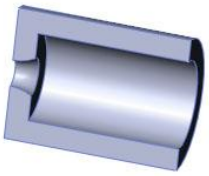
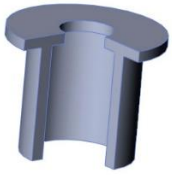
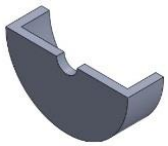


Рис. 2. Укрупненная классификация деталей, изготавливаемых торцевой раскаткой

Для адаптации ResNet50V2 к решению поставленной задачи определения группы деталей, т.е. реализации трансферного обучения, где модель подстраивается для решения конкретной задачи классификации, нейросеть была дополнена классификатором, состоящим из нескольких слоев: Flatten, Dense, Dropout.

Для создания набора данных для обучения нейронной сети были выбраны пять подгрупп (1.1, 1.3, 1.4, 2.3, 3.2) осесимметричных деталей изготавливаемых их различных видов заготовок (табл. 1).

Таблица 1. Группы раскатанных деталей, выбранные для распознавания

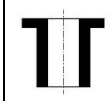
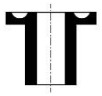
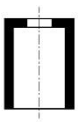
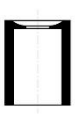
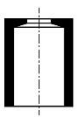
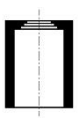
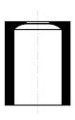
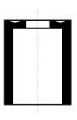
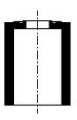
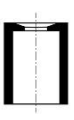
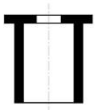
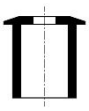
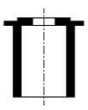
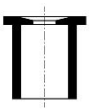
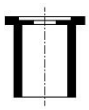
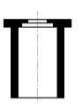
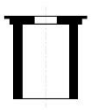
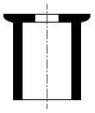
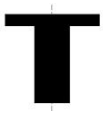
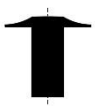
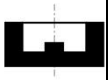
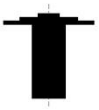
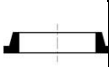
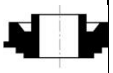
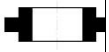
Номер группы	Описание технологической группы	Пример детали
1.1	С формированием наружной фланцевой части у торцевой поверхности трубной заготовки	
1.3	С формированием внутренней фланцевой части на трубной заготовке	
1.4	С формированием внутренней и наружной фланцевой части на трубной заготовке	
2.3	С формированием внутренней фланцевой части кольцевой заготовки	
3.2	С формированием наружной фланцевой части сложной формы на прутковой заготовке	

Детали, изготавливаемые торцевой раскаткой, имеют определенные отличия, которые должна распознать нейросеть. К этим особенностям относится наличие сквозного отверстия на деталях, изготавливаемых из трубных заготовок, или его отсутствие на деталях, изготавливаемых из прутка. Можно предположить, что это различие нейросеть легко распознает. Разница в других геометрических особенностях, таких как вид и профиль раскатываемого фланца, более трудны для распознавания, т.к. локально сосредоточены в торцевых частях деталей, объем (или площадь в сечении) которых много меньше полного объема деталей.

Обучение нейронной сети проводилось с использованием набора данных по структуре похожих на CIFAR-10, в котором представлены

меридиональные, несколько утрированные, сечения выбранных типов деталей (табл. 2).

Таблица 2. Исходный набор данных для обучения нейронной сети

1.1									
1.3									
1.4									
2.3									
3.2									

Модель ResNet50V2 относится к нейронным сетям, которые используют принцип "обучение с учителем" (supervised learning). Такой метод обучения подразумевает работу с заранее размеченным набором данных, то есть таким, где изображения разделены на группы с соответствующей меткой (в нашем случае это номер группы) и эта метка ожидается как выходной результат. Такие модели обучаются на тренировочном наборе данных, используя различные алгоритмы для определения взаимосвязей между входными признаками и выходными метками. Во время обучения модели делается попытка минимизировать функцию потерь, которая измеряет неточности в предсказаниях сети.

Глубокие нейронные сети обучаются путем подстройки своих связей так, чтобы лучше передавать входные сигналы через множество слоев тем нейронам, которые отвечают за различные способы обработки, и имеют пять основных этапов обучения (рис. 3).

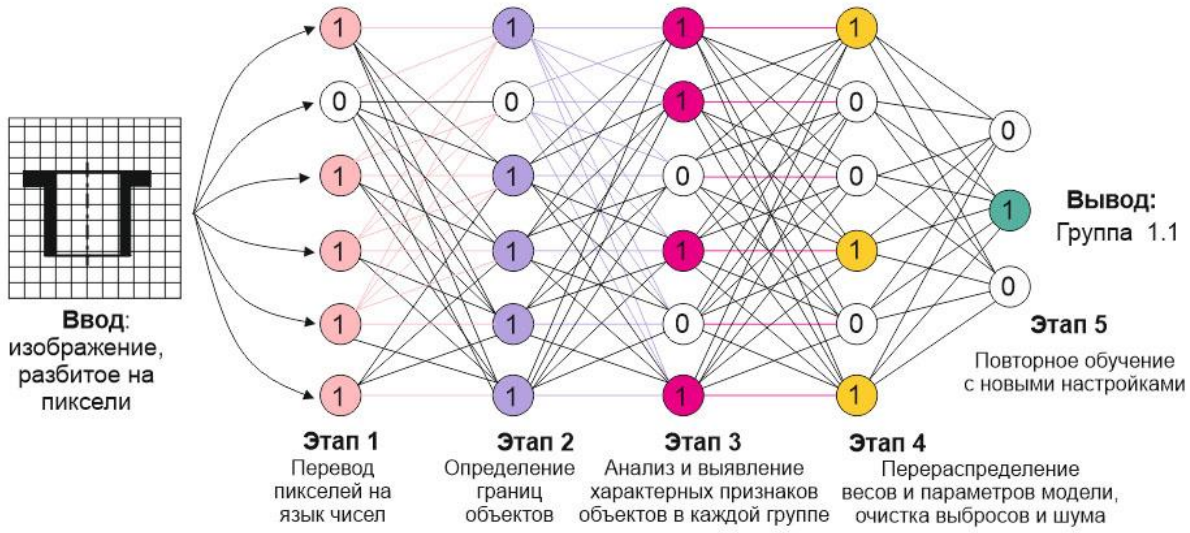


Рис. 3. Этапы обучения нейронной сети ResNet50V2

В отличие от первой версии нейросети ResNet50V1, ResNet50V2 получила изменения в архитектуре (рис. 4), в частности, была добавлена пакетная нормализация (Batch Normalization) [26]. Это позволило сети обучаться быстрее, то есть, потребовалось меньше эпох для достижения нижней границы потерь, что в свою очередь сократило время обучения. Также в сети ResNet50V2 использовалась регуляризация через шум.

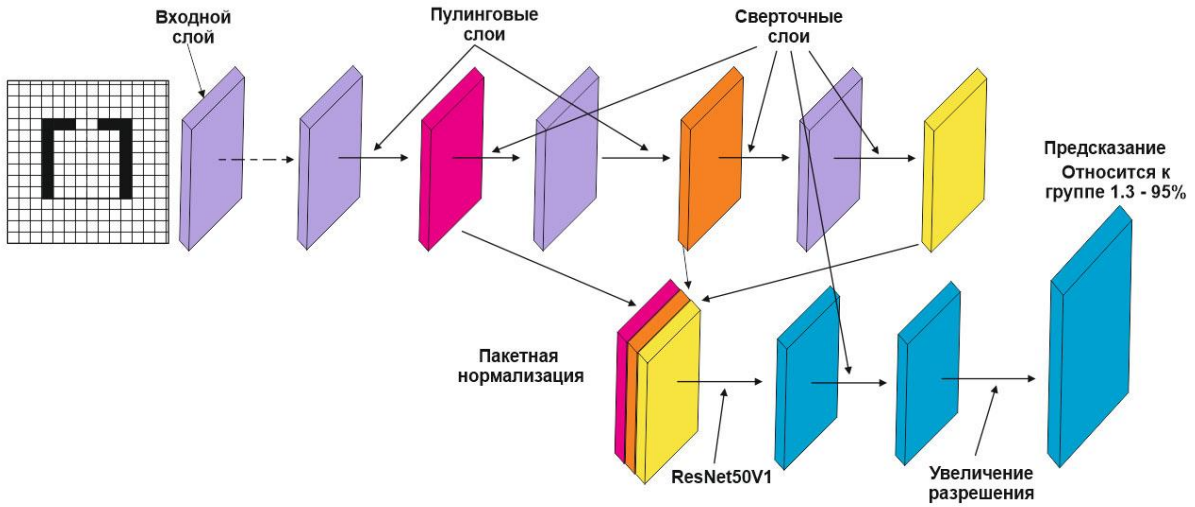


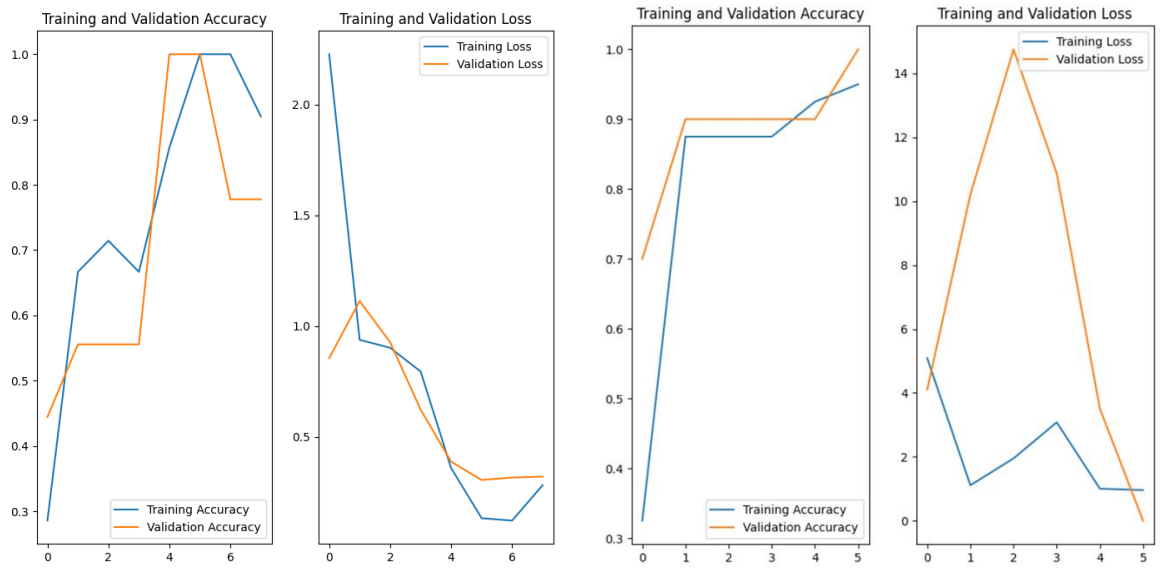
Рис. 4. Структура синтезированной нейронной сети ResNet50V2 (в упрощенном виде)

Во время обучения Batch Normalization нормализует выходные данные (активации) после каждого слоя модели по мини-батчам (небольшим группам тренировочных данных). Эта нормализация добавляет некоторый уровень вариации (шума) к активациям модели. Каждый

мини-батч имеет свои собственные параметры (среднее и стандартное отклонение), что приводит к тому, что модель не может слишком сильно подстраиваться под конкретные данные в обучающем наборе. Это помогает снизить возможность переобучения сети на обучающей выборке.

Для предварительной обработки данных используется библиотека PIL (Pillow), позволяющая выполнять базовые операции с растровыми изображениями. Библиотека NumPy применяется для работы с многомерными массивами, она необходима для выполнения вычислений, связанных с вероятностными предсказаниями модели.

Перед началом обучения данные разделяются на три категории: 70% используются для обучения, 15% — для валидации, а оставшиеся 15% — для тестирования. В процессе обучения проведены пять итераций (эпох) (рис. 5).



а) *б*)

Рис. 5. Графики точности и потерь для тренировочного и проверочного наборов данных для исходной (*а*) и оптимизированной модели нейросети (*б*)

До четвертой эпохи обучения точность для тренировочной и валидационной выборок растет, что указывает на нормальное обучение модели (рис. 5, *а*). Графики потерь до пятой эпохи соответствуют стандартному процессу обучения, постоянно снижаясь. Небольшой рост потерь на валидационной выборке считается допустимым. Начиная с пятой итерации, на проверочной выборке наблюдается плато, а позже резкий спад, такое поведение графика может говорить о переобучении, то есть модель перестает отличать детали одного типа от другого (рис. 5, *а*). На это так же указывает рост потерь на тренировочной выборке после 6 эпохи обучения.

Так как для работы была выбрана предобученная модель с большим количеством слоев, изменение ее конфигурации и подбор гиперпараметров

(количество слоев, количество нейронов в каждом слое, скорость обучения и функции активации) для достижения наибольшей точности модели задача достаточно трудоемкая. Для решения этой проблемы была использована библиотека Keras Tuner [27], позволяющая автоматизировать подбор гиперпараметров в моделях глубокого обучения, построенных с использованием Keras, что позволило исследовать различные конфигурации моделей для достижения оптимальной производительности. В результате проведения десяти тестов с помощью Keras Tuner были определены рациональные значения гиперпараметров:
- число нейронов в плотном слое = 192;
- параметр Dropout = 0.4, указывающий, что во время обучения нейронной сети слой Dropout будет случайным образом отключать 40% нейронов в этом слое на каждой итерации обучения; выключая значительное количество нейронов, Dropout заставляет модель учиться более обобщенным паттернам, а не запоминать детали обучающего набора данных; это помогает избежать переобучения;
- коэффициент скорости обучения (learning rate) = 0.0006.

Модель была обучена повторно, исходя из найденных значений гиперпараметров. В результате точность на графиках достигла значения 0.9 ко второй эпохе обучения, а после фазы плато снова начинает расти (рис. 5, *б*). Резкий скачок графика потерь для валидационной выборке свидетельствует об изменении гиперпараметров модели. Но так как далее наблюдается быстрый спад, то можно сделать вывод, что параметры подобраны достаточно правильно, и обучение модели проходит в нормальном режиме, без явного переобучения.

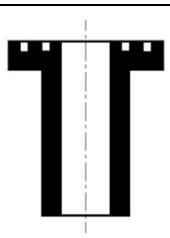
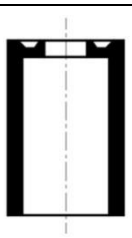
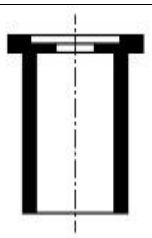
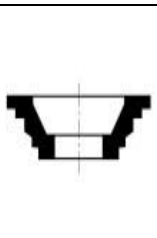
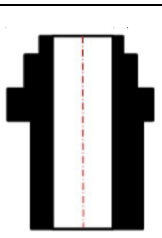
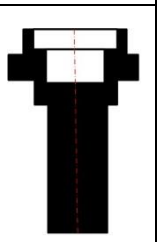
Обсуждение результатов

После обучения сеть загружались изображения деталей различных групп, но не входящие в исходный обучающий набор данных, а от нейросети требовалось определить тип, к которому относится изображение и достоверность совпадения. Для итогового тестирования использовалась модель, обученная с гиперпараметрами, подобранными с помощью Keras Tuner. Результаты распознавания групп анализируемых деталей приведены в таблице 3. Нейросеть успешно определила принадлежность деталей к исследуемым пяти группам с достоверностью 91-99%.

Далее в нейросеть были загружены для распознавания сечения контрольных деталей, не принадлежащих ни к одной из перечисленных пяти групп, использованных при обучении нейросети. Созданная сеть определила для этих деталей группу с набором признаков, которая имеет наибольшее число совпадений с исходной геометрией детали. Так, одна из деталей была отнесена к группе 1.1 - полых деталей с наружным фланцем

(табл. 3). Однако фланец на контрольной детали заметно отличался от фланцев деталей группы 1, так как высота фланца значительно превосходила его ширину. Поэтому вероятность отнесения этой детали к группе 1 составила только 42,08%.

Таблица 3. Результаты распознавания типа поковок нейронной сетью

1.1	1.3	1.4	2.3	3.2	Неизвестный тип	
						
94,64%	96,32%	95,1%	99,1%	91,23%	1.1 40,46%	3.2 42,08%

Другая контрольная деталь была отнесена к группе 3.2. Нейросеть распознала, что деталь изготавливается из прутковой заготовки, но ее фланцевая часть характерна скорее для операции высадки, чем для торцевой раскатки. Как результат, достоверность отнесения этой контрольной детали к группе 3.2 была определена в 40,46%.

Следует отметить, что распределение деталей по группам, изготавливаемых торцевой раскаткой, были созданы специалистами, исследовавшими этот процесс. Важно было бы проанализировать, как определит эти группы нейросеть, если представить ей всю совокупность деталей, изготавливаемых этой технологией. Такие попытки уже были сделаны [28], получены интересные результаты, но требующие еще дополнительного анализа.

Заключение

- Синтезированная нейронная сеть после обучения оказалась способной распознавать пять групп осесимметричных деталей изготавливаемых торцевой раскаткой с достоверностью не менее 90%, что дает основание для практического использования нейросети в процессе создания групповых технологий торцевой раскатки.
- При анализе сечений деталей, не принадлежащих ни к одной из перечисленных трех групп, созданная нейросеть относила деталь к группе, для которой набор признаков имел наибольшее число совпадений с эскизом детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Горбань А. Н. Обучение нейронных сетей. М.: ParaGraph, 1990. 160 с.
[2] Wasserman, Philip D., Advanced methods in neural computing. 1993 New York : Van Nostrand Reinhold, 255 p.
[3] Prateek Joshi. Artificial Intelligence with Python. Packt Publishing Ltd, 2017, 446p.
[4] Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. - М.: Диалектика, 2019. - 1104 с.
[5] Дэвид Фостер. Генеративное глубокое обучение. Творческий потенциал нейронных сетей. Изд-во Питер, 2020, 336 с.
[6] Yue LIU. The Review of Intelligent Mechanical Engineering Based on Artificial Neural Network. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/publication/300620879_ . Дата обращения: 02.02.2025
[7] Научно-практический семинар «Развитие систем искусственного интеллекта в странах СНГ». МОСКВА, 18 ноября 2024 г. Электронный ресурс: https://www.rst.gov.ru//newsRST/redirect/news/1//9619 . Дата обращения 05.02.2025
[8] Национальный стандарт ПНСТ 955-2024. Искусственный интеллект в машиностроении. Варианты использования. Электронный ресурс: https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=9&month=11&year=2024&search=&id=263494 . Дата обращения: 15.01.2025.
[9] Черепанов Н.В., Буслаев С.П. Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии. «Инновации и инвестиции». № 7. 2021, с.175-179.
[10] S.Gondo, H.Arai. Data-driven metal spinning using neural network for obtaining desired dimensions of formed cup. CIRP Annals. Volume 71, Issue 1, 2022, Pages 229-232
[11] Курс технологии машиностроения: Допущ. М-вом высш. образования СССР в качестве учебника для втузов / Проф. А. П. Соколовский, д-р техн. наук. - Москва ; Ленинград : [Ленингр. отд-ние] и 1-я тип. Машгиза в Л., 1947-1949. - 2 т.
[12] Митрофанов С.П. Научные основы организации группового производства — М;Л.: Машгиз, 1963. — 308 с.
[13] Slick E. E. The Slick Wheel Mill // The Iron Age. 1918. Vol. 102, N 9. P. 491–498.
[14] Massey H. F. British Patent Specification. 1929. N 319065.

[15] Standring P. M. The significance of nutation angle in rotary forging // Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the 6th ICTP. 1999. Vol. III. P. 1739–1744.
[16] Агеев Н. П. Технологические возможности объемной штамповки обкатыванием на сферодвижном прессователе. Классификация процессов // Металлообработка. 2001. № 5. С. 36–44.
[17] Recent development in orbital forging technology / J. Nowak, L. Madej, S. Ziolkiewicz, [et al.]. International Journ. Material Forming. 2008. Supp. 1. P. 387–390.
[18] Аксенов Л.Б., Кункин С.Н. Машины и технологии торцевого локального деформирования (к 100-летию первой раскатной машины). Металлообработка. 2018. № 3 (105). С. 25-33.
[19] MJC Engineering & Technology. Rotary Forging Brochure. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mjcengineering.com/machines/additional-equipment/%20rotary-forging-equipment/ Дата обращения 05.02.2025).
[20] ResNet50v2 architecture. Электронный ресурс: https://www.researchgate.net/figure/ResNet50v2-architecture_fig1_359153551 . Дата обращения 11.01.2025
[21] Create production-grade machine learning models with TensorFlow. Электронный ресурс: https://www.tensorflow.org/?hl=en. Дата обращения: 14.01.2024.
[22] Keras 3 API documentation. Электронный ресурс: https://keras.io/api/. Дата обращения: 14.01.2024.
[23] What are convolutional neural networks? Электронный ресурс: https://www.ibm.com/topics/convolutional-neural-networks. Дата обращения: 14.01.2024.
[24] Dima Topius. Мозг изнутри (Визуализация прохождения паттерна через модель искусственной нейронной сети). Электронный ресурс: https://habr.com/ru/articles/438972/ . Дата обращения 11.01.2025.
[25] Аксенов Л.Б., Платонова А.С. Распознавание групповой принадлежности поковок с использованием нейронных сетей. Современное машиностроение: Наука и образование 2024: материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, с. 625-638.
[26] Martin Riva, Batch Normalization in Convolutional Neural Networks. Электронный ресурс: https://www.baeldung.com/cs/batch-normalization-cnn. Дата обращения: 11.01.2025.
[27] KerasTuner. Электронный ресурс: https://keras.io/keras_tuner/ . Дата обращения: 13.03.2025
[28] Elia Hamouche & Evripides G. Loukaides (2018) Classification and selection of sheet forming processes with machine learning, International

Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31:9, 921-932, https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668

S.N.Kunkin[1], A.S.Platonova[2], L.B.Aksenov[1]

DEVELOPMENT OF A GROUP TECHNOLOGY FOR AXIAL ROTARY FORGING USING A NEURAL NETWORK

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

Abstract

The paper presents the result of using artificial intelligence to recognize geometric groups of parts made by metal forming. Five groups of axisymmetric parts produced using cold axial rotary forging have been selected as the object of research. To recognize the details belonging to these groups, a convolutional neural network based on TensorFlow and the Keras API was synthesized. After training the network, the recognition rate for the selected groups was at least 90%. The proposed approach to determining the geometric group of parts allows us to move away from the subjective assessment of the geometry of parts, and to fully digitalize the design process with the implementation of the advantages of the group manufacturing method.

Keywords: metal forming, axial rotary forging, neural network, part groups, recognition, group technology

REFERENCES

[1] Gorban' A. N. Obuchenie nejronnykh setej. M.: ParaGraph, 1990. 160 s.
[2] Wasserman, Philip D., Advanced methods in neural computing. 1993 New York : Van Nostrand Reinhold, 255 p.
[3] Prateek Joshi. Artificial Intelligence with Python. Packt Publishing Ltd, 2017, 446p.
[4] Khajkin, S. Nejronnye seti: polnyj kurs / S. Khajkin. - M.: Dialektika, 2019. - 1104 c.
[5] Djevid Foster. Generativnoe glubokoe obuchenie. Tvorcheskij potentsial nejronnykh setej. Izd-vo Piter, 2020, 336 s.
[6] Yue LIU. The Review of Intelligent Mechanical Engineering Based on Artificial Neural Network. Information on URL: https://www.researchgate.net/publication/300620879 Accessed: 02.02.2025

[7] Nauchno-prakticheskij seminar «Razvitie sistem iskusstvennogo intellekta v stranakh SNG». MOSKVA, 18 noyabrya 2024 g. Information on URL:https://www.rst.gov.ru//newsRST/redirect/news/1//9619 . Accessed: 05.02.2025
[8] Natsional'nyj standart PNST 955-2024. Iskusstvennyj intellekt v mashinostroenii. Varianty ispol'zovaniya. Information on URL: https://protect.gost.ru/default.aspx/document1.aspx?control=31&baseC=6&page=9&month=11&year=2024&search=&id=263494. Accessed: 15.01.2025.
[9] Cherepanov N.V., Buslaev S.P. Problemy i zadachi razvitiya iskusstvennogo intellekta na mashinostroitel'nom predpriyatii. «Innovatsii i investitsii». № 7. 2021, c.175-179.
[10] S.Gondo, H.Arai. Data-driven metal spinning using neural network for obtaining desired dimensions of formed cup. CIRP Annals. Volume 71, Issue 1, 2022, Pages 229-232
[11] Kurs tekhnologii mashinostroeniya: Dopushch. M-vom vyssh. obrazovaniya SSSR v kachestve uchebnika dlya vtuzov / Prof. A. P. Sokolovskij, d-r tekhn. nauk. - Moskva ; Leningrad : [Leningr. otd-nie] i 1-ya tip. Mashgiza v L., 1947-1949. - 2 t.
[12] Mitrofanov S.P. Nauchnye osnovy organizatsii gruppovogo proizvodstva - M;L.: Mashgiz, 1963. - 308 s.
[13] Slick E. E. The Slick Wheel Mill // The Iron Age. 1918. Vol. 102, N 9. P. 491–498.
[14] Massey H. F. British Patent Specification. 1929. N 319065.
[15] Standring P. M. The significance of nutation angle in rotary forging // Advanced Technology of Plasticity, Proceeding of the 6th ICTP. 1999. Vol. III. P. 1739–1744.
[16] Ageev N. P. Tekhnologicheskie vozmozhnosti ob"emnoj shtampovki obkatyvaniem na sferodvizhnom pressovatele. Klassifikatsiya protsessov // Metalloobrabotka. 2001. № 5. S. 36-44.
[17] Recent development in orbital forging technology / J. Nowak, L. Madej, S. Ziolkiewicz, [et al.]. International Journ. Material Forming. 2008. Supp. 1. P. 387–390.
[18] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Mashiny i tekhnologii tortsevogo lokal'nogo deformirovaniya (k 100-letiyu pervoj raskatnoj mashiny). Metalloobrabotka >. 2018. № 3 (105). S. 25-33.
[19] MJC Engineering & Technology. Rotary Forging Brochure. Information on URL: https://mjcengineering.com/machines/additional-equipment/%20rotary-forging-equipment/ . Accessed: 05.02.2025).
[20] ResNet50v2 architecture. Information on URL: https://www.researchgate.net/figure/ResNet50v2-architecture_fig1_359153551 . Accessed 11.01.2025

[21] Create production-grade machine learning models with TensorFlow. Information on URL: https://www.tensorflow.org/?hl=en. Accessed: 14.01.2024.
[22] Keras 3 API documentation. Information on URL: https://keras.io/api/. Accessed: 14.01.2024.
[23] What are convolutional neural networks? Information on URL: https://www.ibm.com/topics/convolutional-neural-networks. Accessed: 14.01.2024.
[24] Dima Topius. Mozg iznutri (Vizualizatsiya prokhozhdeniya patterna cherez model' iskusstvennoj nejronnoj seti). Information on URL: https://habr.com/ru/articles/438972/ . Accessed: 11.01.2025.
[25] Aksenov, L.B., Platonova, A.S. Raspoznavanie gruppovoj prinadlezhnosti pokovok s ispol'zovaniem nejronnykh setej. Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie 2024: materialy 13-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii, 20 iyunya 2024 goda / Pod red. A.N. Evgrafova i A.A. Popovicha. - SPb.: POLITEKh-PRESS, 2024, s. 625-638.
[26] Martin Riva, Batch Normalization in Convolutional Neural Networks. Information on URL: https://www.baeldung.com/cs/batch-normalization-cnn. Accessed: 11.01.2025.
[27] KerasTuner. Information on URL: https://keras.io/keras_tuner/. Accessed: 13.03.2025
[28] Elia Hamouche & Evripides G. Loukaides (2018) Classification and selection of sheet forming processes with machine learning, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31:9, 921-932, https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 691.1
doi:10.18720/SPBPU/2/id-154

В.Ю. Лебедева[1], Ю.Г. Лазарев[2], А.Я. Башкарев[3]

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНО-МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



[1]Виктория Юрьевна Лебедева,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(931)292-4945, E-mail: bessonova.viktoria@yandex.ru.



[2]Юрий Георгиевич Лазарев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)4416837, E-mail: Lazarev-yurij@yandex.ru.



[3]Альберт Яковлевич Башкарев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)950-3715, E-mail: bashkarev@spbstu.ru .

Аннотация

Доказывается, что инертные минеральные фракции во многих композитах определяюще влияют на их прочность и долговечность, обеспечивая когезионную прочность соединения «связующее-наполнитель. Рассматривается деструкция полимерных композитов на примере асфальтобетонов с позиции термоактивированного разрушения.

Ключевые слова: долговечность, композиционные полимерно-минеральные материалы, адгезионная прочность

Введение

Полимерные композиты в большинстве своем почти на 90% состоят из твердых инертных материалов разной дисперсности с размером фракций от нескольких микрон до десятков миллиметров. Все они объединяются в единый монолитный материал с помощью полимерного связующего способного создавать с ними прочные адгезионные соединения. Благодаря хорошим технологическим возможностям чаще всего для этого используются термопласты, такие как полиамиды, акриловые смолы, поликарбонат, полиэфиры и многие другие [1-3]. Но самым распространенным адгезивоспособным и доступным материалом стал битум, в огромных объемах используемый в дорожном строительстве [4-5].

Разрушение полимерных композиционных материалов обычно происходит либо по связующему слою полимера, например битума, либо по самому адгезионному соединению его с поверхностью твердого наполнителя. Существующие стандартные методы испытания прочности композитов оценивают комплексную прочность, не дифференцируя вклад в нее каждой составляющей материала, что затрудняет использовать такие результаты для поиска пути увеличения прочности композитов, а тем более их долговечности.

Такой поиск осложняется еще и тем, что на границе поверхностей соединяемых материалов, входящих в состав композита, могут происходить существенные изменения их физико-механических свойств и часто в сторону их улучшения. Эти явления описываются в ряде опубликованных работ [6-10].

Оценить это можно только испытанием адгезионных соединений конкретных материалов. Поэтому встает вопрос о разработке таких методов исследования, которые позволяют дифференцированно установить и количественно определить их роль в долговечности композита, например, асфальтобетона [11-12].

Методы

В данной работе такой подход реализован и подкреплен соответствующей методикой. Исследования проводились на минерально-битумных образцах, описанных в работе [13] с использованием критериев термофлуктуационной теории прочности, каноническое выражение которой записывается в виде формулы (1):

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где τ – долговечность, σ – действующие механические напряжения, T – температура, u – энергия активации разрушения материала, γ – коэффициент чувствительности его к механическим напряжениям, R – газовая постоянная,. В представленной формуле σ и T имеют постоянное значение, τ_0 - предэкспотенциальный множитель 10^{-12} с.

При переменных нагрузке и температуре формула записывается в виде критерия Бейли [14-15]:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \cdot \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 \quad (2)$$

В краткой форме описания применяемых образцов и методов их испытания можно представить рисунками 1 и 2.

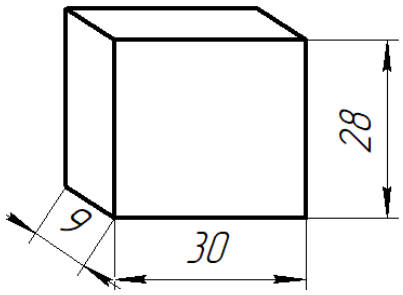


Рис. 1. Гранитные образцы

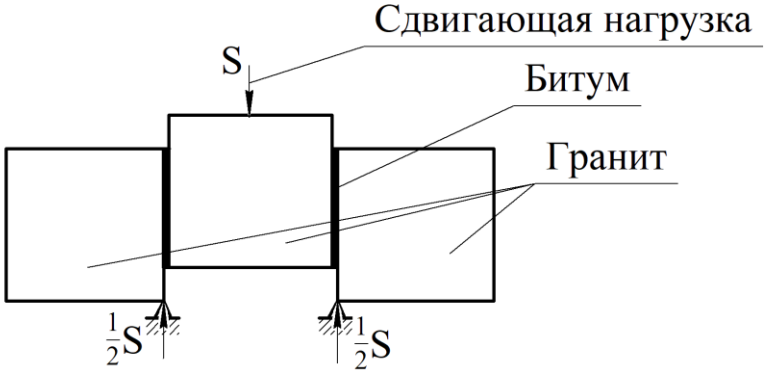


Рис. 2. Схема нагружения адгезионного соединения битума с гранитом

Основные моменты подготовки образцов к испытаниям состояли в следующем.

Гранитные призмы (рис. 1) нагревались до заданной температуры исследования, соответствующей технологической температуре приготовления асфальтобетонной смеси, например 160 ºС. Три гранитные призмы склеивались предварительно разогретым до той же температуры битумом (рис. 2), сжимались струбциной и помещались снова в термостат на заданное экспериментом время. После этого они охлаждались погружением в воду и освобождались от струбцин.

В нагретом состоянии происходит образование адгезионного соединения как результат термодеструкция молекул связующего сопровождающаяся появлением активных радикалов, создающих физико-механические связи с поверхностями твердых фракций. Но эти связи тоже подвергаются термодеструкции [14-15].

Таким образом, параллельно идут два процесса: образование адгезионного соединения и его разрушение. Эти процессы происходят и во время изготовления композита, как правило, при достаточно высоких температурах и продолжаются, значительно медленнее в процессе эксплуатации готового композита при относительно низких температурах, но при воздействии механических нагрузок. Последний период и является долговечностью материала, который заканчивается, когда предел его прочности снизится до величины рабочих напряжений.

Во время формирования адгезионных связей в процессе производства композита на них не действуют механические напряжения. Происходит только термодеструкция полимолекул и возникающих адгезионных связей. В работе [15] было теоретически обосновано, что по моменту t_*, который соответствует наступлению максимальной прочности адгезии при постоянной температуре термостатирования, может быть рассчитана энергия активации разрушения адгезионных связей.

На рисунке 3 представлены графики изменения адгезионной прочности гранитных образцов, склеенных битумом при двух различных температурах T_1 и T_2, и сразу термостатированных при этих же температурах ($T_1>T_2$). Испытание адгезии проводилось при нормальной температуре 20 ºС (293 ºК).

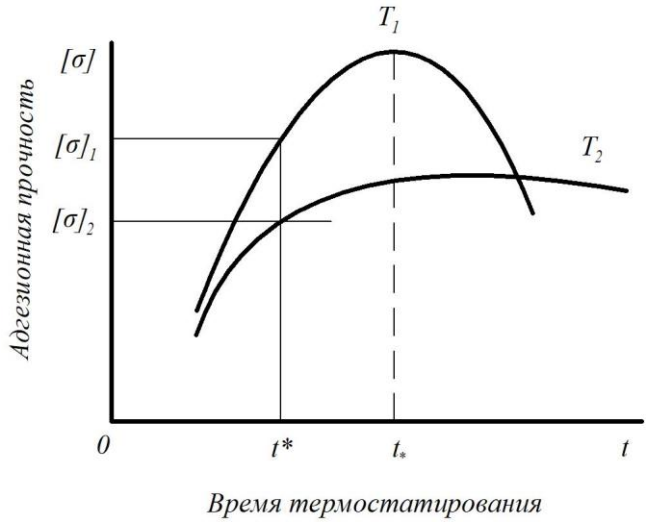


Рис. 3. Изменение адгезионной прочности при ее термостатировании

Продифференцировав выражение (1) и приравняв его первую производную по времени к нулю, можно получить формулу:

$$t_* = \tau_0 \exp\frac{u_a}{RT},$$

Откуда следует (3):

$$u_a = RT(\ln t_* - \ln \tau_0), \qquad (3)$$

Из представленной формулы в работе [13] было получено выражение для определения количества образовавшихся адгезионных связей при постоянной температуре (4):

$$N = z\frac{t}{\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT}}\left(1 - \frac{t}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT}}\right), \qquad (4)$$

Таким образом, остается не менее актуальной задачей для расчета долговечности полимерного композита – определение энергии активации разрушения не только адгезионных связей, но и самого адгезива. Для ее решения была разработана и апробирована следующая методика. Экспериментально определена адгезионная прочность при одном и том же времени термостатирования при двух разных температурах T_1 и T_2.

$$[\sigma]_1 = \frac{t_*}{\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_1}}\left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}}\right)$$

$$[\sigma]_2 = \frac{t_*}{\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_2}}\left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}}\right)$$

Отсюда получается уравнение (5):

$$\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \frac{(1-\frac{t}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}})\cdot\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_2}}{(1-\frac{t}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}})\cdot\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_1}} \quad (5)$$

После его логарифмирования уравнение, выражение принимает вид:

$$\ln\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}}) - \ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}}) + u_б(\frac{1}{RT_2}-\frac{1}{RT_1})$$

Тогда

$$u_б = \frac{\ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}}) - \ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}}) - \ln\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)} \quad (6)$$

Этот метод не требует многочисленных экспериментов, необходимых для построения графиков $[\sigma] = f(t)$ при двух разных температурах. Достаточно экспериментально определить прочность адгезии через одно и то же время t_* при двух разных температурах термостатирования T_1 и T_2.

Результаты

По разработанной методике были определены энергии активации разрушения битума марки БНД 70/100 производства КИНЕФ и его адгезионных связей с тремя марками гранита из карьеров Северо-Западного региона. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Энергия активации разрушения адгезии u_a и битума $u_б$

Битум БНД 70/100 КИНЕФ	Температура, Т, °С	Время, мин	Прочность, МПа	u_a, кДж/моль	$u_б$, кДж/моль

Гранит Эркиля	170 150	172800 172800	1,03 0,88	146,115	60,022
Гранит Красногорское	170 150	172800 172800	0,88 0,54	146,115	85,791
Гранит Габбро-диабаз	170 150	86400 86400	1,07 0,98	143,564	54,393

Результаты расчетов энергий активации разрушения, представленные в таблице 1, показывают, что энергия адгезионных связей не зависит от марок использованных гранитов. Она практически полностью определяется битумом и составляет примерно 146,1 кДж/моль, т.е. значительно больше, чем у Ван-дер-Ваальсовых сил (0,8-8,2 кДж/моль). Скорее всего это слабые в данном случае химические ковалентные связи на нижней границе.

Однако энергия активации разрушения самого битума в тонком слое на поверхности гранита (а может быть любого другого минерального материала) существенно зависит от его породы. Так у соединения битума марки БНД 70/100 производства КИНЕФ большая когезионная прочность оказалась у битума в слое на граните из карьера «Красногорское». Похоже к каждому минеральному материалу нужно подбирать свой битум. Это относится не только к граниту, но и к минеральному материалу.

В работе [15] приведены результаты исследований с помощью инфракрасной спектрометрии напряженного состояния межатомных связей в молекулах асфальтенов битума, которые как известно, в основном предопределяют его физико-механические свойства [16-19]. Высказывается мнение, что это положительное влияние из-за внедрения в структуру асфальтенов ионов железа, приводящие к сжатию межатомных связей и, следовательно, к повышению прочности. Это явление требует своего дальнейшего изучения. Но в определенной степени это было подтверждено тем, что прибавление в битум мелкодисперсного порошка железного сурика, позволило заметно увеличить износостойкость асфальтобетона (на 15 %).

Заключение

1. Хотя большинство экспериментов проводилось применительно к асфальтобетону, результаты и выводы в такой же степени относятся ко всем полимерным композитам на основе термопластов.

2. Долговечность битума, находящего в виде тонких слоев между минеральными фракциями наряду с другими факторами, зависит от их природы. Особенно важно это учитывать при подборе самых мелких фракций, такие как, минеральные порошки, которые имеют самую большую фактическую площадь контакта с высокомолекулярным связующим (в асфальтобетонах это битум).
3. Впервые обоснована и разработана методика определения энергии активации разрушения полимерного связующего непосредственно на его тонком слое, соединяющим минеральные поверхности.
4. Доказано, что прочность и долговечность адгезионного соединения лимитируются физико-механическим и свойствами самого битумного слоя, а не его адгезией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. —2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2010.— 822 с.

[2] Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // Российский химический журнал. 2010. т. LIV. № 1. С. 30–40.

[3] Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245-256.

[4] Обухов А.Г., Высоцкая М.А. Эффективные битумные вяжущие для асфальтобетонных покрытий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 11. С. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-32-40

[5] Usmani A. Asphalt Science and Technology (1st ed.). Boca Raton: CRC Press, 1997. 544 p.

[6] Redelius, P. G. The structure of asphaltenes in bitumen. Road Materials and Pavement Design. (2006). 7(sup1). 143–162. https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690062

[7] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. pp. 1-13. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272

[8] Веттегрень, В. И. Деформация химических связей в молекулах покрытия из полиамида 6 на поверхности стали / В. И. Веттегрень, С.

А. Иваньков, Р. И. Мамалимов // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 10. – С. 107-113.
[9] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials. 2018. Vol 183. pp. 95-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169
[10] Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete. Construction of Unique Buildings and Structures; 2023. № 3 (108). C. 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2
[11] Факторы, влияющие на сцепление битума с минеральными материалами / А. С. Ивкин, В. В. Васильев, Е. В. Саламатова [и др.] // Кокс и химия. – 2022. – № 1. – С. 27-36. – DOI 10.52351/00232815_2022_01_27.
[12] Рябинина, К. М. Исследование свойств асфальтобетона на модифицированном полимерами битуме / К. М. Рябинина, Г. В. Проваторова // Строительные материалы и изделия. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 19-29. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29.
[13] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P.225-234 https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22
[14] Hot asphalt mixture temperature control for adhesion strength improvement / A. Ya. Bashkarev, V. Yu. Bessonova, Yu. G. Lazarev, N. I. Panevin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 2(111). – P. 11103. – DOI 10.4123/CUBS.111.3.
[15] Рудской, А. И. Долговечность полимерных композиционных материалов / А. И. Рудской, А. Я. Башкарев, Л. В. Славутин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 675-689.
[16] Gokhman, L. M. In the main role - asphalt // Highways, 2020, No. 8, pp. 121-128.
[17] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. Appl. Sci, 2019, №9, pp. 1–35.
[18] Sirota E. B. (2005). Physical structure of asphaltenes. Energy & fuels, 19(4), 1290-1296. https://doi.org/10.1021/ef049795b

[19] Per Redelius. Asphaltenes in Bitumen, What They Are and What They Are Not, Road Materials and Pavement Design. 2009. 10:sup1, 25-43, http://doi.org/ 10.1080/14680629.2009.9690234

V.Y. Lebedeva, Y.G. Lazarev, A.Y. Bashkarev

ON PREDICTING THE DURABILITY OF COMPOSITE POLYMER-MINERAL MATERIALS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

It is proved that inert mineral fractions in many composites have a decisive influence on their strength and durability, providing cohesive strength of the binder-filler connection. The destruction of polymer composites on the example of asphalt concrete from the position of thermoactivated destruction is considered.

Key words: durability, composite polymer-mineral materials, adhesion strength.

REFERENCES

[1] Mikhailin, Yu.A. Structural polymer composite materials / Yu.A. Mikhailin. —2nd ed., ispr. and add. Saint Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2010. 822 p.
[2] Petrova G.N., Bader E.Ya. Structural materials based on reinforced thermoplastics // Russian Chemical Journal. 2010. vol. LIV. No. 1. pp. 30-40.
[3] Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Orlova A.S., Pikalov E.S. MODERN POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND THEIR APPLICATION // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2018. No. 5-1. pp. 245-256.
[4] Obukhov A.G., Vysotskaya M.A. Effective bitumen binders for asphalt concrete coverings // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. pp. 32-40. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-32-40

[5] Usmani A. Asphalt Science and Technology (1st ed.). Boca Raton: CRC Press, 1997. 544 p.
[6] Redelius, P. G. The structure of asphaltenes in bitumen. Road Materials and Pavement Design. (2006). 7(sup1). 143–162. https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690062
[7] Ying Yuan, Long Chen. Relationship among cohesion, adhesion and bond strength // Materials and design. 2020. Vol. 185. pp. 1-13. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108272
[8] Vettegren, V. I. Deformation of chemical bonds in polyamide 6 coating molecules on a steel surface / V. I. Vettegren, S. A. Ivankov, R. I. Mamalimov // Journal of Technical Physics. - 2011. – Vol. 81, No. 10. – pp. 107-113.
[9] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials. 2018. Vol 183. pp. 95-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.169
[10] Bashkarev A.Ya., Bessonova V.Yu., Lazarev Yu.G., Lozhechko V.P. Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete. Construction of Unique Buildings and Structures; 2023. № 3 (108). C. 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2
[11] Factor aposematic, affecting bitumen adhesion with mineral Urgam materials. S. Ivkin, V. V. Vasiliev, It Is. V. Salamatova and others. // Coke and chemistry. – 2022. – № 1. - S. 27-36. – DOI 10.52351/00232815_2022_01_27.
[12] Ryabinina, K. M. Investigation of the properties of asphalt concrete on bitumen modified with polymers / K. M. Ryabinina, G. V. Provatorova // Building materials and products. – 2022. – Vol. 5, No. 4. – pp. 19-29. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29.
[13] Rudskoy, A.I., Bashkarev, A.Y., Bessonova, V.Y. (2024). Application of the Thermofluctuation Theory of Strength to Calculate the Durability of Adhesive Joints in the Case of Granite-Bitumen Composites. In: Evgrafov, A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P.225-234 https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_22
[14] Hot asphalt mixture temperature control for adhesion strength improvement / A. Ya. Bashkarev, V. Yu. Bessonova, Yu. G. Lazarev, N. I. Panevin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2024. – No. 2(111). – P. 11103. – DOI 10.4123/CUBS.111.3.
[15] Rudskoy, A. I. Durability of polymer composite materials / A. I. Rudskoy, A. Ya. Bashkarev, L. V. Slavutin // Modern mechanical engineering. Science and education. - 2021. – No. 10. – pp. 675-689.

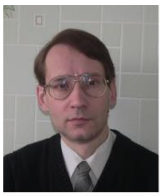
[16] Гохман, Л. М. В главной роли - асфальтен // Автомобильные дороги. – 2020. – № 8. – С. 121-128.
[17] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. Appl. Sci, 2019, №9, pp. 1–35.
[18] Sirota E. B. (2005). Physical structure of asphaltenes. Energy & fuels, 19(4), 1290-1296. https://doi.org/10.1021/ef049795b
[19] Per Redelius. Asphaltenes in Bitumen, What They Are and What They Are Not, Road Materials and Pavement Design. 2009. 10:sup1, 25-43, http://doi.org/ 10.1080/14680629.2009.9690234

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 681.2+67.02
doi:10.18720/SPBPU/2/id-155

А.Л. Буляница[1,2], Н.А. Есикова[2], А.А. Евстрапов[3]

БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОФЛЮИДНЫХ УСТРОЙСТВ



[1,2]Антон Леонидович Буляница,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6750, E-mail: bulyanitsa_al@spbstu.ru



[2]Надежда Александровна Есикова,
Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)363-0728, E-mail: elpis-san@yandex.ru.



[3]Анатолий Александрович Евстрапов,
Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)363-0719, E-mail: an_evs@mail.ru.

Аннотация

Рассмотрен метод быстрого прототипирования микрофлюидного полимерного чипа с субмиллиметровыми размерами сечения рабочих каналов. Принципиально важным условием являлся выбор недорогого метода создания микрочипа в условиях научно-исследовательской лаборатории на этапе проверки его работоспособности и предварительного подбора геометрии, как устройства в целом, так и его основных функциональных элементов. В работе использован метод «ксюрографии» (xurography), заключающийся в формировании структуры чипа в тонких пленках на режущем плоттере и последующем их соединении между собой с помощью адгезивных слоев. В результате была создана работоспособная конфигурация микрофлюидного устройства, обеспечивающая смешивание

двухкомпонентной пробы и перенос продукта реакции к зоне детектирования. Для модельного объекта по заданным характеристикам в приближении метода моментов были получены оценки дополнительного размывания концентрационного пика и подтверждено повышение эффективности перемешивания компонентов при использовании серпантинного микроканала. В Институте аналитического приборостроения РАН метод ксюрографии используется для оперативного прототипирования микрофлюидных устройств с рабочими каналами шириной свыше 300 мкм и глубиной от 100 мкм.

Ключевые слова: прототипирование, полимерный микрофлюидный чип, ксюрография, смешивание пробы, полимерная пленка, адгезивный слой

Введение

Микрофлюидика находит широкое применение в различных сферах, включая: проведение анализов биологических проб и проб окружающей среды; реализацию реакций микросинтеза химических веществ и лекарственных препаратов; создание систем, имитирующих функции живых организмов (орган-на-чипе) и множество других [1 – 4]. При разработке методик анализа, а также при изучении возможности реализации тех или иных стратегий исследования на микрочипе, одной из важных задач является производство небольших количеств микрофлюидных чипов для проверки работоспособности предложенных подходов и выбора приемлемого конструктива. Это определяет стоимость исследований, поскольку стоимость изготовления микрофлюидных чипов для небольшой серии (10…50 штук) зависит от применяемой технологии формирования микроструктур и герметизации.

Прямые методы (лазерные технологии и подобные) позволяют гибко менять конфигурацию чипов, однако требуется трудоемкий подбор режимов изготовления и сопутствующие работы, что приводит к нерентабельности изготовления на заказ единиц-десятков деталей. Работа на оборудовании для лазерных методов требует соответствующего помещения, квалифицированного персонала.

Все более широкое распространение в микрофлюидике находит 3D принтинг [5, 6], для печати как мастер-форм, так и самих чипов. Однако, с точки зрения пространственного разрешения для микрофлюидики подходят стереолитографические технологии, а свойства материалов, используемых при печати, необходимо дополнительно исследовать для каждой конкретной задачи.

Другим распространенным прямым методом получения микрофлюидных чипов с (суб)милиметровыми структурами является применение фрезера с ЧПУ. Однако, данный метод не позволяет получать

многоуровневые структуры и, все-таки, является дорогим для мелких серий изделий.

В непрямых методах формования микроструктур в полимерных материалах (экструзионное литье, импринтинг и др.) наиболее дорогостоящей является мастер-форма и соответствующая оснастка так что цена чипа напрямую зависит от их количества в серии/партии. Эти методы подходят для средне и крупносерийного производства, но не для мелких серий.

Таким образом, выбор метода быстрого и относительно дешевого прототипирования многоуровневых микрофлюидных чипов со структурами (суб)миллиметрового размера в условиях лаборатории и без дополнительного дорогостоящего оборудования является актуальной задачей.

Авторы [7] предложили использовать для быстрого прототипирования метод «ксюрографии» (xurography), заключающийся в прорезании структуры чипа в тонких пленках на режущем плоттере и последующем соединении их между собой с помощью адгезивных слоев. Метод нашел широкое распространение для создания многослойных микрофлюидных чипов из пластиков и резин, простых мастер-форм, оптических масок и электродов для микроустройств [8]. Размеры получаемых данным методом структур – от 75 мкм, определяются характеристиками режущего плоттера и используемого материала. При этом глубина канала или реакционной камеры создаваемого микрофлюидного чипа зависит только от толщины используемого полимера и адгезионного слоя.

Другие методы изготовления микроструктур из полимерных материалов для биологических и медицинских применений по-прежнему актуальны и активно развиваются, о чем свидетельствуют зарубежные и отечественные публикации последних лет [9 – 12].

Данная публикация является развитием работ коллектива авторов, посвященных созданию и совершенствованию технологий изготовления микрофлюидных устройств для биомедицинских исследований в условиях научно-исследовательской лаборатории. Полученные ранее результаты отражены в материалах конференций «Современное машиностроение: Наука и образование» прошлых лет [13, 14].

Методы

Был выбран метод ксюрографии с применением режущего плоттера Silhouette Cameo 4 (цена 35-40 тыс. руб.). Согласно публикациям, на подобном плоттере вырезали элементы для микроустройств из нитроцеллюлозной бумаги для блоттинга, силиконовой резины (размер минимального элемента 400 мкм) [15], бумаги [8].

В качестве материала микрофлюидного чипа использовался поликарбонат APC 810 (Китай) толщиной 125, 175, 250, 500 мкм. Одноуровневые (трехслойные) чипы проще всего герметизировать имеющимися в продаже пленками для проведения полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ), однако для получения многоуровневой структуры (четыре и более слоев) необходимо использовать двусторонний адгезив. В работе изучались варианты применения: клеепереносящих листов ORABOND 1377S (чистый акрилатный клей, аналог 200MP от 3M, толщиной 120 мкм) и клеепереносящие листы ORABOND 1375S (аналог 200MP от 3M толщиной 60 мкм). Применение более толстого адгезива приводит к его выдавливанию (затеканию) в структуры (каналы и реакционные камеры) чипа при склейке. Для качественного связывания слоев чипа применялся термопресс WT-QS90 фирмы Wtong (Китай). Все использованное оборудование и материалы легко доступны в России и относительно недорогие.

Результаты

Метод ксюрографии позволяет не только легко и быстро получать прототипы микрофлюидных чипов, но и интегрировать в них функциональные элементы. Для апробации метода была выбрана геометрия пятислойного чипа, приведенная на рисунке 1 и состоящая из следующих элементов: вход для реагентов, вход для образца с мембранным фильтром, смеситель/реактор, мембрана для сбора аналита или проведения реакции/фильтрации, выход. В зависимости от интегрированных мембран, такая топология позволяет решать разнообразные задачи, например, выделять ДНК/РНК из пробы и сорбировать их на мембране. В зависимости от задачи далее можно провести элюцию, либо же вырезать мембрану пробойником и поместить в пробирку для ПЦР-РВ анализа.

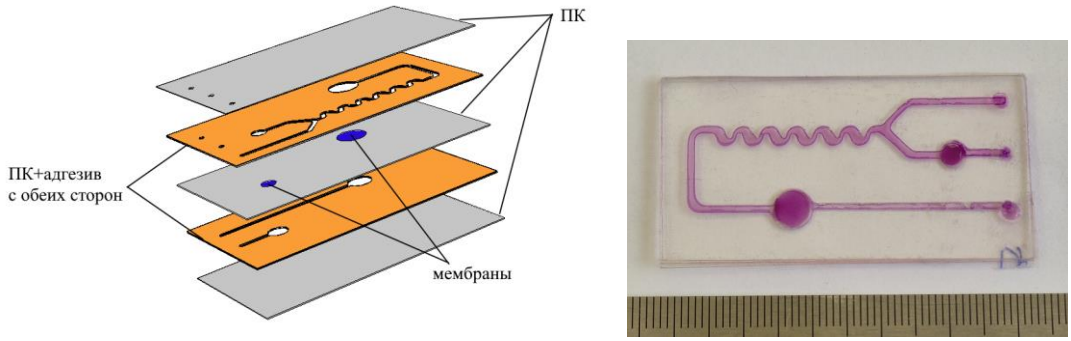


Рис. 1. Схема сборки и изображение чипа, полученного методом ксюрографии

На рисунке 1 (слева) приведена схема сборки чипа. Для минимизации площади контакта адгезива с пробой и реагентами, он наносился на листы поликарбоната (ПК) до вырезания структур. Слои, обозначенные серым цветом, имеют толщину 250 мкм, слои оранжевого цвета содержат с обеих сторон клеевой слой толщины 60 мкм. Для лучшей фиксации мембран диаметр камеры перед ними по ходу течения жидкости был примерно на 1 мм меньше, чем диаметр камеры за мембранами. Изображение образца полученного чипа, заполненного красителей, так же приведено на рисунке 1 (справа). Геометрические характеристики канала: ширина 1 мм, глубина 250 мкм.

Отметим, что в верхней части чипа имеется фрагмент серпантинного канала, содержащий несколько поворотов со средним радиусом кривизны 1 мм. Помимо реализованной возможности формирования канала большей длины на ограниченной площади пластины, изгибы канала позволяют провести дополнительное перемешивание двухкомпонентной пробы с повышением равномерности распределения ее компонент по микроканалу.

Поскольку средний радиус кривизны изгибов канала не очень мал (практически равен ширине канала), то дополнительный эффект перемешивания в сравнении с конвективно-диффузионным переносом вещества по прямолинейному каналу такой же длины будет не очень существенный. Однако, в разделе Расчетные оценки этот эффект на примере модельного объекта, имеющего коэффициент диффузии в водной среде буфера равный 10^{-9} м^2/с будет оценен по величине добавленной средней дисперсии концентрационного пика компоненты.

Расчетные оценки

Для оценок дисперсии будет применен классический метод моментов [15]. На его основе для больших диффузионных времен t массопереноса были получены оценки усредненной по ширине канала добавленной дисперсии концентрационного пика как для случая пуазейлевого конвективного параболического скоростного профиля [16], так и для случая движения вещества в поле вращений, что соответствует изгибному каналу [17, 18]. В обоих случаях использовано упрощающее положение о том, что микроканал представляет собой совокупность прямоугольных щелей равной ширины.

Были заданы следующие параметры расчетов: ширина канала w равна 1 мм, соответственно, его полуширина h – 0.5 мм. Средний радиус кривизны изгибающегося канала Rc равен 1 мм, общая длина микроканала 18.8 мм. Средняя скорость конвективного движения 0.1 мм/с. Т.о. время движения (загрузки) составит около 3 минут (188 с).

При расчетах скорости (максимальная и средняя) делятся на характерный масштаб длины, либо h, либо w; коэффициент диффузии делится, соответственно, на h^2 (либо w^2) и далее обозначается, как D_0. Коэффициент динамической вязкости считается равным 10^{-3} Па·с, что соответствует значению этой характеристики для воды при температурах близких к комнатным. Характеристическое число Пекле (Pe) определяется комбинацией конвективной скорости, масштабом длины и коэффициентом диффузии. Соответствующие значения применительно к прямолинейному каналу и каналу с изгибами при различном выборе конвективной скорости (максимальное либо среднее значение) используются в расчетных формулах.

Для прямолинейного канала средняя по сечению добавленная дисперсия пика определяется, как

$$< s_1^2 >= \left(2 + \frac{16}{945} Pe^2 \right) D_0 t - \frac{4}{1575} Pe^2 \qquad (1)$$

Подставив значение числа Пекле 75, получим добавленную дисперсию пика в единицах квадрата масштаба длины (h^2), что в размерных координатах дает 14.76 мм^2.

Для расчета добавленной дисперсии в поле вращений число Пекле рассчитывается не по максимальной, а по средней скорости, но в качестве масштаба длины берется не полуширина, а ширина канала. Т.о. в соответствующей расчетной формуле (2) значение числа Пекле будет 100.

$$< s_2^2 >= \left(2 + \frac{1}{15} \frac{w^2}{Rc^2} Pe^2 \right) D_0 t - \frac{17}{1860} \frac{w^2}{Rc^2} Pe^2 \qquad (2)$$

Аналогичный предыдущему варианту пересчет средней дополнительной дисперсии размывания концентрационного пика даст 34.64 мм^2, т.е. практически вдвое больше.

Очевидно, что увеличение дисперсии связано с большей равномерностью распределения компонент по каналу, а это, в свою очередь свидетельствует о повышении эффективности перемешивания.

Обсуждение

Разумеется, геометрические характеристики устройства и режимы массопереноса не подбирались с целью оптимизации данной конструкции, как смесителя, но рассмотренный эффект усиления размывания компонент представляет собой дополнительное сопутствующее преимущество, наряду

с возможностью размещения более длинного канала на ограниченной площади пластины.

Геометрические характеристики канала (ширина 1 мм, глубина 0.25 мм) в большей степени соответствуют субмиллиметровому, а не микронному диапазону размеров. Эти сечения микроканалов имеют достаточно малое гидравлическое сопротивление, в связи с чем, для обеспечения скоростей конвективного движения пробы даже не рассматриваемые 0.1 мм/с, а на порядок больших – 1 мм/с, потребуются достаточно малые градиенты давления при гидравлическом вводе и перемещении проб. Т.о., открываются возможности использования широкой номенклатуры насосов, и их выбор не будет существенным ограничением при проектировании микрофлюидной системы для биологического или иммунного анализа.

Как говорилось ранее, использованный метод ксюрографии оказался эффективным при прототипировании полимерных многослойных микрофлюидных чипов с конфигурацией, показанной на рисунке 1 (справа). Помимо конвективно-диффузионного переноса жидкой водоподобной пробы созданный микрофлюидный чип позволяет обеспечивать эффективное пассивное перемешивание двухфазных жидкостей, что расширяет круг его возможных аналитических применений.

Заключение

Ксюрографии является быстрым и недорогим методом прототипирования микрофлюидных устройств в лаборатории. Применение одной из самых популярных моделей режущих плоттеров (Silhouette Cameo 4) позволяет получать многослойные чипы из поликарбоната с толщиной слоя от 100 мкм до 250 мкм. Во время сборки чипа в него легко интегрировать разнообразные функциональные элементы, например, мембраны для различного применения. Следует подчеркнуть, что для создания рабочего прототипа микрофлюидного чипа с использованием описанной технологии требуется минимальное и вполне доступное в России оборудование, а именно: плоттер Silhouette Cameo 4. и термопресс WT-QS90 фирмы Wtong, оба производства Китая.

Использование ксюрографии относится к актуальным быстроразвивающимся методам прототипирования. Однако, даже в библиометрической базе данных Elibrary все авторы публикаций имеют зарубежные аффилиации. При этом, поисковое задание по слову «xurography» позволяет выделить 56 публикаций (на 21.04.2025 г.), из

которых только 2 опубликованы до 2013 года, около половины (26) относятся к 2022-24 гг.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00444-25-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Марченкова М.А., Чапек С.В., Муханова Е.А., Солдатов А.В., Ковальчук М.В. Микрофлюидные процессы как элемент природоподобных технологий. Российские нанотехнологии. 2024, 19(3), С. 386-389.

[2] На А.С. Microfluidic method as a promising technique for synthesizing antimicrobial compounds, Fine Chemical Technologies, 2021, 16(6), pp. 465-475.

[3] Шубина М.А. Технология формирования полимерных микрофлюидных систем для исследования клеточных структур. Наука настоящего и будущего. 2024, 2, С. 261-264.

[4] Мыльникова А.Н., Ощепков М.С., Соловьева И.Н., Московцев А.А., Колесов Д.В. Применение микрофлюидных технологий в современной биотехнологии, Химическая промышленность сегодня, 2023, 6, С. 2-8.

[5] Duarte, L.C., Figueredo, F., Chagas, C.L.S. et al. A review of the recent achievements and future trends on 3D printed microfluidic devices for bioanalytical applications, Analytica Chimica Acta, 2024, 1299. p. 342429.

[6] Saha, R., Sarkar, M., Choudhury, S.S., et al. Evolution of 3d printing technology in fabrication of microfluidic devices and biological applications: a comprehensive review, Journal of Micromanufacturing, 2024, 7(1), pp. 110-140.

[7] Bartholomeusz, D.A., Boutté, R.W., Andrade, J.D. Xurography: rapid prototyping of microstructures using a cutting plotter. Journal of Microelectromechanical systems, 2005, 14 (6), pp. 1364-1374.

[8] Shahriari, S., Patel, V., Selvaganapathy, P.R. Xurography as a tool for fabrication of microfluidic devices, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2023, 33 (8), p. 083002.

[9] Pattanayak, P., Singh, S.K., Gulati, M. et al. Microfluidic chips: recent advances, critical strategies in design, applications and future perspectives. Microfluid Nanofluid**,** 2021, 25, Num. 99.

[10] Якимов А.С., Пряжников А.И., Пряжников М.И., Минаков А.В. Изготовление микрофлюидных чипов из полидиметилсилоксана с фрезерованной канализированной поверхностью для моделирования нефтеотдачи при заводнении пористой породы. Записки Горного института. 2022, 253, С. 105-114.

[11] Kim, Jy, O'Hare, D. Monolithic nano-porous polymer in microfluidic channels for lab-chip liquid chromatography. Nano Convergence, 2018, 5**,** Num. 19**.**
[12] Liu, X., Sun, A., Brodský, J. et al. Microfluidics chips fabrication techniques comparison. Sci Rep, 2024, 14, Num 28793.
[13] Bulyanitsa, A.L., Esikova, N.A., Evstrapov, A.A. Automated Device for Surface Modification and Synthesis of Functional Layers in Microfluidic Chips. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 115-122.
[14] Буляница А.Л., Есикова Н.А., Евстрапов А.А. Многоканальная система подготовки микрофлюидных чипов для ПЦР-анализа. Современное машиностроение: Наука и образование. 2024. С. 365-376.
[15] Aris, R. On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube. Proc Roy Soc Lond A, 1956, 235, pp. 67–77.
[16] Буляница А.Л. Математическое моделирование в микрофлюидике: основные положения, Научное приборостроение, 2005, 15(2), С. 51-66.
[17] Nagai, M., Tada, K., Shibata, T. Rapid prototyping of PDMS microchannels for animal and plant cells using cutting plotter and double casting, Mechanical Engineering Letters, 2018, 4, pp. 18-00377-18-00377.
[18] Wang, J., Lin, Q., Mukherjee, T. Analytical dispersion model for efficient simulation of complex electrophoresis systems, Proceeding of 7th Int. Conferences on Miniaturized Chemical and Biochemical Systems, MicroTAS'03, 2003, Squaw Valley, USA, pp. 135-138.

A.L. Bulyanitsa[1,2], N.A. Esikova[2], A.A. Evstrapov[2]

RAPID PROTOTYPING OF MULTILAYER POLYMER MICROFLUIDIC DEVICES

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

Abstract

A method of rapid prototyping of a microfluidic polymer chip with submillimeter cross-sectional dimensions of working channels is considered. A fundamentally important condition was the choice of an inexpensive method for creating a microchip in a research laboratory at the stage of checking its operability and pre-selecting the geometry of both the device as a whole and its main functional elements. The paper discusses the method of "xurography", which consists in forming the chip structure in thin films on a cutting plotter and

then connecting them to each other using adhesive layers. As a result, a workable configuration of the microfluidic device was created, which ensures mixing of the two-component sample and transfer of the reaction product to the detection zone. For the model object, estimates of additional dilution of the concentration peak were obtained based on the specified characteristics in the approximation of the method of moments and an increase in the mixing efficiency of components using a serpentine microchannel was confirmed. At the Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, the xyrography method is used for operational prototyping of microfluidic devices with working channels over 300 microns wide and 100 microns deep.

Key words: prototyping, polymer microfluidic chip, xyrography, sample mixing, polymer film, adhesive layer

REFERENCES

[1] Marchenkova, M.A., Chapek, S.V., Mukhanova, E.A., Soldatov, A.V., Kovalchuk, M.V. Microfluidic processes as an element of nature-like technologies. Russian nanotechnology, 2024, 19(3), pp. 386-389.

[2] Ha A.C. Microfluidic method as a promising technique for synthesizing antimicrobial compounds, Fine Chemical Technologies, 2021, 16(6), pp. 465-475.

[3] Shubina, M.A. Technology of polymer microfluidic systems formation for the study of cellular structures, The science of the present and the future, 2024, 2, pp. 261-264.

[4] Mylnikova, A.N., Oshchepkov, M.S., Solovyova, I.N., Moskovtsev, A.A., Kolesov, D.V. Application of microfluidic technologies in modern biotechnology, Chemical industry today, 2023, 6, pp. 2-8.

[5] Duarte, L.C., Figueredo, F., Chagas, C.L.S. et al. A review of the recent achievements and future trends on 3D printed microfluidic devices for bioanalytical applications, Analytica Chimica Acta, 2024, 1299. p. 342429.

[6] Saha, R., Sarkar, M., Choudhury, S.S., et al. Evolution of 3d printing technology in fabrication of microfluidic devices and biological applications: a comprehensive review, Journal of Micromanufacturing, 2024, 7(1), pp. 110-140.

[7] Bartholomeusz, D.A., Boutté, R.W., Andrade, J.D. Xurography: rapid prototyping of microstructures using a cutting plotter. Journal of Microelectromechanical systems, 2005, 14 (6), pp. 1364-1374.

[8] Shahriari, S., Patel, V., Selvaganapathy, P.R. Xurography as a tool for fabrication of microfluidic devices, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2023, 33 (8), p. 083002.

[9] Pattanayak, P., Singh, S.K., Gulati, M. et al. Microfluidic chips: recent advances, critical strategies in design, applications and future perspectives. Microfluid Nanofluid**,** 2021, 25, Num. 99.
[10] Yakimov, A.S., Pryazhikov, A.I., Pryazhikov, M.I., Minakov, A.V. Production of microfluidic chips from polydimethylsiloxane with a milled channeled surface for modeling oil recovery during porous rock waterflooding. Journal of Mining Institute, 2022, 253, pp. 105-114.
[11] Kim, Jy, O'Hare, D. Monolithic nano-porous polymer in microfluidic channels for lab-chip liquid chromatography. Nano Convergence, 2018, 5**,** Num. 19**.**
[12] Liu, X., Sun, A., Brodský, J. et al. Microfluidics chips fabrication techniques comparison. Sci Rep, 2024, 14, Num 28793.
[13] Bulyanitsa, A.L., Esikova, N.A., Evstrapov, A.A. Automated Device for Surface Modification and Synthesis of Functional Layers in Microfluidic Chips. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 115-122.
[14] Bulyanitsa, A.L., Esikova, N.A., Evstrapov, A.A. Multichannel microfluidic chip preparation system for PCR analysis, Modern Mechanical engineering: Science and Education, 2024. pp. 365-376.
[15] Aris, R. On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube. Proc Roy Soc Lond A, 1956, 235, pp. 67–77.
[16] Bulyanitsa, A.L. Mathematical modeling in microfluidics: the basic concept, Scientific Instrumentation, 2005, 15(2), pp. 51-66.
[17] Nagai, M., Tada, K., Shibata, T. Rapid prototyping of PDMS microchannels for animal and plant cells using cutting plotter and double casting, Mechanical Engineering Letters, 2018, 4, pp. 18-00377-18-00377.
[18] Wang, J., Lin, Q., Mukherjee, T. Analytical dispersion model for efficient simulation of complex electrophoresis systems, Proceeding of 7th Int. Conferences on Miniaturized Chemical and Biochemical Systems, MicroTAS'03, 2003, Squaw Valley, USA, pp. 135-138.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 669.295
doi:10.18720/SPBPU/2/id-156

Ю.Б. Егорова[1], Л.В. Давыденко[2], С.Б. Белова[3], Е.Н. Егоров[4]

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ОТОЖЖЕННЫХ ПРУТКОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С РАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ



[1]Юлия Борисовна Егорова,
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (917)556-8258, e-mail: egorova_mati@mail.ru



[2]Людмила Васильевна Давыденко
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Тел.: (926)116-7666, e-mail: mami-davidenko@mail.ru



[3]Светлана Борисовна Белова
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (910)453-4825, e-mail: belovamai@gmail.com



[4]Евгений Николаевич Егоров
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (917)556-8258, e-mail: aravir_ene@mail.ru

Аннотация

Проведено статистическое сопоставление ударной вязкости катаных прутков диаметром 15-150 мм из сплава ВТ6 с различной структурой после отжига. Показано, что при одинаковом химическом составе прутки с пластинчатой структурой имеют в среднем более высокие значения ударной вязкости по сравнению с глобулярной структурой. Свойства образцов со

смешанной (глобулярно-пластинчатой), переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.

Ключевые слова: титановые сплавы, эквиваленты по алюминию и молибдену, структура, предел прочности, ударная вязкость, статистические исследования, прогнозирование свойств.

Введение

Способность титановых сплавов сопротивляться разрушению можно оценить по результатам испытаний на вязкость разрушения, ударную вязкость образцов с надрезом и трещиной, на циклическую выносливость, замедленное разрушение, коррозионное растрескивание. Трещиностойкость титановых сплавов по результатам этих испытаний оценивают различными критериями, которые позволяют судить о работоспособности конструкций и деталей в различных условиях эксплуатации [1-3].

Наиболее широкое распространение получили испытания на ударный изгиб, так как они моделируют значительную концентрацию напряжений в вершине надреза и градиент напряжений за счет изгиба, что часто встречается в процессе эксплуатации сложных конструкций. В РФ ударная вязкость является обязательной характеристикой, которая регламентируется различной нормативной документацией (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.п.) на полуфабрикаты из титановых сплавов наряду с другими стандартными механическими свойствами (пределом прочности, относительным удлинением, поперечным сужением).

Следует иметь в виду, что механические свойства и способность титановых сплавов сопротивляться разрушению существенно зависит от химического состава, а также типа и параметров микроструктуры [1-16]. Для равноосных (глобулярных) структур характерны высокие кратковременные прочностные свойства, максимальная пластичность при пониженных значениях вязкости разрушения и характеристик жаропрочности, повышенной скорости роста трещин. Пластинчатые структуры обеспечивают высокую вязкость разрушения, характеристики жаропрочности и сопротивления развитию трещин при пониженных значениях сопротивления усталости, прочности и особенно пластичности.

Обзор литературных данных показал, что влияние типа структуры на ударную вязкость носит неоднозначный характер. По данным монографии [5] глобулярная структура в большинстве случаев обеспечивает более высокую ударную вязкость по сравнению с пластинчатой при испытаниях на динамический изгиб образцов «Менаже» с радиусом надреза 1,0 мм. В работах [6-11] сделан противоположный вывод. Сравнение вязкости разрушения, ударной вязкости и работы распространения трещины в

условиях динамического изгиба образцов из различных сплавов свидетельствует о преимуществе β-превращенной пластинчатой структуры перед мелкозернистой структурой глобулярного типа. Это объясняют тем, что пластинчатая структура обеспечивает более извилистый и более энергоемкий путь трещины, чем равновесная α-фаза в β-структуре.

Цель работы состояла в установлении статистических закономерностей совместного влияния химического состава, структуры и предела прочности на ударную вязкость отожженных прутков из титанового сплава ВТ6.

Методы

Объектами исследования послужили катаные прутки промышленного производства диаметром 15-155 мм из сплава ВТ6 (69 плавок) с разной структурой, которая была получена путем изменения режимов деформации и термической обработки. Прокатку проводили в разных температурных областях – ниже и выше температуры полиморфного превращения. Прутки были подвергнуты следующим видам отжига: простой отжиг (600-920 °С, 20-180 мин., охлаждение на воздухе или с печью), двойной (900-960 °С, 20-60 мин., воздух, 450-730 °С, 60-360 мин., охлаждение на воздухе), изотермический (850-1000 °С, 30-120 мин., охлаждение в печи до 500-750 °С, выдержка до 2 ч., охлаждение на воздухе).

Степень легирования сплавов оценивали с помощью структурных эквивалентов по алюминию и молибдену (% по массе) [1]:

$$[\mathrm{Al}]_{\text{экв}}^{\text{стр}} = \mathrm{Al} + 0{,}33\mathrm{Sn} + 0{,}17\mathrm{Zr} + 10[\mathrm{O} + \mathrm{C} + 2\mathrm{N}], \quad (1)$$

$$[\mathrm{Mo}]_{\text{экв}}^{\text{стр}} = \mathrm{Mo} + 0{,}7\mathrm{V} + 1{,}7\mathrm{Cr} + 1{,}7\mathrm{Mn} + 2{,}5\mathrm{Fe}, \quad (2)$$

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS ImageExpert Pro3.6. Все наблюдаемые структуры прутков были условно разделены на 5 типов: 1 – глобулярная (равноосная), 2 – переходная (с вытянутой формой зерен α-фазы), 3 – смешанная (глобулярная + пластинчатая), 4 – корзинчатого строения, 5 – пластинчатая.

Механические испытания на растяжение и ударную вязкость проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9454-78. Статистический анализ был проведен с помощью ППП «STATISTICA» [17]. Исследованные факторы: структурные эквиваленты по алюминию и молибдену, предел прочности, ударная вязкость KCU, тип и параметры микроструктуры (толщина пластин первичной b_α и вторичной b_2 α-фазы, размер α-глобулей a_α), диаметр прутка.

Результаты и их обсуждение

Пластинчатые структуры формируются в том случае, когда деформация начинается и заканчивается при температурах β-области, т.е. выше температуры полиморфного превращения. Пластинчатая структура представлена β-зернами, по границам которых может быть расположена оторочка из α-фазы. Внутреннее строение зерен состоит из пластин α-фазы и прослоек из β-фазы (или из смеси α- и β-фаз). Пластины α-фазы могут быть образовывать α-колонии с одинаковой ориентацией α-пластин. Основными параметрами пластинчатой структуры являются размер β-зерен и α-колоний, а также толщина α-пластин b_α.

Глобулярная (равноосная) и переходная структура были сформированы деформацией при температурах α+β-области, т.е. ниже температуры полиморфного превращения. Глобулярная структура характеризуется частицами α-фазы, форма которых близка к сферической или немного вытянутой. Между частицами расположена прослойка β-фазы (или смесь α- и β-фаз). Переходная структура характеризуется наличием изогнутых α-пластин и удлиненных α-зерен. Основным параметром глобулярной структуры является толщина (диаметр) α-фазы a_α, а переходной - толщина α-зерен (пластин) b_α.

В смешанной (глобулярно-пластинчатой) структуре первичные α-зерна сохраняют форму, близкую к глобулярной, а вторичная α-фаза имеет пластинчатое строение. Основными параметрами смешанной структуры являются диаметр (толщина) частиц первичной α-фазы a_α и толщина пластин вторичной α-фазы b_2.

В таблице 1 приведены параметры микроструктуры разного типа, предел прочности и ударная вязкость катаных прутков сплава ВТ6. Общий разброс предела прочности составляет 320 МПа, ударной вязкости – 1,0 МДж/м^2. Это обусловлено влиянием структурного фактора, диаметра прутка, колебаниями химического состава, режимами деформации и термической обработки и т.п. Абсолютный разброс химического состава в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену составляет 2,5% (масс.) и 1,6 % (масс.) соответственно. В результате суммарный статистический разброс (ширина трехсигмового интервала) достигает $[Al]_{экв}^{стр} + [Mo]_{экв}^{стр}$=4,0 % (масс.).

На рис. 1 сопоставлены зависимости механических свойств прутков из сплава ВТ6 с разной структурой от суммы структурных эквивалентов по алюминию и молибдену после простого отжига. При одинаковых эквивалентах прутки с глобулярной структурой имеют в среднем более высокие значения предела прочности (на ~60-100 МПа) по сравнению с пластинчатой структурой. Для ударной вязкости наблюдается обратная зависимость: KCU образцов с пластинчатой структурой в среднем выше,

чем с глобулярной на ~0,2÷0,25 МДж/м^2. Свойства образцов со смешанной, переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.

Таблица 1. Механические свойства отожженных* прутков диаметром 15-155 мм сплава ВТ6 в зависимости от типа структуры
(в числителе диапазон, в знаменателе – среднее)

Тип структуры	**Число и доля образцов**	**Диаметр прутка, мм**	$[Al]^{стр}_{экв}$ **%**	$[Mo]^{стр}_{экв}$ **%**	**$\sigma_в$, МПа**	**KCU, МДж/м^2**
1 (глобулярная) a_α = 2,1-9,3 мкм	103 (30%)	15-90	7,3-9,2 8,6	3,0-4,1 3,3	929-1076 1013	0,31-0,92 0,49
2 (переходная) b_α = 1,3-5,5 мкм	85 (25%)	18-155	7,1-9,6 8,5	2,9-4,4 3,4	816-1100 975	0,34-1,31 0,56
3 (смешанная) a_α = 2,9-9,5 мкм b_2 = 1,0-4,1 мкм	97 (28%)	16-90	7,1-9,2 8,2	2,8-3,9 3,3	788-1109 970	0,33-1,24 0,58
4 (корзинчатая) b_α = 1,7-3,6 мкм	14 (4%)	28-140	7,2-9,1 8,4	3,0-3,6 3,3	897-1053 991	0,47-0,78 0,67
5 (пластинчатая) b_α = 2,0-5,5 мкм	45 (13%)	20-155	7,2-9,3 8,1	2,9-4,4 3,3	818-1050 896	0,49-1,14 0,8
1-5	344 (100%)	16-155	7,1-9,6 8,4	2,8-4,4 3,3	788-1109 976	0,31-1,31 0,57
ОСТ1 90173-75		10-60	-	-	900-1050	≥0,4
ОСТ1 90266-86		65-100	-	-	900-1050	≥0,3
ОСТ1 90266-86		от 110	-	-	835-1050	≥0,3

Примечание: * - все виды отжига.

Ориентировочную оценку ударной вязкости прутков из сплава ВТ6 с разной структурой можно провести по соотношению:

$$KCU = a_0 - (0{,}0015 \pm 0{,}0005)\sigma_в, \qquad (3)$$

где a_0 - свободный член, который изменяется от 2,0 до 2,25 МДж/м^2 в зависимости от типа структуры (табл. 2). Значения свободного члена для глобулярной, смешанной и переходной структуры различаются незначительно. Для структуры «корзинчатого» типа не удалось получить адекватную модель, что связано с недостаточным объемом выборки.

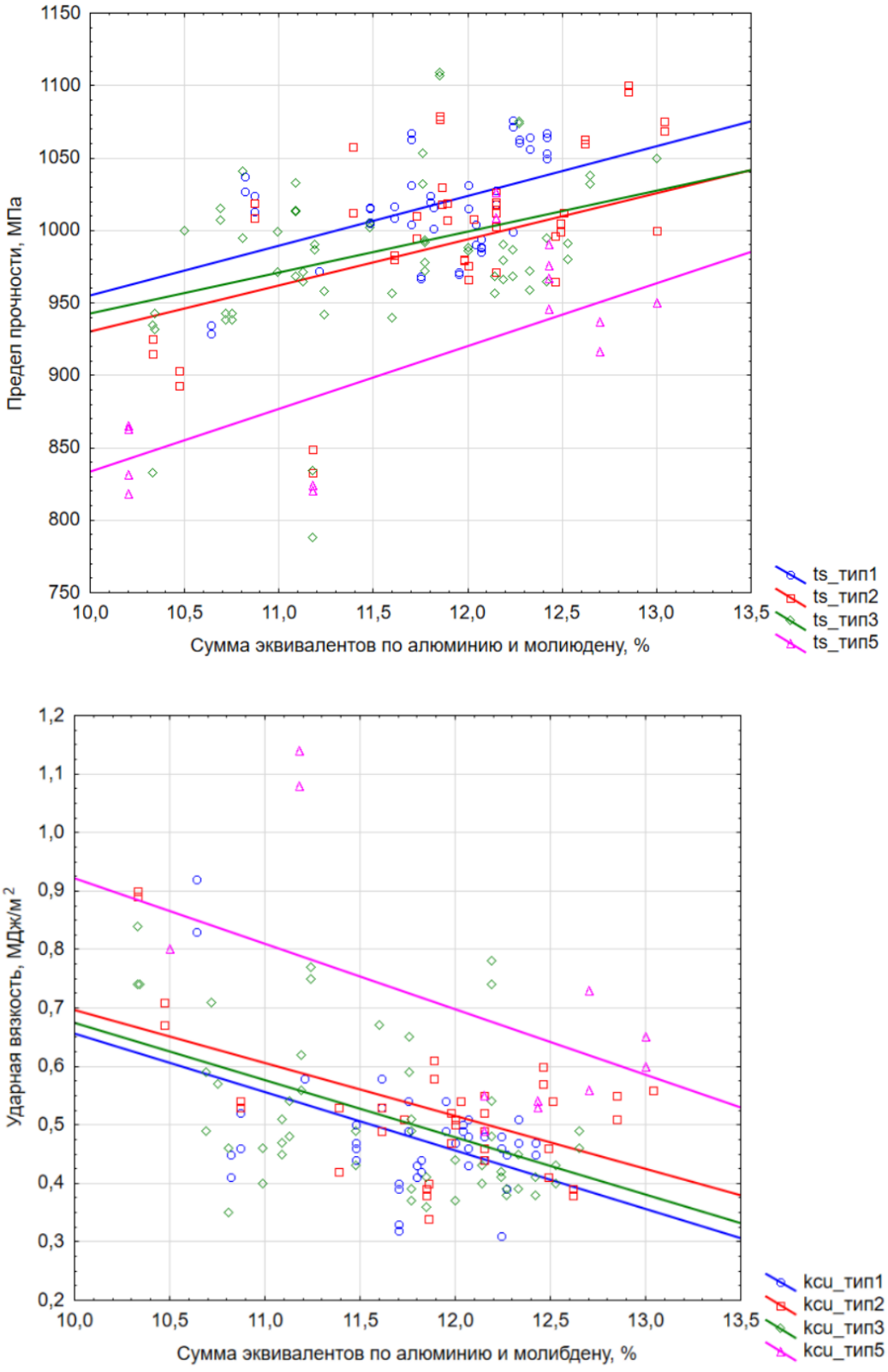


Рис. 1. Зависимость предела прочности и ударной вязкости прутков Ø 15-60 мм сплава ВТ6 от суммы эквивалентов по алюминию и молибдену (простой отжиг). Тип структуры: 1 – глобулярная, 2 – переходная, 3 – смешанная, 5 – пластинчатая.

Таблица 2. Значения свободного члена a_0 из соотношения (3) в зависимости от типа структуры

№	Тип структуры	a_0, МДж/м^2	R
1	Глобулярная	2,00 ±0,01	-0,65
2	Переходная	2,05 ± 0,02	-0,68
3	Смешанная (глобулярно-пластинчатая)	2,02 ± 0,02	-0,63
4	Корзинчатая	-	-0,35
5	Пластинчатая	2,25 ±0,03	-0,74

Для всех типов структуры следует отметить довольно большой разброс механических свойств, что в первую очередь обусловлено влиянием параметров структуры [18, 19]. С увеличением размеров пластин и глобулярных частиц α-фазы наблюдается снижение предела прочности и рост ударной вязкости. Проведенный анализ показал, что если размер глобулей менее 5,0-6,0 мкм, а сумма эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе), то прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую требованиям ОСТ.

Для прутков диаметром 15-60 мм с пластинчатой структурой KCU удовлетворяет требованиям ОСТ при всех значениях эквивалентов по алюминию и молибдену в отличие от остальных типов структуры. Вместе с тем, предел прочности прутков с пластинчатой структурой и суммой эквивалентов менее 11,5 % (по массе) лежит ниже регламентируемых значений (900 МПа).

Проведенные исследования показали, что один и тот же уровень предела прочности и ударной вязкости можно достичь для любого типа структуры, варьируя химический состав и параметры структуры. Однако считается, что для обеспечения требуемого уровня различных механических свойств полуфабрикатов целесообразно формирование бимодальной (глобулярно-пластинчатой) структуры, состоящей из равноосных частиц первичной α-фазы и пластинчатой составляющей [11, 13, 20, 21]. Наиболее благоприятное сочетание всех свойств наблюдается, если количество первичной α-фазы соответствует 7-30 % [20]. Оценить этот вывод в настоящей работе не удалось, так как в исследованных прутках количество глобулярных частиц первичной α-фазы превышало 30%.

Сложность выбора оптимальной структуры полуфабрикатов из титановых сплавов связана с неоднозначностью ее влияния на различные свойства. Поэтому требования к комплексу всех служебных характеристик устанавливаются с учетом назначения полуфабрикатов для обеспечения максимального уровня именно тех показателей, которые определяют работоспособность деталей в процессе эксплуатации [5].

Заключение

1. Показано, что с увеличением степени легирования наблюдается увеличение предела прочности и снижение ударной вязкости прутков из сплава ВТ6 для всех типов структуры.
2. При одинаковом химическом составе отожженные прутки из сплава ВТ6 с глобулярной структурой имеют более высокие значения предела прочности по сравнению с пластинчатой структурой. Для ударной вязкости наблюдается обратная зависимость. Свойства образцов со смешанной, переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.
3. Предложено соотношение для ориентировочной оценки ударной вязкости отожженных прутков из сплава ВТ6 в зависимости от уровня прочности и типа структуры.
4. Установлено, что при размере глобулей менее 5,0-6,0 мкм и сумме эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе) прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую нормативным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС – МАТИ. 2009. 520 с.
[2] Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия. 1983. 160 с.
[3] Дроздовский Б.А., Прохорцева Л.В., Новосильцева Н.И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия. 1983. 192 с.
[4] Chandan Kumar, Sanjay Kumar; Ajay Kumar. Microstructure Properties Of (A+B) Titanium Alloys: A Review. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), Volume 11, Issue 12, December 2020.
[5] Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров П.П. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: ВИЛС. 1996. 581 с.
[6] Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч. Авиационные материалы и технологии. 2020. №4, с. 12-18.
[7] Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Наприенко С.А. Исследование влияния режимов термической обработки в β-области на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22М. Труды ВИАМ, 2023, №8, с.25-34.

[8] Саркеева А.А., Лутфулин Р.Я., Круглов А.А., Астанин В.В. Влияние структуры на механическое поведение титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении. Письма о материалах, 2012. Т.2, с. 99-102.
[9] Lei Lei, Yongqing Zhao, Qinyang Zhao, Cong Wu, Shixing Huang, Weiju Jia, Weidong Zeng. Impact toughness and deformation modes of Ti–6Al–4V alloy with different microstructures. Materials Science and Engineering: A, Volume 801, 13 January 2021, P. 140411 https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140411
[10] Yoji Mine, Shunsuke Katashima, Rengen Ding, Paul Bowen, Kazuki Takshima. Fatigue crack growth behaviour in single-colony lamellar structure of Ti–6Al–4. Scripta Materialia, Volume 165, May 2019, P. 107-111. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.02.029
[11] Junqiang Ren, Qi Wang, Binbin Zhang, Dan Yang, Xuefeng Lu, Xiaobo Zhang, Xudong Zhang, Jingyu Hu. Influence of microstructure on fatigue crack growth behavior of Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo alloy: Bimodal vs. lamellar structures. Intermetallics, Volume 130, March 2021, P. 107058. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107058
[12] Xiaohui Shi, Weidong Zeng, Yu Sun, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, Ping Guo. Microstructure-Tensile Properties Correlation for the Ti-6Al-4V Titanium Alloy. JMEPEG (2015) 24:1754–1762 .
[13] Yan Chong, Guanyu Deng , Si Gao , Jangho Yi , Akinobu Shibata , Nobuhiro Tsuji. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures. Scripta Materialia, 2019, V. 172, November, pp. 77-82.
[14] Daeho Jeong, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Sangshik Kim. High cycle fatigue and fatigue crackpropagation behaviors of β-annealed Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Mechanical and Material Engeneearing, 2017, 12:1. DOI 10.1186/s40712-016-0069-8
[15] Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S.Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti–6Al–4V alloy based on an artificial neural network. Materials Science and Engineering: A, 2011, V. 528, Issues 29–30, 15 November, pp. 8757-8764.
[16] R.K. Nallf, B.L. Boyce, J.P. Campbell, J.O. Peters, R.O. Ritchie. Influence of Microstructure on High-Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. Lamellar Structures. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, v. 37A, Marth, pp. 559-566.
[17] Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. М.: Финансы и статистика. 2006. 368 с.
[18] Egorova Yu.B., Uvarov V.N., Davydenko L.V., Davydenko R.A. Use of Industrial Monitoring Results for Predicting Mechanical Properties of

Titanium Alloy Semiproducts. Metal Science and Heat Treatment. 2017. V. 59. №5-6. P. 377-383.
[19] Yu. B. Egorova, S. V. Skvortsova, L. V. Davydenko, O. N. Gvozdeva Statistical comparison of mechanical properties of VT6 alloy bars with different structures // Metallurgist, Vol. 66, Nos. 7-8, November, 2022, p. 922-933. DOI 10.1007/s11015-022-01404-0
[20] Брун М.Я., Шаханова Г.В. О структуре титановых сплавов и параметрах, определяющих ее многообразие. Технология металлов, 2009, №4, с. 41-47.
[21] Yan Chong, Tilak Bhattacharjee, Nobuhiro Tsuji. Bi-lamellar microstructure in Ti–6Al–4V: Microstructure evolution and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, Volume 762, 5 August 2019, P. 138077. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138077

Yu.B.Egorova[1], L.V.Davydenko[2], S.B.Belova[3], E.N.Egorov[4]

STUDY OF IMPACT TIGHTNESS OF ANNEALED RODS OF VT6 TITANIUM ALLOY WITH DIFFERENT STRUCTURES

[1,3,4] Moscow Aviation Institute, Russia;
[2]Moscow Polytechnic University, Russia.

Abstract

A statistical comparison of the impact toughness of rolled rods of 15-150 mm diameter made of VT6 alloy with different structures after annealing was carried out. It was shown that with the same chemical composition, rods with a lamellar structure have, on average, higher impact toughness values compared to those with a globular structure. The properties of samples with mixed (globular-lamellar), transitional and basket structures lie between the globular and lamellar structures.

Key words: titanium alloys, aluminum and molybdenum equivalents, structure, tensile strength, impact toughness, statistical studies, property prediction.

REFERENCES

[1] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Moscow: VILS – MATI. 2009. 520 p. (rus)
[2] Kolachev B.A., Malkov A.V. Physical principles of titanium destruction. Moscow: Metallurgy. 1983. 160 p. (rus)
[3] Drozdovsky B.A., Prokhortseva L.V., Novosiltseva N.I. Crack resistance of titanium alloys. Moscow: Metallurgy. 1983. 192 p. (rus)

[4] Chandan Kumar;Sanjay Kumar; Ajay Kumar . Microstructure Properties Of (α+β) Titanium Alloys: A Review. International Journal Of Advanced Research In Engineering And Technology (IJARET), Volume 11, Issue 12, December 2020
[5] Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Belozerov P.P. et al. Semi-finished products from titanium alloys. Moscow: VILS. 1996. 581 p. (rus)
[6] Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of titanium alloy VT6ch. Aviation materials and technologies. 2020. No. 4, pp. 12-18. (rus)
[7] Krokhina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Naprienko S.A. Study of the influence of heat treatment modes in the β-region on the structure and mechanical properties of semi-finished products made of VT22M alloy. Proceedings of VIAM, 2023, No. 8, pp. 25-34. (rus)
[8] Sarkeeva A.A., Lutfulin R.Ya., Kruglov A.A., Astanin V.V. Influence of structure on the mechanical behavior of titanium alloy VT6 under impact loading. Letters on materials, 2012. Vol.2, pp. 99-102. (rus)
[9] Lei Lei, Yongqing Zhao, Qinyang Zhao, Cong Wu, Shixing Huang, Weiju Jia, Weidong Zeng. Impact toughness and deformation modes of Ti–6Al–4V alloy with different microstructures. Materials Science and Engineering: A, Volume 801, 13 January 2021, P. 140411 https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140411
[10] Yoji Mine, Shunsuke Katashima, Rengen Ding, Paul Bowen, Kazuki Takshima. Fatigue crack growth behaviour in single-colony lamellar structure of Ti–6Al–4. Scripta Materialia, Volume 165, May 2019, P. 107-111. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.02.029
[11] Junqiang Ren, Qi Wang, Binbin Zhang, Dan Yang, Xuefeng Lu, Xiaobo Zhang, Xudong Zhang, Jingyu Hu. Influence of microstructure on fatigue crack growth behavior of Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo alloy: Bimodal vs. lamellar structures. Intermetallics, Volume 130, March 2021, P. 107058. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107058
[12] Xiaohui Shi, Weidong Zeng, Yu Sun, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, Ping Guo. Microstructure-Tensile Properties Correlation for the Ti-6Al-4V Titanium Alloy. JMEPEG (2015) 24:1754–1762 .
[13] Yan Chong, Guanyu Deng , Si Gao , Jangho Yi , Akinobu Shibata , Nobuhiro Tsuji. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures. Scripta Materialia, 2019, V. 172, November, pp. 77-82.
[14] Daeho Jeong, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Sangshik Kim. High cycle fatigue and fatigue crackpropagation behaviors of β-annealed Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Mechanical and Material Engeneearing, 2017, 12:1. DOI 10.1186/s40712-016-0069-8

[15] Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S.Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti–6Al–4V alloy based on an artificial neural network. Materials Science and Engineering: A, 2011, V. 528, Issues 29–30, 15 November, pp. 8757-8764.
[16] R.K. Nallf, B.L. Boyce, J.P. Campbell, J.O. Peters, R.O. Ritchie. Influence of Microstructure on High-Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. Lamellar Structures. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, v. 37A, Marth, pp. 559-566.
[17] Borovikov V.P., Ivchenko G.I. Forecasting in the Statistica system in the Windows environment. Fundamentals of theory and intensive practice on a computer. Moscow: Finance and statistics. 2006. 368 p. (rus)
[18] Egorova Yu.B., Uvarov V.N., Davydenko L.V., Davydenko R.A. Use of Industrial Monitoring Results for Predicting Mechanical Properties of Titanium Alloy Semiproducts. Metal Science and Heat Treatment. 2017. V. 59. №5-6. P. 377-383.
[19] Yu. B. Egorova, S. V. Skvortsova, L. V. Davydenko, O. N. Gvozdeva Statistical comparison of mechanical properties of VT6 alloy bars with different structures // Metallurgist, Vol. 66, Nos. 7-8, November, 2022, p. 922-933. DOI 10.1007/s11015-022-01404-0
[20] Brun M.Ya., Shakhanova G.V. On the structure of titanium alloys and the parameters that determine its diversity. Metal Technology, 2009, No. 4, pp. 41-47. (rus)
[21] Yan Chong, Tilak Bhattacharjee, Nobuhiro Tsuji. Bi-lamellar microstructure in Ti–6Al–4V: Microstructure evolution and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, Volume 762, 5 August 2019, P. 138077. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138077

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.744; 621.642.07; 678.067.5; 658.512.22
doi:10.18720/SPBPU/2/id-157

А.Ю. Кутьин[1], Л.В. Щербакова[2], В.М. Мусалимов[3]

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ



[1]Алексей Юрьевич Кутьин,
Балтийский государственный технический университет («Военмех»)
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 89006280893, E-mail: kutin_aiu@voenmeh.ru.



[2]Лидия Викторовна Щербакова,
Балтийский государственный технический университет («Военмех»)
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 79045509454, E-mail: kutin_aiu@voenmeh.ru



[3]Виктор Михайлович Мусалимов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения Российской Академии наук (ИПМаш РАН)»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 79214217917, E-mail: musvm@yandex.ru .

Аннотация

Филаментная намотка является одним из методов изготовления композитных оболочек и представляет собой процесс укладки в определенном геометрическом порядке на поверхность оправки нитей (или лент), пропитанных композитной смолой. Нити укладываются на вращающуюся оправку с помощью раскладчика, двигающегося горизонтально вдоль оправки, натяжение нитей поддерживается на постоянном уровне. Сегодня прогресс, достигнутый в развитии лазерной техники, позволяет провести существенную модернизацию заявленного

метода. В частности, предлагается изменить его технологическую схему, заменив операцию пропитки специальной смолой армирующих нитей операцией лазерной термообработки полимерного материала, укладываемого на поверхность армирующей намотки. Предлагается также система управления геометрическими параметрами композитной намотки, ее плотностью и параметрами лазерной термообработки.

Ключевые слова: композитный материал, намотка, управление процессом намотки, лазерная термообработка.

Введение

Филаментная намотка – это технологический процесс изготовления композитных оболочек методом укладки в строгом геометрическом порядке на поверхность оправки нитей (или лент), пропитанных композитной смолой. В процессе укладки нитей оправка вращается, а раскладчик нитей движется горизонтально вдоль нее. Натяжение нитей обычно стабилизируют на определенном уровне или изменяют по определенному закону В качестве материала намотки используются покрытые синтетической смолой углеродные нити, полиэстер, стекловолокна и т.п. После достижения требуемой толщины намотанного материала, заготовку с оправкой помещают в печь для высыхания. Когда смола затвердеет, оправку удаляют, оставляя готовое изделие.

По заявленной технологии изготавливают изделия с достаточно сложной поверхностью и заданными с определенными допусками геометрическими размерами. Полученные изделия имеют повышенную прочность, а их масса значительно меньше аналогичных изделий из металла. При необходимости натяжением нитей управляют: участки намотки с повышенным натяжением обладают более высокой прочностью по сравнению с теми участками, которые формировались с меньшим натяжением нитей. Порядок раскладки и ориентация нитей (лент) также может настраиваться с высокой точностью, обеспечивая наложение каждого нового слоя под углом к предыдущему. Угол, под которым фиксируется на оправке наматываемый материал, также влияет на свойства конечного продукта. Больший шаг раскладки придает изделию хрупкость, в то время как меньший - обеспечивает более высокий уровень прочности на разрыв.

Несмотря на кажущуюся простоту и эффективность, метод филаментной намотки имеет существенные недостатки. В частности, не удается обеспечить одинаковый режим наматывания и одинаковое натяжение поверхностного слоя намотки и ее плотность для всех создаваемых изделий. Это обусловлено тем, что в процессе наматывания может меняться линейная плотность наматываемого материала, соотношение между его упругой, эластической и пластической

деформациями [1-3]. Изменение этих и других факторов, влияющих на процесс наматывания, неизбежно приводит к изменению траектории перемещения точки наматывания. В результате изделия, воспроизводимые в соответствии с существующим способом, отличаются друг от друга по геометрическим параметрам и по значениям плотности намотки [4,5]. Помимо этого, вдоль образующей поверхности готового изделия обычно наблюдается бугристость. Для ее устранения требуется дополнительная механическая обработка. Из-за неравномерности по толщине стенки готового изделия возникают дополнительные напряжения в осевом направлении, что приводит к преждевременному износу изделий. Механическая обработка снижает прочностные характеристики изделия.

Таким образом, актуальной является задача совершенствования технологии филаментной намотки композиционного изделия и стабилизации его плотности за счет управления процессом наматывания. Имеющиеся варианты решения указанной задачи [6,7] не являются достаточно эффективными, поскольку не учитывают влияние локальной термообработки на геометрические параметры создаваемой намотки и параметры ее напряженного состояния.

Модель наматывания

Для формирования намотки и разработки управляющих алгоритмов разработана модель наматывания, исходя из представления о том, что в сечении, перпендикулярном оси вращения оправки, движение точки наматывания происходит по спирали [8,9]. По определению, спираль - это линия, описываемая некоторой точкой при ее движении по лучу и вращении указанного луча вокруг заданного центра. Прямолинейное движение точки по лучу характеризуется скоростью перемещения υ, а вращение луча характеризуется угловой скоростью ω:

$$\upsilon = d\rho/dt \quad , \qquad \omega = d\theta/dt \quad , \tag{1}$$

где *t* – текущее время движения точки (в нашем случае точки наматывания, то есть точки контакта наматываемого материала с телом намотки), ρ - текущий радиус намотки, θ - угол поворота луча или, применительно к объекту моделирования, угол поворота тела вращения – формирующейся намотки.

Отношение υ к ω называется параметром спирали или параметрической скоростью перемещения точки наматывания по ее полярному радиусу в полярных координатах:

$$a = \upsilon/\omega = d\rho/d\theta \ . \tag{2}$$

В общем виде модель формируемой цилиндрической намотки можно представить уравнениями параметра спирали a, текущего радиуса ρ,

длины L располагающихся по спирали композитных слоев намотки и средней объемной плотности γ намотки:

$$a = f(\theta)\,,\ \ \rho(\theta) - \rho_0 = \int_0^{\theta} a d\theta\ \ ,\ L = \int_0^{\theta} \rho(\theta)\, d\theta\ \ ,\ \ \gamma = \frac{m_S D(\rho)}{\pi H(\rho^2 - \rho_0^2)}\ , \quad (3)$$

где ρ_0 – радиус оправки, m_S – масса единицы длины наматываемого материала, H – ширина оправки, D - длина наматываемого материала.

При небольшой толщине намотки параметр a практически не меняет своего значения в процессе наматывания (a = const), и текущий радиус намотки рассчитывается по спирали Архимеда [8]

$$\rho(\theta) = \rho_0 + a\theta\ , \quad (4)$$

длина композитного слоя наматываемого материала рассчитывается по упрощенной формуле спрямления дуги спирали [10]

$$L = \frac{a}{2}\theta^2 + \rho_0\theta = \frac{(\rho^2 - \rho_0^2)}{2a}\ . \quad (5)$$

Уравнения (2)–(5) связывают движение точки наматывания ρ(θ) в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения, с длиной композитного слоя $L(\theta)$. Однако для определения плотности намотки $\gamma(\theta)$, согласно (3), этого недостаточно, поскольку необходимо рассчитывать длину наматываемого материала $D(\rho)$. Чтобы ее рассчитать, движение точки наматывания на поверхности оправки рассмотрим в цилиндрической системе координат. В ней положение точки наматывания $\vec{r}$ в момент времени t помимо координат ρ, θ будет определяться и координатой z ($\mathrm{r} = \{\rho, \theta, \mathrm{z}\}$), задающей величину отрезка на образующей цилиндрической поверхности от плоскости, перпендикулярной оси вращения, в которой откладываются ρ и θ, до точки наматывания.

Диапазон изменения координаты z ограничен шириной оправки ($0 \le \mathrm{z} \le H$). В этом диапазоне движение точки наматывания по образующей цилиндрической поверхности определяется движением раскладчика в торцевых зонах и в регулярной зоне ($H = H_T + H_p + H_T$). В торцевой зоне H_T оболочки, где происходит реверс раскладчика, намотка осуществляется по линии равного геодезического отклонения [11]. В этой зоне происходит плавное изменение угла намотки $\beta_т$ материала на оболочку от расчетного значения β до предельного значения $\beta_п = \pi/2$ при изменении скорости V_T раскладчика от значения V до 0 или наоборот. В регулярной зоне H_p скорость движения раскладчика постоянна ($V_T = V$ = const). Таким образом, положение точки наматывания $\vec{r}$ определяется системой [12] набора координат

$$r = \begin{cases} \left\{\rho, \theta, \frac{H_T}{2}[1-(-1)^n] + (-1)^n V\frac{t}{2}\right\} & \text{при } 0 \le z \le H_T, \\ \left\{\rho, \theta, H_T + \frac{H_p}{2}[1-(-1)^n] + (-1)^n V t\right\} & \text{при } H_T < z < H_T + H_p, \\ \left\{\rho, \theta, (H_T + H_p) + \frac{H_T}{2}[1-(-1)^n] + (-1)^n V\frac{t}{2}\right\} & \text{при } H_T + H_p \le z \le H, \end{cases} \quad (6)$$

где n – количество реверсов раскладчика (n = 0, 1, 2, 3, …).

Текущее значение угла намотки β_T материала на оболочку в торцевых зонах, где укладка витков осуществляется по линии равного геодезического отклонения, зависит от угла геодезического отклонения φ, характеризующего равновесность нити (волокна) на поверхности оправки. Тангенс этого угла является отношением геодезической кривизны к нормальной [11]:

$$tg\ \varphi = K_{gd}/K_n = R_n/R_{gd}\,, \quad (7)$$

где K_n и K_{gd} , R_n и R_{gd} – нормальная и геодезическая кривизна витка и их радиусы.

Нормальная кривизна определяется из уравнения Эйлера:

$$K_n = K_1 cos^2\beta_T + K_2 sin^2\beta_T\,, \quad (8)$$

где K_1 и K_2 – наибольшая и наименьшая нормальные кривизны поверхности в точке наматывания. В данном случае для линии равного геодезического отклонения $K_1 = 0$ и $K_2 = 1/\rho$.

Из уравнения (7) с учетом (8) следует:

$$R_{gd}\, tg\ \varphi = \rho/sin^2\beta_T\,. \quad (9)$$

Радиус R_{gd} геодезической кривизны витка для развертывающейся цилиндрической поверхности оправки (рис. 1) определяется отношением

$$R_{gd} = ds/d\beta_T = dz/(d\beta_T\, cos\beta_T)\,. \quad (10)$$

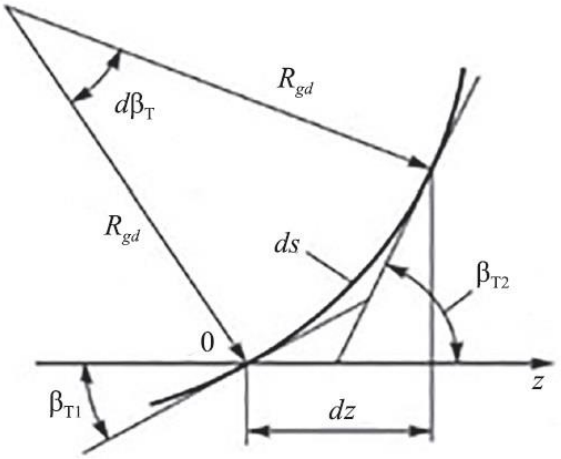


Рис. 1. Радиус геодезической кривизны витка

После подстановки (9) в (10) получится

$$dz = \frac{\rho}{tg\varphi}\frac{cos\,\beta_T}{sin^2\beta_T}d\beta_T\ . \qquad (11)$$

Интегрирование выражения (11) позволяет найти зависимость угла намотки β_T от величины перемещения точки наматывания вдоль координатной оси z в торцевых зонах

$$\begin{cases} \frac{1}{sin\,\beta_T} = 1 + \left|\left[z - \frac{H}{2}(1-(-1)^n)\right]\frac{tg\,\varphi}{\rho}\right| \ , \\ \frac{1}{sin\,\beta_T} = \frac{1}{sin\,\beta} - \left[\frac{(H_T+H_p)}{2}\left(1-(-1)^{n+1}\right) + (-1)^{n+1}z\right]\frac{tg\,\varphi}{\rho}\ . \end{cases} \qquad (12)$$

Первое уравнение справедливо при смещении координаты z в торцевых зонах от 0 до H_T или от H до $H_T + H_р$, а второе при смещении z от $H_T + H_р$ до H или от H_T до 0.

Кроме того, на основе дифференциального соотношения (11) и известных параметров движения раскладчика в регулярной зоне (угловой скорости ω оправки и V) получена аналитическая функция $D(\rho) = f(H, H_T, H_р, \omega, V)$ определения длины наматываемого материала в формуле (3) для расчета плотности намотки [12]. Предложенная модель (3,6) описывает укладку на оправку армирующих слоев намотки и слоев из термопласта с их последующей обработкой лазерным модулем.

Анализ выражения (3) показывает, что для осуществления процесса формирования намотки необходимо поддерживать фактическую скорость перемещения точки наматывания, равной теоретической. При реализации этого условия все остальные технологические показатели (радиус, длина, плотность) будут воспроизводиться по однотипным функциям. Практически это означает, что нужно поддерживать фактический радиус формируемой намотки, равным теоретическому. Величину отклонения фактического радиуса намотки от теоретического радиуса при данном значении угла поворота следует использовать для построения системы управления процессом формирования намотки. Необходимо воздействовать на намотку с переменным усилием [5,8], адекватно реагируя на случайные возмущения и обеспечивая равенство между фактическим и теоретическим радиусами намотки.

Устройство управления

Для реализации заявленного способа разработано устройство управления (рис. 2). Устройство включает в себя датчик оборотов оправки 1, датчик радиуса намотки 2, блок управления формированием намотки 3, цифроаналоговый преобразователь 4, устройство согласования 5, электромагнитную муфту 6, уплотняющий орган 7,

оправку 8, блок термообработки и охлаждения 9, датчик температуры 10. В постоянное запоминающее устройство блока устройства управления 3 заносятся постоянные величины: значения радиуса ρ_0 оправки, ее ширины H и значение r номинального теоретического приращения радиуса намотки. На основе исходных данных рассчитывается коэффициент

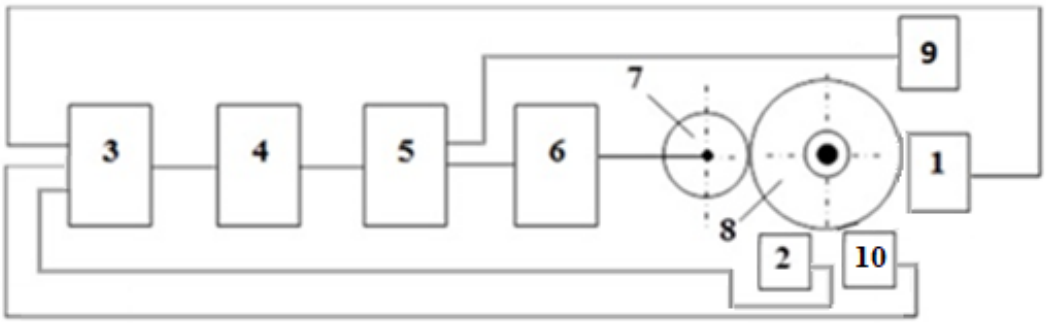


Рис. 2. Блок-схема устройства управления намоткой

$b = MT/(\pi H)$, значение которого вводится в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) блока 3. Кроме того, блок 3 рассчитывает конечное число оборотов оправки n_k и количество оборотов K_2 оправки, через которые прижимной ролик должен переместиться на величину, равную r.

В качестве блока управления 3 используется ПК-совместимый промышленный контроллер. Во время наматывания с помощью датчика радиуса измеряется фактический радиус намотки, величина которого записывается в ячейку памяти вычислительного устройства. Через заданное количество оборотов K_2 оправки производится расчет теоретического радиуса намотки в соответствии с математической моделью. Когда вычислительное устройство подсчитывает заданное количество оборотов оправки, уплотняющий орган находится в фиксированном положении, то есть не отводится, это позволяет добиться цилиндричности намотки. После расчета теоретического радиуса намотки его значение сравнивается с фактическим радиусом, который измеряется через каждые 8 оборотов оправки. Для их подсчета в ОЗУ организуется счетчик количества оборотов n_e . Информация, полученная в результате сравнения, позволяет вычислительному устройству определить величину отвода уплотняющего органа наматывающей машины и выдать сигнал исполнительному механизму для принудительного отвода с тем, чтобы обеспечить равенство между указанными радиусами. Когда количество оборотов оправки n достигнет конечного заданного значения n_k , процесс наматывания завершается.

По мере равномерного по ширине оправки заполнения поверхностного слоя армирующим волокном периодически на оправку

подается в виде волокон термопластичный материал, например, полиэтилентерефталатгликоль (PETG) – полимер, в молекуле которого чередуются бензольные кольца терефталевой кислоты и модифицированный гликоль. После формирования слоя из термопласта совокупность армирующих нитей и термопластичных волокон обрабатывается диодным лазерным модулем, входящим в состав блока 9 управляющего устройства. Равномерность заполнения слоев армирующим материалом и связующим контролируется с помощью датчика радиуса.

В качестве лазерного модуля предлагается модуль Ortur LU3-20A , мощностью 20 Вт китайского производства. Управление этим модулем осуществляется на принципах отрицательной обратной связи (ОС), т. е. всякое отклонение управляемой величины от желаемого значения сводится к нулю за счет того, что оно усиливается и с отрицательным знаком подается в место возникновения. Коэффициент передачи петли является отрицательной безразмерной величиной. Такой подход обеспечивает устойчивость системы, т. е. возможность пребывания в равновесном состоянии или вблизи него в отсутствие изменений сторонних воздействий. Температурное воздействие на термопласт регулируется за счет изменения количества импульсных питающих сигналов, подаваемых на лазер в единицу времени. При отклонении температуры на поверхности формируемого слоя от заданной, например, при ее снижении, количество импульсов увеличивается, в противном случае уменьшается. Для регулирования частоты излучения в модуле применяется система частотной автоподстройки (ЧАП). Обобщенная функциональная схема системы управления лазерным модулем показана на рис 3. Этой схеме соответствует структурная схема, показанная на рис. 4.

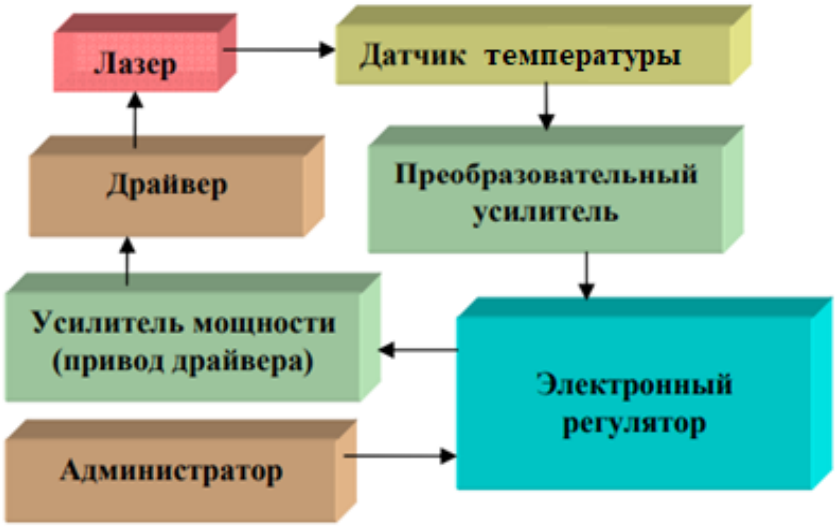


Рис. 3. Функциональная схема системы управления лазерным модулем

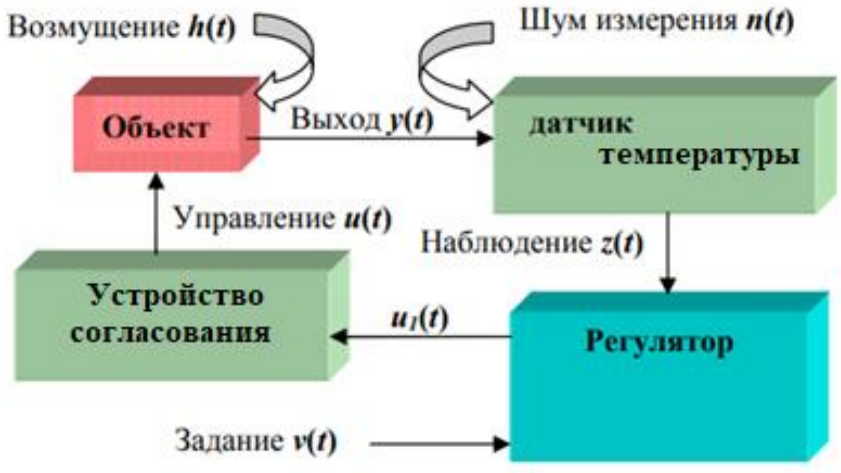


Рис. 4. Структурная схема системы управления лазерным модулем

Заключение

Таким образом, предлагается упрощение существующей технологической схемы метода филаментной намотки за счет замены операции пропитки специальной смолой армирующих нитей операцией лазерной термообработки полимерного материала, укладываемого на поверхность армирующей намотки. Такая модернизация имеет несколько преимуществ. Лазерное излучение, проходя через поверхностный прозрачный слой термопласта, воздействует непосредственно на армирующий материал, разогревает его и дает возможность соединения на молекулярном уровне с термопластом. И главное, существенно снижаются затраты на изготовление изделия, поскольку отсутствует необходимость в приобретении связующего из специальной смолы, устраняются операция по подготовке связующего в предназначенной для этого емкости и сопутствующие операции. Кроме того, эффективность решения управления процессом изменения плотности композитной намотки по заданной функции (3) по сравнению с другими решениями [13-17] обусловлена изменением радиального приращения слоев намотки и предотвращением действия случайных факторов с целью стабилизации напряженно-деформированного состояния формируемых композитных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Образцов И.Ф. Строительная механика летательных аппаратов: учебник для авиационных специальностей вузов / И. Ф. Образцов, Л. А. Булычев, В В. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1986. – 536 с.

[2] Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of

unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms. Composite Structures, 2017, V. 159, P. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090.
[3] Гусев, С.А. Технологические особенности изготовления толстостенного органопластика методом намотки / С.А. Гусев, В.В. Соколов, О.И. Сидоров, Г.В. Лункина, В.Ю. Гусев // Пластические массы, 2016, 9-10, С. 57-59.
[4] Битюков Ю.И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волокнистых композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. - Моск. гос. университет, Москва, 2010 – 332 с.
[5] Аюшев, В.Т.. Методы трехмерного моделирования и контроля процессов изготовления деталей из композиционных материалов способом намотки: дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01. - ВСГТУ, Улан-Удэ, 2006 – 326 с.
[6] Amin Zaami, Ismet Baran, Ton C. Bor, Remko Akkerman. New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature. Materials & Design, 2020, V. 196, P. 126–130.
[7] Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages. Modern Mechanical Engineering, 2016, V. 6, N 1, P. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003.
[8] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture // Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019). 2019. P. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860.
[9] Кутьин А.Ю., Мусалимов В.М., Поляков А.С. Проектирование композитной намотки и управление процессом ее формирования. Известия вузов. Приборостроение, 2018, Т. 61, № 2, С. 160–166. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166.
[10] Кутьин А.Ю. Оценка погрешности при определении длины текстильного материала. Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2004, № 2, С. 117–118.
[11] Комков М.А., Тарасов В.А., Бородулин А.С. Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана. Серия Машиностроение, 2012, N 4. P, 78–85.
[12] Кутьин А.Ю., Арясов Г.П. Моделирование процесса намотки композитных цилиндрических оболочек. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2020, Т. 20, № 2, С. 283 – 289. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289.

[13] Geng, H., Cao, X., Zu, L., Pan, H., Zhang, G., Zhang, Q., Fu, J., Zhou, L., Wu, Q., Jia, X., & Liu, H. (2024). The Effects of Laser-Assisted Winding Process Parameters on the Tensile Properties of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Composites. Materials, 17(18), 4664. https://doi.org/10.3390/ma17184664.
[14] Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe. Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013), 2013, vol. 2, pp. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147.
[15] Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1668–1675.
[16] Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding. Composite Structures, 2017, vol. 164, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061.
[17] Hong Ma, Aswani Kumar Bandaru, Paul M. Weaver. The effect of laser assisted tape placement processing conditions on microstructural evolution, residual stress and interlaminar shear strength of carbon fibre/PEEK laminates. Composites Part B: Engineering, 2024, vol. 274, 111293, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111293.

A.Yu.Kutin[1], L.V. Shcherbakova[1], M.V.Musalimov[2]

OPTIMIZATION OF THE MANUFACTURING PROCESS OF COMPOSITE POLYMER ROTATION SHELLS USING LASER HEAT TREATMENT

[1] Baltic State Technical University, Russia;
[2] Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russia.

Abstract

Filament winding is one of the methods for producing composite shells. It is a process of laying threads (or tapes) impregnated with composite resin in some geometric order on the surface of the mandrel. The threads are wound on a rotating mandrel using a spreader. It moves horizontally along the mandrel. The tension of the threads is constant. Today, the progress achieved in the development of laser technology allows for a significant modernization of the declared method. It

is proposed to change its technological scheme. It is necessary to replace the operation of impregnation of reinforcing threads with a special resin by the operation of laser heat treatment of the polymer material laid on the surface of the reinforcing winding. A system for controlling the geometric parameters of the composite winding, its density and laser heat treatment parameters is also proposed.

Key words: composite material, winding, winding process control, laser heat treatment.

REFERENCES

[1] Obraztsov I.F. Structural mechanics of aircraft: textbook for aviation specialties of universities / I.F. Obraztsov, L.A. Bulychev, V.V. Vasiliev et al. Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 536 p.

[2] Mostafa N.H., Ismarrubie Z.N., Sapuan S.M., Sultan M.T.H. Fibre prestressed composites: theoretical and numerical modelling of unidirectional and plain-weave fibre reinforcement forms. Composite Structures, 2017, V. 159, P. 410–423. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.090.

[3] Gusev, S.A. Technological features of manufacturing thick-walled organoplastic by winding method / S.A. Gusev, V.V. Sokolov, O.I. Sidorov, G.V. Lunkina, V.Yu. Gusev // Plastics, 2016, 9-10, pp. 57-59.

[4] Bityukov Yu.I. Geometric modeling of technological processes of winding and laying out structures from fibrous composite materials: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.01.01. - Moscow State University, Moscow, 2010 – 332 p.

[5] Ayushev, V.T. Methods of three-dimensional modeling and control of manufacturing processes of parts from composite materials by winding: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.01.01. - VSGTU, Ulan-Ude, 2006 – 326 p.

[6] Amin Zaami, Ismet Baran, Ton C. Bor, Remko Akkerman. New process optimization framework for laser assisted tape winding of composite pressure vessels: Controlling the unsteady bonding temperature. Materials & Design, 2020, V. 196, P. 126–130.

[7] Hashimoto H. Intelligent winding machine of plastic films for preventing both wrinkles and slippages. Modern Mechanical Engineering, 2016, V. 6, N 1, P. 20–31. doi: 10.4236/mme.2016.61003.

[8] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture // Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2019). 2019. P. 332–336. doi: 10.1109/ICMECH.2019.8722860.

[9] Kutyin A.Yu., Musalimov V.M., Polyakov A.S. Design of composite winding and control of its formation process. Journal of Instrument

Engineering, 2018, Vol. 61, No. 2, pp. 160–166. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-160-166.
[10] Kutyin A.Yu. Error assessment in determining the length of textile material. Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology, 2004, No. 2, pp. 117–118.
[11] Komkov M.A., Tarasov V.A., Borodulin A.S. Spiral winding of end sections of composite shells of cylindrical and conical shape. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering, 2012, N 4. P, 78–85.
[12] Kutyin A.Yu., Aryasov G.P. Modeling the winding process of composite cylindrical shells. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2020, Vol. 20, No. 2, pp. 283 – 289. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-283-289.
[13] Geng, H., Cao, X., Zu, L., Pan, H., Zhang, G., Zhang, Q., Fu, J., Zhou, L., Wu, Q., Jia, X., & Liu, H. (2024). The Effects of Laser-Assisted Winding Process Parameters on the Tensile Properties of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Composites. Materials, 17(18), 4664. https://doi.org/10.3390/ma17184664.
[14] Zhong W., Yang H., Li H., Xu J. Control system design of robotized filament winding for elbow pipe. Proc. 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC 2013), 2013, vol. 2, pp. 1081–1085. doi: 10.1109/MIC.2013.6758147.
[15] Quanjin M., Rejab M.R.M., Idris M.S., Kumar N.M., Merzuki M.N.M. Robotic filament winding technique (RFWT) in industrial application: A review of state of the art and future perspectives. International Research Journal of Engineering and Technology, 2018, vol. 5, no. 12, pp. 1668–1675.
[16] Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Del Sette F. Manufacture of high performance isogrid structure by robotic filament winding. Composite Structures, 2017, vol. 164, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.12.061.
[17] Hong Ma, Aswani Kumar Bandaru, Paul M. Weaver. The effect of laser assisted tape placement processing conditions on microstructural evolution, residual stress and interlaminar shear strength of carbon fibre/PEEK laminates. Composites Part B: Engineering, 2024, vol. 274, 111293, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111293.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 67.02, 67.03
doi:10.18720/SPBPU/2/id-158

Е.В. Кузнецова[1], Я.Р. Мелешкин[2], А.Ю. Курмышева[3], Д.В. Струневич[4]

ВЛИЯНИЕ ДОБАВЛЕНИЯ ОКСИДА ГРАФЕНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ КЕРАМИКОЙ ПОЛИМЕРНЫХ ФИЛАМЕНТОВ ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ



[1]Екатерина Викторовна Кузнецова,
Московский государственный технологический университет «Станкин» Россия, Москва Тел.: +7 (499) 972-95-85, E-mail: e.kuznetsova@stankin.ru



[2]Ярослав Романович Мелешкин
Московский государственный технологический университет «Станкин» Россия, Москва Тел.: +7 (499) 972-95-85, E-mail: ya.meleshkin@stankin.ru.



[3]Александра Юрьевна Курмышева
Московский государственный технологический университет «Станкин» Россия, Москва Тел.: +7 (499) 972-95-85, E-mail: ya.meleshkin@stankin.ru.



[4]Даниил Вадимович Струневич
Московский государственный технологический университет «Станкин» Россия, Москва Тел.: +7 (499) 972-95-85, E-mail: ya.meleshkin@stankin.ru.

Аннотация

В работе рассмотрено влияние добавления оксида графена (ОГ) на механические свойства высоконаполненных оксидом алюминия (Al_2O_3) филаментов на основе полиамида 12 для 3d печати методом послойного наплавления (FFF). Были получены керамополимерные филаменты с разным содержанием ОГ: 0, 0.25 и 0.5 об.%. Для полученных образцов были проведены испытания на растяжение, определены значения предела прочности, модуля Юнга и относительного удлинения. Результаты исследования показали, что добавление 0.25 об.% ОГ увеличивает значения прочности с 9.74±0.43 до 11.68±0.71 МПа и относительного удлинения с 3.9±0.9% до 11.1±1.6%, что улучшает пластичность и делает высоконаполненный керамикой филамент пригодным для 3D печати. При 0.50 об.% ОГ прочность возрастает до 11.2±0.58 МПа, но снижается пластичность. Наиболее эффективным содержанием ОГ установлено 0.25 об.%, обеспечивающее баланс прочности, пластичности и технологичности материала.

Ключевые слова: высоконаполненный филамент, полиамид 12, Al_2O_3, 3D-печать, оксид графена

Введение

Технология послойного наплавления FFF (Fused Filament Fabrication) является одной из наиболее распространенных аддитивных технологий, используемых для создания трехмерных объектов методом последовательного нанесения слоев расплавленного полимерного филамента. В настоящее время в рамках данной технологии активно развивается печать керамических изделий высоконаполненными керамикой полимерными филаментами. Сущность процесса заключается в получении методом FFF заготовок сложной пространственной конфигурации с последующим удалением полимерного связующего каталитическим и/или термическим методом и спеканием готового керамического изделия. Несмотря на широкое распространение, механические свойства изделий, напечатанных методом FFF, часто уступают аналогам, полученным традиционными методами, такими как литье под давлением. Это связано с анизотропией структуры напечатанных деталей, слабостью межслойного соединения и наличием внутренних дефектов, таких как пористость и пустоты [1].

Решения указанных проблем можно добиться, повышая содержание керамического наполнителя в филаменте. Чем выше содержание керамической составляющей, тем меньше будет пористость и усадка при спекании изделия, что, в свою очередь, приведет к повышению плотности и

улучшению его механических характеристик. Однако увеличение содержания керамических частиц в филаменте может привести к увеличению его хрупкости и затруднениям в процессе печати [2-3], так как включение твердых частиц в полимерную матрицу ограничивает молекулярную подвижность и повышает вязкость материала [4]. Одним из перспективных решений указанной проблемы может быть добавление оксида графена (ОГ), который способен одновременно выполнять несколько функций: повышать механическую прочность, улучшать распределение частиц наполнителя в полимерной матрице, а также снижать вероятность возникновения дефектов [5-6]. В ряде исследований было отмечено, что введение ОГ способствует увеличению прочности на разрыв, модуля упругости и износостойкости полимерных композитов [7].

Целью настоящего исследования является изучение влияния оксида графена на механические свойства высоконаполненных оксидом алюминия полимерных филаментов на основе полиамида 12. Определяется содержание ОГ, обеспечивающее повышение пластичности и прочности материала. В качестве наполнителя филамента был выбран нанопорошок оксида алюминия, благодаря своим свойствам таким как: высокая твердость, химическая стабильность, термическая стойкость и относительно небольшая стоимость [8-9]. В качестве полимерной матрицы был взят полиамид 12. Данный термопластик хорошо себя зарекомендовал при использовании в технологии 3D печати.

Методы

Для получения высоконаполненных керамикой филаментов с оксидом графена использовалось следующие сырье: порошок оксида алюминия (α-Al_2O_3) с чистотой 98.9-99.9% и размером частиц 200 нм (ООО «Плазмотерм», Россия), полиамид 12 в виде гранул с размером 30-50 мкм, парафин в виде гранул, стеариновая кислота в виде гранул (Quox Global, Индонезия), водная паста оксида графена с концентрацией 50 мг/мл (ООО «ГРАФЕНОКС», Россия).

На первом этапе с помощью лиофильной сушки были приготовлены порошковые композиции на основе Al_2O_3 с содержанием ОГ 0, 0.25 и 0.50 об.%. Полученные смеси были перемешаны с парафином (П), стеариновой кислотой (СК) и полиамидом 12 (ПА12) в органическом растворителе. После сушки в вакуумном шкафу и просеивания через ситовой анализатор были получены керамополимерные порошковые композиции 74масс.%(Al_2O_3+ОГ)/26масс.%(ПА12+П+СК) с различным содержанием ОГ.

Экструзия полученных смесей в керамополимерные филаменты осуществлялась на настольном одношнековом экструдере Wellzoom

(Shenzhen Mistar Technology Co., Китай) при температуре 220°C и максимальной скорости вращения шнека. Диаметр сопла составлял 1.75 мм.

Испытания на растяжение проходили на универсальной испытательной машине Instron ElectroPuls E10000 (Instron, США). Длина образцов для испытаний составляла 200 мм, длина между захватами 150 мм. Перед проведением испытаний у каждого образца с помощью микрометра измерялся диаметр в 5 точках с точностью 0.001 мм. Скорость растяжения образцов составляла 0.5 мм/мин, температура проведения испытаний 21±1°C, относительная влажность 52±1%. Скорость проведения испытаний выбрана исходя из того, что разрыв образца в результате его растяжения должен наступать минимум через 1 минуту от старта. Филаменты, разрывающиеся в захватах, отбраковывались. Модуль Юнга образцов определялся по наклону регрессии наименьших квадратов кривой растяжения между 0.15% и 0.5% деформации.

Исследование микроструктуры и энергодисперсионный анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе Vega 3 LMH (Tescan, Чехия) в режиме вторичных электронов. Предварительно все образцы покрывали слоем золота.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены оптические фотографии полученных филаментов с различным содержанием оксида графена 0-0.50 об.%. Цвет филаментов менялся в зависимости от увеличения содержания оксида графена (рис. 1 а, б, в) от белого (0 об.%) до почти черного (0.50 об.%). Из-за неконтролируемого изменения давления в экструдере диаметр филаментов не был постоянным и составил 1.63 ± 0.07 см.

Стоит также отметить, что филаменты с содержанием графена 0.25% получились более гибкими, по сравнению с филаментом без графена. Их можно было даже связать в узелок без разрушения. В то время как филамент с 0% ОГ оказался очень хрупким.

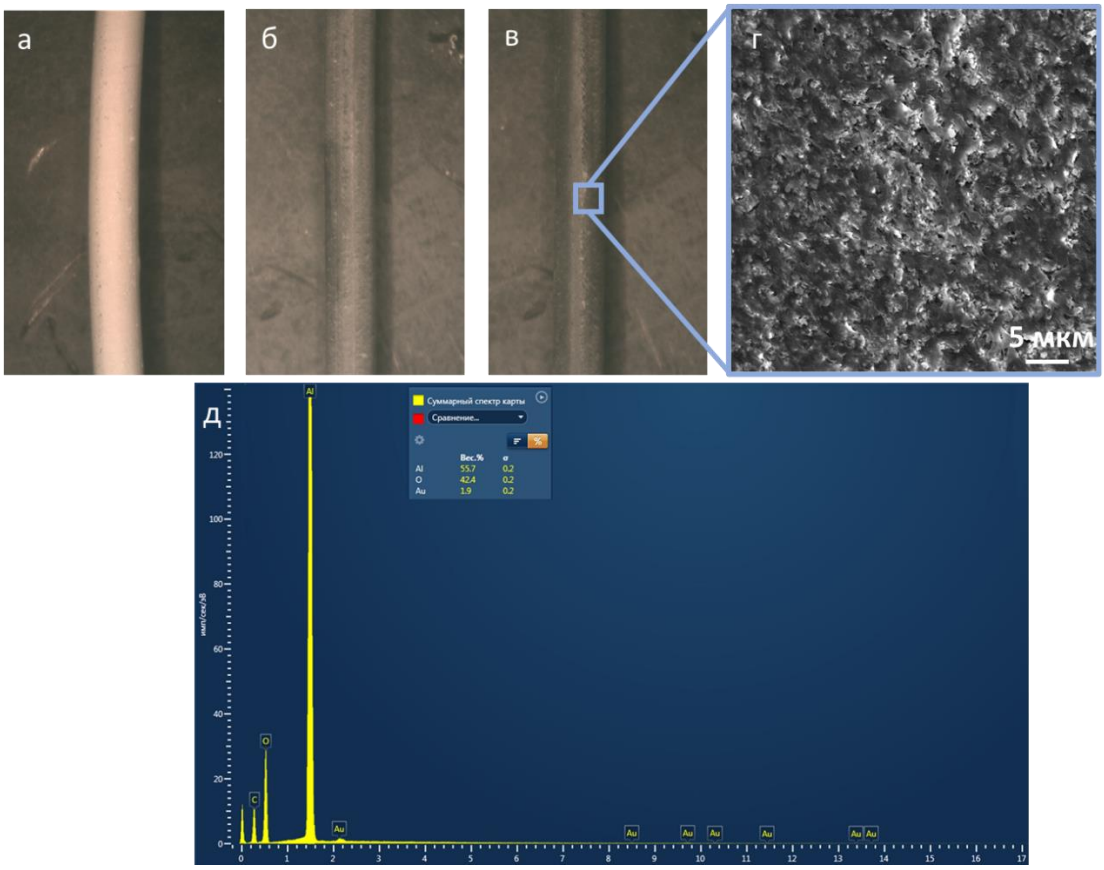


Рис. 1. Образцы наполненных керамикой филаментов 0% ОГ (а), 0.25% ОГ (б), 0.50% ОГ (в) и микроструктура (г) и ЭДС спектры (д) филамента 0.50% ОГ

Чтобы оценить распределение керамики в полученных филаментах, были проведены их микроструктурные исследования и энергодисперсионный анализ поверхности. На рисунке 1 (г) приведена характерная микроструктура высоконаполненного филамента с содержанием ОГ 0.50 об.%, по которой видно, что филамент равномерно наполнен большим количеством мелкого порошка оксида алюминия, явных дефектов и пористости, которые могли бы негативно сказаться на их 3D печати не обнаружено.

В дополнение к равномерному распределению керамического наполнителя в полимерной массе, есть ещё два важных качества, которые делают 3D печать филамента возможной. Во-первых, это относительно высокий модуль Юнга, который не даёт филаменту сминаться внутри экструдера и позволяет создавать сильное давление в сопле. Во-вторых, это относительно высокое значение удлинения на разрыв, которое позволяет наматывать филамент на катушку без риска повреждения в процессе печати [2]. Для того чтобы оценить указанные факторы были проведены испытания на растяжение всех полученных филаментов.

В таблице 1 представлены полученные значения по результатам испытаний на растяжения. Значения предела прочности, модуля Юнга и относительного удлинения.

Таблица 1. Механические свойства филаментов при растяжении

№	Название образца	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Модуль Юнга, МПа
1.	0% ОГ	9.74 ± 0.43	3.9 ± 0.9	486 ±5 7
2.	0.25% ОГ	11.68 ± 0.71	11.1 ± 1.6	528 ± 34
3.	0.50% ОГ	11.2 ± 0.58	3.7 ± 0.8	636 ± 43

Отмечается, что образцы филаментов с 0 и с 0.50% содержанием оксида графена имеют характер хрупкого разрушения присущее твердым материалам, в то время как образцы с 0.10 и 0.25 % показывают вязкое разрушение присущее пластичным материалам. Полученные значения относительного удлинения для образцов 0.25 % составили 11.1±1.6%, в то время как для образцов с 0 и 0.50% ОГ значения составили 3.9 ± 0.9% и 3.7 ± 0.8% соответственно.

Значение предела прочности филаментов варьировалась от 9.74 ± 0.43 до 11.72 ± 0.58 МРа в зависимости от увеличения концентрации ОГ. Увеличение содержание ОГ повышает прочность всех наполненных керамикой филаментов, следовательно, растягивающая нагрузка эффективно передается от полимера с керамикой к листам оксида графена. Значения модуля упругости составило 486 ± 57 МРа для 0% ОГ, 528 ± 34 МРа для 0.25% ОГ и 636 ± 43 МРа для 0.5% ОГ.

По полученным результатам видно, что полимерный филамент, наполненный 74 масс.% керамикой без добавления ОГ, ведет себя как хрупкий и низкопрочный материал, но добавление 0.25 об.% оксида графена увеличивает его прочность и в тоже время придает ему пластичность. Дальнейшее увеличение содержание ОГ до 0.50 об.% незначительно сказывается на увеличении прочностных характеристиках, но убирает пластичное поведение материала.

Полученные результаты вероятнее всего обусловлены тем, что в данном исследовании оксид графена ведет себе в том числе и как диспергатор частиц керамики [10] при содержании 0.25 об.%. Предварительное его перемешивание и лиофильная сушка с оксидом алюминия позволяет добиться равномерного распределения ОГ в объеме и не дает керамическим частицам слипнуться в агломераты, а относительно небольшое количество ОГ не дает агломерировать уже ему самому. В связи с чем, при данных концентрациях молекулам полимера «ничего» не мешает начать распутываться, ориентироваться и необратимо течь одна

относительно другой в направлении силы сдвига, что мы и наблюдаем при концентрации 0.25 об. % ОГ. Концентрации 0.50% оксида графена, судя по всему, достаточно для ограничения подвижности полимерных цепей полиамида 12.

Для проверки керамополимерных филаментов с 0.25 об.% содержанием оксида графена на способность к 3D печати на принтере CreatBot F430 (Henan Creabot Technology Ltd., Китай) были напечатаны элементарные формы в виде дисков диаметром 25 мм и высотой 2 мм. Печать дисков проходила по следующим режимам: температура сопла 260 °С, диаметр сопла 0.8 мм, высота слоя 0.4 мм, скорость печати 20 мм/с, температура стола 100 °С, заполнение 100%. На рисунке 2 представлены фотографии напечатанных дисков.

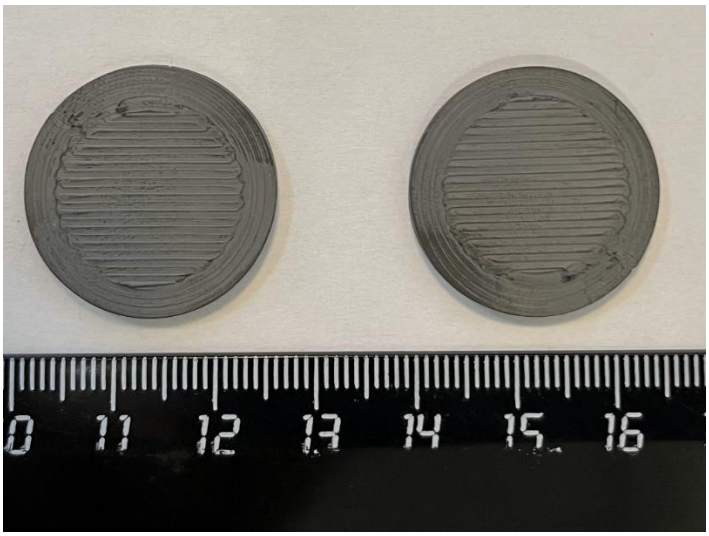


Рис. 2. Напечатанные образцы дисков из наполненного керамикой филамента содержащего 0.25 об.% ОГ

Печать филамента без графена, содержащего 74 масс.% оксида алюминия была невозможной филамент постоянно ломался и забивал сопло 3D принтера. Добавление 0.25 об.% оксида графена позволило сделать филамент пригодным для печати.

Заключение

Добавление 0.25 об.% оксида графена способствуют одновременному повышению предела прочности и пластичности наполненного керамикой полиамида 12, увеличивая значения относительного удлинения с 3.9±0.9 до 11.1±1.6%. При проведении механических испытаний филаментов было отмечено, что оксид графена эффективно забирает на себя часть нагрузки при испытаниях на растяжение, тем самым увеличивая значения

прочностных характеристик до 11.72 МПа для 0.50% в сравнении с 9,74 МПа для 0%. Большую пластичность также показал образец с наименьшим содержанием оксида графена. Эсктрудированные наполненные филаменты с 0.25% об. ОГ получились более гибкими, чем без оксида графена. Полученный эффект позволяет наматывать на катушку филаменты с содержанием керамики более 70 масс.% и поможет избегать поломки во время размотки и 3D печати изделий. В дальнейшем работа будет направлена на поиск оптимального значения содержания оксида графена в керамическом филаменте и отработку режимов 3D печати изделий из него.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FSFS-2024-0024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Shanmugam, V., Rajendran, D.J.J., Babu, K., Rajendran, S., Veerasimman, A., Marimuthu, U., Singh, S., Das, O., Neisiany, R.E., Hedenqvist, M.S., Berto, F., Ramakrishna, S. The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites, prepared through the additive manufacturing. Polymer Testing, 2021, 93, 106925.

[2] Heim, T., Kern, F. Influence of the Feedstock Preparation on the Properties of Highly Filled Alumina Green-Body and Sintered Parts Produced by Fused Deposition of Ceramic. Ceramics, 2023, 6, pp. 241-254..

[3] Eickhoff, R., Antusch, S., Nötzel, D., Probst, M., Hanemann, T. Development of Flexible and Partly Water-Soluble Binder Systems for Metal Fused Filament Fabrication (MF3) of Ti-6Al-4V Parts. Polymers, 2024, 16, 2548.

[4] Bhandari, S., Lopez-Anido, R.A., Gardner, D.J. Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100922.

[5] Abyzov, A.M. Aluminum Oxide and Alumina Ceramics (review). Part 1. Properties of Al2O3 and Commercial Production of Dispersed Al2O3. Refract. Ind. Ceram., 2019, 60, 24–32.

[6] Grigoriev, S., Smirnov, A., Pinargote, N.W.S., Yanushevich, O., Kriheli, N., Kramar, O., Pristinskiy, Y., Peretyagin, P. Evaluation of Mechanical and Electrical Performance of Aging Resistance ZTA Composites Reinforced with Graphene Oxide Consolidated by, SPS. Materials, 2022, 15, 2419.

[7] Gutierrez-Gonzalez, C.F., Smirnov, A., Centeno Aet. Wear behavior of graphene/alumina composite. Ceram. Int., 2015, 41, 7434–7438.

[8] Bhandari, S., Heim, T., De Bona, E, Sglavo, V.M., Rheinheimer, W., Biesuz, M., Franchin, G. Rapid processing of Al2O3 ceramics by fused filament

fabrication and ultrafast high-temperature debinding and sintering. Journal of Alloys and Compounds, 2025,, 1017, 178812.
[9] Md Aminul Islam, Md Hosne Mobarak, Md Israfil Hossain Rimon, Md Zobair Al Mahmud, Jubaraz Ghosh, Md Mir Shakib Ahmed, Nayem Hossain. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. Polymer Testing, 2024, 132, 108364.
[10] García-Tuñón E., Feilden E., Zheng H., D'elia E., Leong A., Saiz E. Graphene Oxide: An All-in-One Processing Additive for 3D Printing. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, 9, 38, 32977–32989.

E.V. Kuznetsova, Ya.R. Meleshkin, A.Yu. Kurmysheva, D.V. Strunevich

EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ADDITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMIC-FILLED POLYMER FILAMENTS FOR 3D PRINTING

Moscow State University of Technology "STANKIN", Russia

Abstract

The study examines the effect of adding graphene oxide (GO) on the mechanical properties of highly Al_2O_3-filled polyamide 12-based filaments for FFF printing. Ceramic-polymer filaments were obtained with different GO contents: 0, 0.25, and 0.5 vol.%. Tensile tests were conducted on the produced samples, and the ultimate strength, Young's modulus, and elongation were determined. The results showed that adding 0.25 vol.% GO increases the strength from 9.74±0.43 to 11.68±0.71 MPa and the elongation at break from 3.9±0.9% to 11.1±1.6%, improving ductility and making the filament suitable for printing. At 0.50 vol.% GO, the strength increases to 11.2±0.58 MPa, but ductility decreases to 3.7±0.8%. The optimal GO content was found to be 0.25 vol.%, ensuring a balance of strength, ductility, and processability.

Key words: highly filled filament, polyamide 12, Al_2O_3, 3D printing, graphene oxide

REFERENCES

[1] Shanmugam, V., Rajendran, D.J.J., Babu, K., Rajendran, S., Veerasimman, A., Marimuthu, U., Singh, S., Das, O., Neisiany, R.E., Hedenqvist, M.S., Berto, F., Ramakrishna, S. The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites, prepared through the additive manufacturing. Polymer Testing, 2021, 93, 106925.

[2] Heim, T., Kern, F. Influence of the Feedstock Preparation on the Properties of Highly Filled Alumina Green-Body and Sintered Parts Produced by Fused Deposition of Ceramic. Ceramics, 2023, 6, pp. 241-254..
[3] Eickhoff, R., Antusch, S., Nötzel, D., Probst, M., Hanemann, T. Development of Flexible and Partly Water-Soluble Binder Systems for Metal Fused Filament Fabrication (MF3) of Ti-6Al-4V Parts. Polymers, 2024, 16, 2548.
[4] Bhandari, S., Lopez-Anido, R.A., Gardner, D.J. Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100922.
[5] Abyzov, A.M. Aluminum Oxide and Alumina Ceramics (review). Part 1. Properties of Al2O3 and Commercial Production of Dispersed Al2O3. Refract. Ind. Ceram., 2019, 60, 24–32.
[6] Grigoriev, S., Smirnov, A., Pinargote, N.W.S., Yanushevich, O., Kriheli, N., Kramar, O., Pristinskiy, Y., Peretyagin, P. Evaluation of Mechanical and Electrical Performance of Aging Resistance ZTA Composites Reinforced with Graphene Oxide Consolidated by, SPS. Materials, 2022, 15, 2419.
[7] Gutierrez-Gonzalez, C.F., Smirnov, A., Centeno Aet. Wear behavior of graphene/alumina composite. Ceram. Int., 2015, 41, 7434–7438.
[8] Bhandari, S., Heim, T., De Bona, E, Sglavo, V.M., Rheinheimer, W., Biesuz, M., Franchin, G. Rapid processing of Al2O3 ceramics by fused filament fabrication and ultrafast high-temperature debinding and sintering. Journal of Alloys and Compounds, 2025,, 1017, 178812.
[9] Md Aminul Islam, Md Hosne Mobarak, Md Israfil Hossain Rimon, Md Zobair Al Mahmud, Jubaraz Ghosh, Md Mir Shakib Ahmed, Nayem Hossain. Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. Polymer Testing, 2024, 132, 108364.
[10] García-Tuñón E., Feilden E., Zheng H., D'elia E., Leong A., Saiz E. Graphene Oxide: An All-in-One Processing Additive for 3D Printing. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, 9, 38, 32977–32989.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.168
doi:10.18720/SPBPU/2/id-159

Е.Е. Дамаскинская[1], Е.Ю. Нефедьев[2], Л.О. Стояновский[3], Д.И. Фролов[4]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СТРАГИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ В СТАЛЯХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ



[1]Дамаскинская Екатерина Евгеньевна,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 754-0687, E-mail: kat.dama@mail.ioffe.ru.



[2]Евгений Юрьевич Нефедьев,
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (911) 241-1988, E-mail: ne246@ya.ru.



[3]Стояновский Лев Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (905) 230-4149, E-mail: sto-lev@yandex.ru.



[4]Фролов Дмитрий Игоревич,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 594-9515, E-mail: dm.frolov@mail.ioffe.ru.

Аннотация

Данное исследование посвящено разработке метода определения момента старта трещины в сталях методом акустической эмиссии (АЭ). С данной целью проведено исследование сигналов АЭ, излучаемых конструкционной сталью при нагружении образцов с предварительно

выращенными трещинами. Исследовались образцы, изготовленные из конструкционной стали SA-508 M Gr.4N Cl.2. Использовались методы механики разрушения, акустической эмиссии. Существование связи между параметрами АЭ и величиной подроста трещины проверялось методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова. На уровне значимости 5% проверены гипотезы о существовании линейной связи между подростом трещины и шестью кумулятивными параметрами АЭ. Показана справедливость такой гипотезы для пяти из шести параметров АЭ. Для одного из параметров АЭ гипотеза отклонена.

Ключевые слова: страгивание трещины, акустическая эмиссия, механика разрушения, непараметрическая статистика.

Введение

Целью исследования была разработка метода акустико-эмиссионного определения момента достижения подроста трещины величиной 0,2 мм. Задачами исследования были: нахождение параметров АЭ, способных контролировать заданный подрост трещины и проверка справедливости гипотезы о существовании связи между параметром АЭ и величиной подроста трещины.

Определение момента старта трещины необходимо при испытании образцов на трещиностойкость для определения механических свойств. А также при испытании и мониторинге за работой конструкций и контроле за технологическими процессами, например, процессом сварки ответственных изделий.

Механика разрушения [9] занимается изучением поведения твердых тел с макротрещинами. Важной стороной механики разрушения является определение параметра трещиностойкости материала. При этом необходимо определить момент страгивания трещины при механических испытаниях.

ГОСТ 25.508-85 [1] требует для получения удовлетворительного результата остановки испытаний при получении подроста трещины величиной 0,2 мм. Аналогичные требования содержатся и в иностранных нормативных документах [2-4].

Основы АЭ систематически были изложены в работе [6], и регламентируются действующим ГОСТом 52727 [7]. Ранним нормативным документом по применения АЭ для определения характеристик вязкости разрушения материалов были Методические рекомендации МР 240-87 [5].

Определением момента старта трещины занимались многие исследователи с момента начала применения метода АЭ в технике [8, 10-12]. Многочисленные подходы чаще всего были основаны на исследовании активности и амплитуд сигналов АЭ, но носили качественный характер.

В работе [11] отмечено, что момент страгивания трещины совпадает с началом непрерывного излучения сигналов АЭ большой амплитуды.

В работе [12] исследовались показано, что наиболее информативным параметром сигналов АЭ является их амплитуда, которая энергетически характеризует величину единичного подрастания трещины. Сумма амплитуд сигналов связывается с общим подрастанием площади трещины в работах [21, 23, 24].

Момент страгивания трещины характеризуется резким переходом от излучения отдельных низкоамплитудных сигналов, обусловленных раскрытием и нагружением вершины трещины, к спонтанному излучению высокоамплитудных сигналов с высокой частотой следования. Отличительным признаком старта и дальнейшего роста трещины является излучение широкополосных сигналов АЭ, характеризующихся высокоамплитудным наполнением высокочастотных гармоник спектра [20].

Авторы работы [13] показывает, что выявляемость дефектов методом АЭ связана с размером дефекта и скоростью его роста. Исследования на стали, термообработанной на разную структуру, показывают, что амплитуды сигналов АЭ определяются размерами микротрещин.

В настоящее время АЭ используется для оценки степени опасности дефектов в сталях [14,22], титановых сплавах [15], трубопроводах [18], для мониторинга состояния сосудов давления [17, 20] и для контроля технологических процессов, таких как сварка [16].

Чаще всего исследования ограничиваются выявлением качественных зависимостей параметров АЭ от процессов разрушения. Однако для наиболее корректного применения АЭ необходимы доказанные закономерности, базирующиеся на количественных критериях.

При изучении АЭ, являющейся случайным статистическим процессом, необходимо применять методы непараметрической математической статистики. Процесс научного исследования состоит в построении моделей или предложения гипотез, которые проверяются в нашем случае методами непараметрической статистики. Одним из основных методов является применение критерия Колмогорова [19].

Методы

Основная задача работы состояла в нахождении параметров АЭ, описывающих рост трещины, нахождение линейных уравнений, описывающих подрост трещин, и проверка гипотезы о существовании этих связей.

Испытание образцов производилось в соответствии с основным нормативным документом механики разрушения, описывающим испытание образцов. Это ГОСТ 25.508-85 и стандарт ASTM E1820-18

Правила по применению метода АЭ при испытаниях материалов и конструкций изложены в ГОСТ Р 52727–2007 и МР 240-87.

Проверка гипотез о существовании линейных связей между параметрами АЭ и подростом трещины осуществлялась методами непараметрической статистики с использованием критерия Колмогорова.

Критерий Колмогорова позволяет производить проверку согласия эмпирической функции распределения с теоретической. Проверяется справедливость гипотезы H_0: $F^*(x) = F(x)$ в противоположность гипотезе H_1: $F^*(x) \neq F(x)$. Критерий согласия Колмогорова [19] основан на том факте, что распределение супремума разности между теоретической и эмпирической функциями распределения $D_n = \sup|F^*(x) - F(x)|$ одинаково для любой $F(x)$. Величину D_n называют статистикой Колмогорова.

При малых n для статистики Колмогорова имеются таблицы критических точек $D_{\text{кр}}$. При больших n используют предельное распределение Колмогорова:

$$P\left(\sqrt{n}D_n < x\right) \to Q(x) = 1 + 2\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^{k-1}e^{-2k^2n^2}, n \to \infty$$

Для распределения Колмогорова, предельного для статистики $\lambda = \sqrt{n}D_n$ также существуют таблицы критических точек $\lambda_{\text{кр}}$. Практически их используют уже при $n > 20$.

Алгоритм проверки гипотезы:

- Результаты наблюдения представляют в виде интервального статистического (вариационного) ряда;
- Находят значение эмпирической функции распределения $F^*(x)$.
- Пользуясь гипотетической функцией распределения, вычисляют значения $F(x)$ теоретической функции распределения, соответствующие наблюдаемым значениям случайной величины ξ.
- Находят D_n и вычисляют наблюдаемое значение выборочной статистики $\lambda_H = \sqrt{n}D_n$.
- По заданному уровню значимости α из таблиц квантилей распределения Колмогорова находят критические точки λ_α.

Таблица 1. Значения статистики для критерия Колмогорова

Уровень значимости α	0,15	0,10	0,05	0,025	0,01
λ_α	1,138	1,224	1,358	1,480	1,626

- Сравнивая наблюдаемое значение выборочной статистики λ_H с критической точкой λ_α, принимают одно из двух решений: а) если $D_n\sqrt{n} < \lambda_\alpha$, то считается, что для отклонения нулевой гипотезы оснований нет, т. е. гипотетическая функция распределения согласуется с опытными данными; б) если $D_n\sqrt{n} > \lambda_\alpha$, то нулевая гипотеза отклоняется в пользу альтернативной.

Результаты

Проведены испытания на вязкость разрушения образцов из стали марки SA-508 M Gr.4N Cl.2. Цель применения АЭ метода состояла в своевременном обнаружении минимального докритического подроста трещины в 0,2 мм при нагружении стальных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной. Схема расположения преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) представлена на рисунке 1.

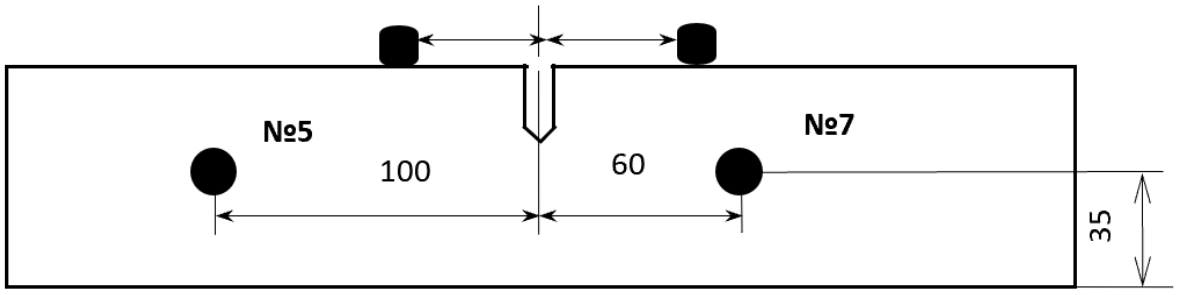


Рис. 1. Схема расположения ПАЭ на образце.

В процессе испытаний регистрировались сигналы АЭ. По разнице прихода сигналов на различные датчики вычислялись координаты источников АЭ. Анализировались сигналы, приходящие только из зоны трещины. На рисунке 2 представлены зависимости нагрузки от раскрытия трещины и активности сигналов АЭ от нагрузки.

Вычислялись различные параметры сигналов: амплитуда, энергия сигнала, число сигналов при различных пороговых уровнях амплитуды, степень опасности сигналов. Испытания останавливались при достижении определенного значения параметров нагружения. Образец в захватах испытательной машины Инстрон показан на рисунке 3.

Образцы разгружались и помещались в муфельную печь для термического окрашивания полученной зоны подроста трещины. После этого образцы доламывались и измерялась величина подроста трещины. Фотография одного из изломов образцов показана на рисунке 4.

a)

b)

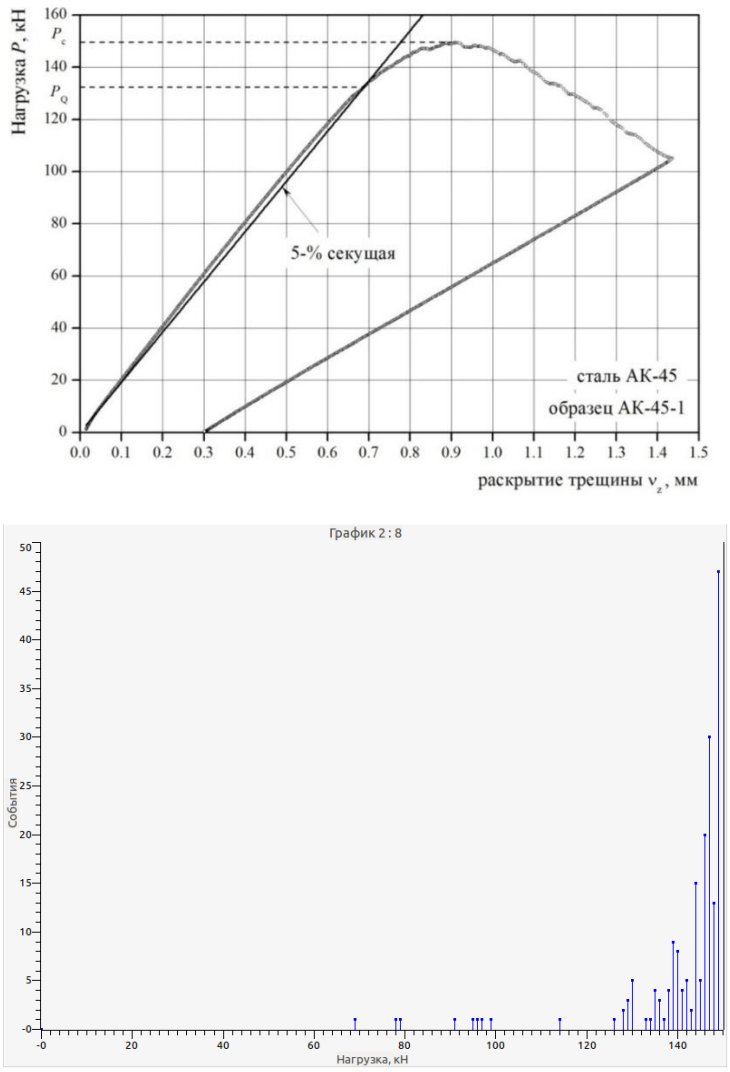


Рис. 2. Зависимости a) нагрузки от раскрытия трещины; b) активности сигналов АЭ от нагрузки.



Рис. 3. Образец в захватах машины Инстрон.



Рис. 4. Фото излома образца Линейный подрост трещины 0,26 мм.

Рабочая гипотеза состояла в наличии линейной связи между кумулятивными параметрами АЭ и площадью подроста трещины. Строилась зависимость величины подроста трещины от соответствующего параметра АЭ. На рис. 5 представлен пример зависимости подроста трещины от суммы амплитуд сигналов АЭ.

Проверяем гипотезу «Подрост трещины пропорционален сумме амплитуд сигналов АЭ». Данные представлены в таблице 2 и отражены на графике (рис. 5).

Методом наименьших квадратов вычислялись коэффициенты линейного регрессионного уравнения. У нас имеется линейная корреляционная зависимость вида:

$$\Delta l = 0{,}00004 * \sum A + 0{,}2258$$

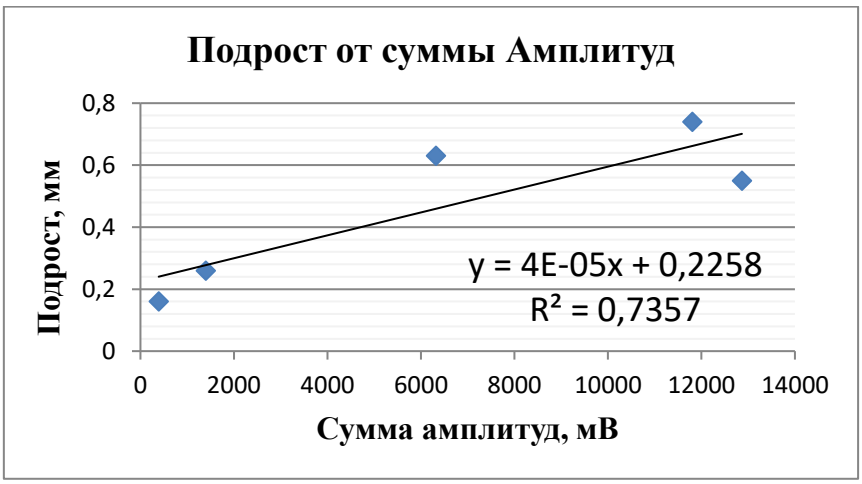


Рис. 5. Зависимость подроста трещины от суммарной амплитуды сигналов АЭ.

Для каждого подроста трещины вычисляем теоретическое число сигналов АЭ. Сравниваем с фактическим значением, находим разницу, нормируем на максимальное теоретическое значение для интервала наблюдений и вычисляем λ. Данные вычислений показаны в таблице 2.

Таблица 2. Данные о подросте трещины и суммарной амплитуде сигналов АЭ

Сумма амплитуд сигналов АЭ	Подрост трещины, мм	Теоретический подрост трещины, мм	Разница	λ
390	0,16	0,24	0,0	
1396	0,26	0,29	0,03	
12866	**0,55**	**0,74**	**0,19**	**0,568**
6323	0,63	0,48	-0,15	
11806	0,74	0,69	-0,05	

Сравниваем с табличным значением λ_α для уровня значимости 5%. При превышении последнего отклоняем проверяемую гипотезу. В противном случае считаем, что проверяемая гипотеза не противоречит экспериментальным данным на уровне 5%.

Для параметра суммарная амплитуда сигналов АЭ имеем:

$$\lambda < \lambda_\alpha \quad (0{,}568 < 1.358).$$

Гипотеза не отвергается.

Аналогично проверяем гипотезы о существовании линейной зависимости между еще пятью параметрами сигналов АЭ и подростом трещины. Проверяются следующие параметры АЭ: общее число сигналов АЭ к моменту остановки нагружения – N, число сигналов АЭ с амплитудой более 65 дБ - N_{65}, число сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ - N_{75}, суммарная энергия сигналов АЭ – ΣE и суммарная опасность сигналов АЭ – S. Итоговые данные сведены в таблицу 3.

Параметр λ характеризует нормированное статистическое отклонение по критерию Колмогорова. Были проверены статистическими методами шесть гипотез о связи кумулятивных параметров АЭ с подростом трещины. Для не отклонения гипотезы на 5% уровне значимости он не должен превышать $1{,}358$. Из используемых параметров, которые связаны с подростом трещины, мы отклонили параметр «опасность источника S». Остальные параметры могут использоваться для оценки подроста трещины. Статистические данные для шести параметров АЭ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Статистические данные о подросте трещины и коэффициентах регрессионных уравнений.

Параметр АЭ	R^2	a	b	Δl	λ
N	0,5483	0,0079	0,228	0,29	0,874
N_{65}	0,6657	0,0207	0,207	0,22	0,651
N_{75}	0,7478	0,0462	0,191	0,16	0,490
ΣA	0,7357	0,00004	0,226	0,19	0,568
ΣE	0,674	0,0259	0,289	0,24	0,725
S	0,571	0,0012	-0,116	0,47	1,389

Для параметра опасности S имеем:

$$\lambda > \lambda_\alpha \ (1{,}389 > 1.358).$$

Гипотеза отвергается.

Обсуждение

Рассмотрим приведенные данные. Коэффициент R^2 характеризует тесноту корреляционной связи. Наибольшее значение он имеет для числа сигналов, превышающих 75 дБ и суммарной амплитуды сигналов АЭ 0,7478 и 0,7357 соответственно.

Коэффициент a характеризует угол наклона линейной зависимости и зависит от масштаба величин.

Интересен коэффициент b. Он показывает пороговую величину подроста, которую можно определить данной корреляционной зависимостью. Наименьший подрост 0,191 мм выявляется по параметру A_{75}.

Для интерпретации значения величины -0,116, относящейся к параметру «опасность источника S», вычислим место пересечения линейной зависимости с осью абсцисс. В точке пересечения S равно 96. Это можно толковать так, что подроста еще нет, а опасность источника равна 96 у.е. такой факт можно отнести на пластическую деформацию без продвижения трещины.

Параметр Δl характеризует отклонение предсказанного значения от реально измеренного. Другими словами, это разброс данной корреляционной зависимости. Наименьший разброс (0,16 мм) мы получаем с помощью параметра A_{75}, а наибольший (0,47) с помощью параметра S.

Рассмотрим параметр число сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ.

$$\Delta l = 0{,}0462 * N_{75} + 0{,}191 = 0.36$$

Из решения уравнения находим, что испытания необходимо останавливать при регистрации $3.7 \approx 4$ импульсов АЭ, превышающих 75 дБ.

Таким образом, при АЭ контроле испытаний образцов, при контроле объекта из данного материала или процесса сварки, например, зарегистрировав из локальной области 4 сигнала АЭ с амплитудой, превышающей 75 дБ, мы на уровне значимости 5% можем ожидать, что в данном месте имеется подрост дефекта на величину 0,2 мм. Эти результаты подтверждают результаты других исследователей, но имеют новизну, связанную с количественной оценкой выдвигаемых гипотез.

Заключение

Целью исследования была разработка метода акустико-эмиссионного определения момента достижения подроста трещины величиной 0,2 мм. Задачами исследования были нахождение параметров АЭ способных контролировать заданный подрост трещины и проверка справедливости гипотезы о существовании связи между параметром АЭ и величиной линейного подроста трещины. Данное исследование позволило найти параметры АЭ, связанные с величиной подроста трещины. Такими параметрами оказались: общее число сигналов АЭ к моменту остановки нагружения – N, число сигналов АЭ с амплитудой более 65 дБ - N_{65}, число

сигналов АЭ с амплитудой более 75 дБ - N_{75}, суммарная амплитуда сигналов АЭ – ΣA, суммарная энергия сигналов АЭ – ΣE и суммарная опасность сигналов АЭ – S. Применение методов непараметрической статистики и критерия Колмогорова позволило проверить и принять гипотезы о существовании линейной связи между параметрами АЭ и линейным подростом трещины для всех вышеперечисленных параметров за исключением суммарной опасности S. Результаты данного исследования могут найти применение при диагностике конструкций и контроле технологических процессов, например, процессов сварки изделий ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] ГОСТ 25.506-85 Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении

[2] ISO 12135 - 2002(E) Metallic materials – Unified method of test for the determination of fracture toughness

[3] BS EN ISO 15653 – 2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds

[4] ASTM E1820-18, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness

[5] МР 240-87 Применение метода АЭ при определении характеристик вязкости разрушения

[6] Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.

[7] ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.

[8] АС 873108 от 18.06.79 Способ определения момента страгивания трещины, В.С. Иванова и др.

[9] Черепанов Г.П. Механика разрушения//Москва-Ижевск, ИКИ. 2012. 872 с.

[10] Лазарев А.М., Рубинштейн В.Д. Исследование акустической эмиссии при испытаниях образцов на вязкость разрушения. – Дефектоскопия,1980, № 12, с. 42 – 47.

[11] Кузнецов Б.А., Леонов В.В., Смирнов В.И. Определение момента страгивания трещины методом акустической эмиссии при испытаниях на вязкость разрушения конструкционных материалов и сварных соединений. – Вопросы судостроения. Серия: Сварка, 1976, вып. 22, с. 3 – 10.

[12] Коровкин Е.Д., Скобло А.В., Дунина Л.П. Определение старта трещины акустическим методом. – Заводская лаборатория, 1980, № 9, с. 865 – 867.
[13] Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Изд. Дом «Спектр», 2017. – 368 с.: ил.
[14] Determination of the Degree of Danger of Crack-like Defects in 17G1C Steel by the Acoustic Emission Method / Nefedyev E. at al., In M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov (Ed), Modern Engineering. Science and education, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University – 2017, Pp.387-401.
[15] Belogur V., Semashko N., Kulesh A. Methodological Approaches to the Diagnosis of Products from Titanium Alloys by Acoustic Emission (AE), In M.M. Radkevich and A.N. Evgrafov (Ed), Modern Engineering. Science and education, St. Petersburg, Publishing House of Polytechnic University - 2016, Pp.350-358.
[16] Gomera V., Nefedyev E., Smirnov A. On the Possibility of Production Defect-Free Welds Under Acoustic Emission Monitoring, In: A. Evgrafov, O.Egorova (ed.), International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol.11, N 5, May 2017, Special Issue on "Advances in Modern Mechanical Engineering Research", ISSN 1970-8734, , p.343-349.
[17] Papasalouros D, Bollas K., Ladis I, Aerakis E., Anastasopoulos A., Kourousis D. Novel AE monitoring of hydrogen induced damaged vessel and real time alarms. A case study // Proc. of 33rd European Conf. on AE testing, Senlis, France, 12-14 September 2018, pp.167-174.
[18] Nefedyev E., Gomera V., Smirnov A. Determination of a Pre-destructive State During Hydraulic Testing of Steel Pipes with Defects by the Acoustic-Emission Method, In: A. Evgrafov (ed.), Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, DOI 10/1007/978-3-319-72929-9, Springer International Publishing AG – 2018, Pp. 115-127.
[19] Колмогоров А. Н. Теория вероятности и математическая статистика, М.: Наука, 1986. – 535 с.
[20] Цзян Пэн, Ли Кайруи, Чжан Люинь, Ли Вэй, Янь Сяовэй, Определение параметров разрушения сосудов для хранения водорода под высоким давлением с помощью энтропии акустической эмиссии, – Дефектоскопия, 2022, №6. – С. 26-36
[21] Матвиенко Ю. Г., Васильев И. Е., Чернов Д. В., Иванов В. И., Елизаров С. В., Проблемы локации источников акустической эмиссии, – Дефектоскопия, 2021, №9. – С. 35-44
[22] Прокопьев Л. А., Андреев Я. М., Лукин Е. С., Оценка степени опасности трещиноподобных дефектов на основе акустико-эмиссионного контроля при локальном низкотемпературном нагружении, – Дефектоскопия, 2022, №12. – С. 17-23

[23] Растегаев И. А., Ясников И. С., Растегаева И. И., Аглетдинов Э. А., Мерсон Д. Л., Оценка вероятности обнаружения акустико-эмиссионных сигналов методом амплитудной дискриминации при малом соотношении сигнал/шум, – Дефектоскопия, 2022, №3. – С. 3-12
[24] Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. // М.: Издательство физико-математической литературы. 2004. 136 с.

E. E. Damaskinskaya[1], E. Yu. Nefedyev[2], L. O. Stoyanovskiy[3], D. I. Frolov[1]

DETERMINATION OF CRACK INITIATION MOMENT IN STEELS USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

[1]Ioffe Institute, Russia;
[2]Krylov State Research Center, Russia;
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This study is devoted to the development of a method for determining the crack initiation moment in steels using the acoustic emission (AE) technique. For this purpose, an investigation was conducted on AE signals emitted by structural steel during the loading of specimens with pre-grown cracks. The study focused on welded joints of structural steel SA-508 M Gr.4N Cl.2. Methods of fracture mechanics and acoustic emission were employed. The existence of a relationship between AE parameters and crack growth was verified using nonparametric statistics, specifically the Kolmogorov criterion. At a 5% significance level, hypotheses regarding the existence of a linear relationship between crack growth and six cumulative AE parameters were tested. The validity of such a hypothesis was confirmed for five out of the six AE parameters, while it was rejected for one parameter.

Key words: crack initiation, acoustic emission, fracture mechanics, nonparametric statistics.

REFERENCES

[1] GOST 25.506-85. Determination of crack resistance characteristics (fracture toughness) under static loading.

[2] ISO 12135:2002(E). Metallic materials – Unified method of test for the determination of fracture toughness.
[3] BS EN ISO 15653:2010. Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds.
[4] ASTM E1820-18. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
[5] MR 240-87. Application of the acoustic emission method in determining fracture toughness characteristics.
[6] Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. Acoustic Emission: Application in Testing Materials and Products. Moscow: Standards Publishing House, 1976. 272 p.
[7] GOST R 52727-2007. Technical diagnostics. Acoustic emission diagnostics. General requirements.
[8] AS 873108 от 18.06.1979. Method for determining crack initiation moment. V.S. Ivanov, Kuznetsov, Reznikov.
[9] Cherepanov G.P. Fracture Mechanics. Moscow-Izhevsk: IKI, 2012. 872 p.
[10] Lazarev A.M., Rubinshtein V.D. Investigation of acoustic emission during fracture toughness testing of specimens. Defektoskopiya, 1980, No. 12, pp. 42–47.
[11] Kuznetsov B.A., Leonov V.V., Smirnov V.I. Determination of crack initiation moment by acoustic emission in fracture toughness testing of structural materials and welded joints. Shipbuilding Issues. Series: Welding, 1976, Issue 22, pp. 3–10.
[12] Korovkin E.D., Skoblo A.V., Dunina L.P. Determination of crack initiation by the acoustic method. Zavodskaya Laboratoriya, 1980, No. 9, pp. 865–867.
[13] Ivanov V.I., Barat V.A. Acoustic Emission Diagnostics: A Reference Guide. Moscow: Spectrum Publishing House, 2017. 368 p.
[14] Nefedyev E. et al. Determination of the Degree of Danger of Crack-like Defects in 17G1S Steel by the Acoustic Emission Method. In: M.M. Radkevich, A.N. Evgrafov (Eds.), Modern Engineering. Science and Education. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2017, pp. 387–401.
[15] Belogur V., Semashko N., Kulesh A. Methodological Approaches to the Diagnosis of Products from Titanium Alloys by Acoustic Emission (AE). In: M.M. Radkevich, A.N. Evgrafov (Eds.), Modern Engineering. Science and Education. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2016, pp. 350–358.
[16] Gomera V., Nefedyev E., Smirnov A. On the Possibility of Production Defect-Free Welds Under Acoustic Emission Monitoring. International Review of Mechanical Engineering (IREME), 2017, Vol. 11, No. 5, pp. 343–349.

[17] Papasalouros D. et al. Novel AE Monitoring of Hydrogen-Induced Damage in Vessels and Real-Time Alarms: A Case Study. Proc. of 33rd European Conference on AE Testing, Senlis, France, 2018, pp. 167–174.
[18] Nefedyev E., Gomera V., Smirnov A. Determination of a Pre-Destructive State During Hydraulic Testing of Steel Pipes with Defects by the Acoustic-Emission Method. In: A. Evgrafov (Ed.), Advances in Mechanical Engineering. Springer, 2018, pp. 115–127.
[19] Kolmogorov A.N. Probability Theory and Mathematical Statistics. Moscow: Nauka, 1986. 535 p.
[20] Jiang Peng et al. Determination of Fracture Parameters of High-Pressure Hydrogen Storage Vessels Using Acoustic Emission Entropy. Defektoskopiya, 2022, No. 6, pp. 26–36.
[21] Matvienko Yu.G. et al. Problems in Locating Acoustic Emission Sources. Defektoskopiya, 2021, No. 9, pp. 35–44.
[22] Prokopiev L.A. et al. Assessment of the Hazard Level of Crack-Like Defects Based on Acoustic Emission Monitoring Under Local Low-Temperature Loading. Defektoskopiya, 2022, No. 12, pp. 17–23.
[23] Rastegaev I.A. et al. Evaluation of the Probability of Detecting Acoustic Emission Signals by Amplitude Discrimination at Low Signal-to-Noise Ratio. Defektoskopiya, 2022, No. 3, pp. 3–12.
[24] Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. Dynamic Problems of Elasticity Theory in Applications to Acoustic Testing and Diagnostics. Moscow: Fizmatlit, 2004. 136 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 634.377.2
doi:10.18720/SPBPU/2/id-160

М.Н. Пищов[1], С.Е. Бельский[2]

ИЗУЧЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С УПРОЧНЕННЫМИ СЛОЯМИ И ПОКРЫТИЯМИ



[1]Михаил Николаевич Пищов,
Белорусский государственный технологический университет
Республика Беларусь, Минск
Тел.: (8029)570-7276, E-mail: Mikhail_pishchou@mail.ru



[2]Сергей Евграфович Бельский,
Белорусский государственный технологический университет
Республика Беларусь, Минск
Тел.: (8029)110-1793, E-mail: s.belsky@mail.ru

Аннотация

В статье изучены изменения ряда физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. Испытания проводились в условиях знакопеременного изгиба с использованием различных частот нагружения 3,0 кГц - 18,0 кГц на образцах, прошедших поверхностное упрочнение боросилицированием. Изучены усталостные характеристики конструкционных сталей с упрочненными слоями и покрытиями при различных температурно-временных параметрах процесса упрочнения. Определено, что для обеспечения повышенного эксплуатационного ресурса деталей машин, работающих при высоких динамических нагрузках, необходимо применение методов упрочнения, позволяющих получить упрочненные слои с высокой твердостью, износостойкостью и усталостными характеристиками. Установлено, что предложенный процесс поверхностного упрочнения принципиально не меняет особенности развития усталостной повреждаемости конструкционной стали в рассмотренном диапазоне частот испытаний.

Ключевые слова: поверхностные слои, образцы, твердость, конструкционные стали, испытания, усталостное разрушение, усталостные трещины, поверхностное упрочнение, микротвердость, дислокации.

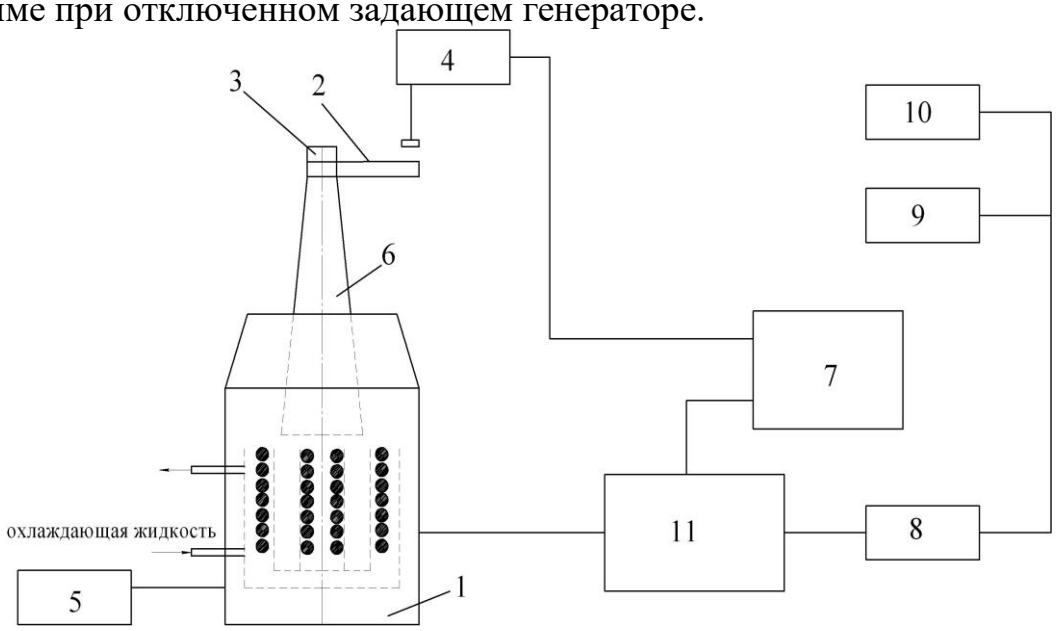
Введение

Условия эксплуатации многих деталей машин, элементов конструкций и технологической оснастки характеризуются циклическими нагрузками широкого диапазона частот. Материалы для изготовления таких изделий должны обладать высокими усталостными характеристиками, а также износостойкостью [13,15]. Установлено, что при значительных контактных нагрузках (характерных, например, для зубчатых передач) усталостное выкрашивание, как правило, развивается в поверхностном слое [4,5]. Для повышения эксплуатационного ресурса таких деталей большое значение имеет правильный выбор процессов диффузионного упрочнения и определение рациональных температурно-временных параметров процесса. Подобные исследования имеют большое значение, поскольку ряд процессов диффузионного насыщения, например, борирование, способствует возрастанию микрохрупкости поверхностного слоя, что нежелательно для деталей машин, работающих в условия динамического нагружения. Большинство теоретических и экспериментальных исследований развития процесса усталостного разрушения выполнено без учета структурных и металлургических факторов, наличия упрочненных слоев и покрытий; тем самым затрудняется подбор оптимальных технологических параметров процессов поверхностного упрочнения [1]. Недостаточно изучено влияние наиболее распространенных технологических процессов химико–термической обработки сталей (цементации, азотирования, борирования) на дислокационную структуру поверхностных слоев деталей из конструкционных сталей и ее трансформацию в ходе последующей эксплуатации, а также и усталостные характеристики сталей. Исследования проводимые в этом направлении могут обеспечить совершенствование составов и режимов поверхностного упрочнения и следовательно повышение эксплуатационной долговечности изделий [2,3].

Целью и задачами проведенных исследований являлось определение оптимальных температурно-временных параметров процесса боросилицирования, позволяющего значительно повысить эксплуатационный ресурс изучаемых зубчатых передач, работающих при высоких нагрузках, и технологической оснастке. Для правильного выбора данных параметров необходимо проведение дополнительных испытаний на усталостную прочность упрочненных слоев и покрытий, а также изучение физико-механических характеристик конструкционной стали при проведении усталостных испытаний. В связи со значительной длительностью и трудоемкостью традиционных низкочастотных испытаний упрочненных образцов, в работе использовались методики ускоренного определения характеристик усталости материалов.

Методика проведения усталостных испытаний

Для осуществления высокочастотного нагружения был использован комплекс магнитострикционных резонансных установок [6], позволяющий проводить испытания различных конструкционных материалов на разных частотах (3 кГц – 18 кГц) и температур (300 – 1000°К). Принципиальная схема установки разработанной на базе магнитострикционного преобразователя приведена на рисунке 1. Механические колебания пакета возникают под воздействием переменного магнитного поля, возбуждаемого высокочастотным генератором. Эффективная работа магнитострикционного преобразователя 1 (рисунок 1) обеспечивается оптимальным уровнем подмагничивания постоянным полем. С целью увеличения амплитуды колебаний к пакету присоединялся стержень-концентратор переменного сечения 6, к которому в свою очередь, присоединяется образец 2 с помощью устройства крепления 3. Все размеры элементов данной системы выполнялись с одинаковой собственной частотой, что позволяло при работе установки на данной резонансной частоте получать в образце максимальные значения амплитуды циклических напряжений. Питание преобразователей высокочастотным током производилось либо от усилителя типа УПВ-5 (частоты 3,0 и 9,0 кГц), либо от штатных усилительных блоков генераторов УЗГ-2-4М (частота 18 кГц) 11, для чего была проведена их модернизация, позволяющая осуществлять работу в автоколебательном режиме при отключенном задающем генераторе.



1 – магнитострикционный преобразователь с катушками возбуждения и подмагничивания, 2 – образец, 3 – устройство крепления, 4 – виброметр МРТИ, 5 – модуль подмагничивания, 6-концентратор-волновод, 7 – прибор стабилизации амплитуды (ПСА), 8 – частотомер, 9 – осциллограф, 10 – устройство вывода на печать, 11 – усилитель и генератор сигнала

Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного испытательного стенда

На корректность результатов усталостных испытаний влияет стабилизация амплитуды колебаний в процессе нагружения. Особенно остро этот вопрос стоит при использовании резонансного режима, так как изменение амплитуды колебаний может быть вызвано как изменением акустической мощности, подводимой к образцу, так и несовпадением частоты механического резонанса колебательной системы, обладающей острой характеристикой, с частотой тока генератора применяемого в схеме с независимым возбуждением. В связи с этим используются установки с автоколебательным режимом работы, позволяющие по изменению резонансной частоты отслеживать кинетику повреждаемости образца [8, 10].

После термической и химико-термической обработки с целью снятия верхнего дефектного слоя и получения необходимой величины шероховатости (Ra ~ 0,32 мкм) рабочих поверхностей образцов, их подвергали электролитическому полированию [7]. Затем производилась отбраковка по наличию поверхностных повреждений и разбиение образцов на группы по геометрическим параметрам. При измерении исходных значений физико – механических характеристик (например, электросопротивления) производилась дополнительная отбраковка при выявлении резко отличающихся результатов измерений.

Использование при реализации знакопеременного изгиба в качестве образцов балочек постоянного сечения значительно облегчило проведение эксперимента, т.к. появлялась возможность на одном образце получать множество величин циклических напряжений [11]. Улучшение механического контакта в системе и уменьшение возможности возникновения фреттинг – коррозии в заделке при длительном нагружении обеспечивалось использованием в качестве прокладок под контактные поверхности образца мелкозернистой наждачной бумаги.

Общий вид использовавшихся образцов для проведения исследований при нагружении знакопеременным изгибом приведены в соответствии с рисунком 2.

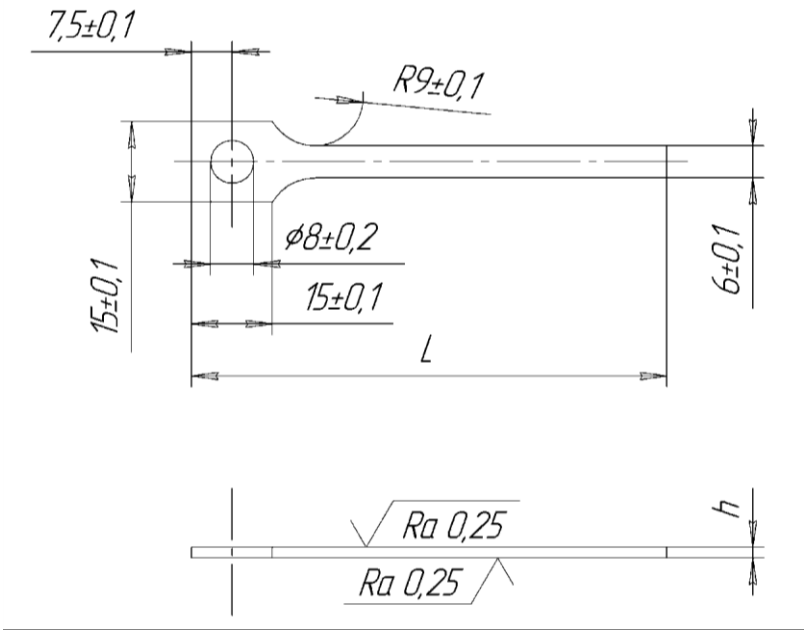


Рис. 2. Образцы для нагружения знакопеременным изгибом

При усталостных испытаниях с нагружением знакопеременным изгибом весьма актуальным является уточнение величины циклических напряжений, действующих в опасном сечении образца, действительная величина которых в значительной степени зависит от способа закрепления образцов, формы переходного участка и т.д. Использование координат характерных точек (узла колебаний – места расположения нулевой линии и пучности напряжений – места расположения усталостных трещин) позволило уточнить напряженно – деформированное состояние образца. Общий вид образца с трещиной представлен на рисунке 3.

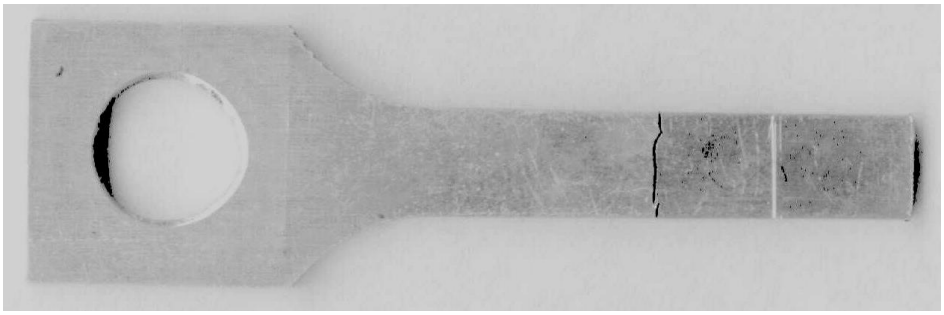


Рис. 3. Образец после нагружения знакопеременным изгибом (частота испытаний 18кГц, вторая форма собственных колебаний)

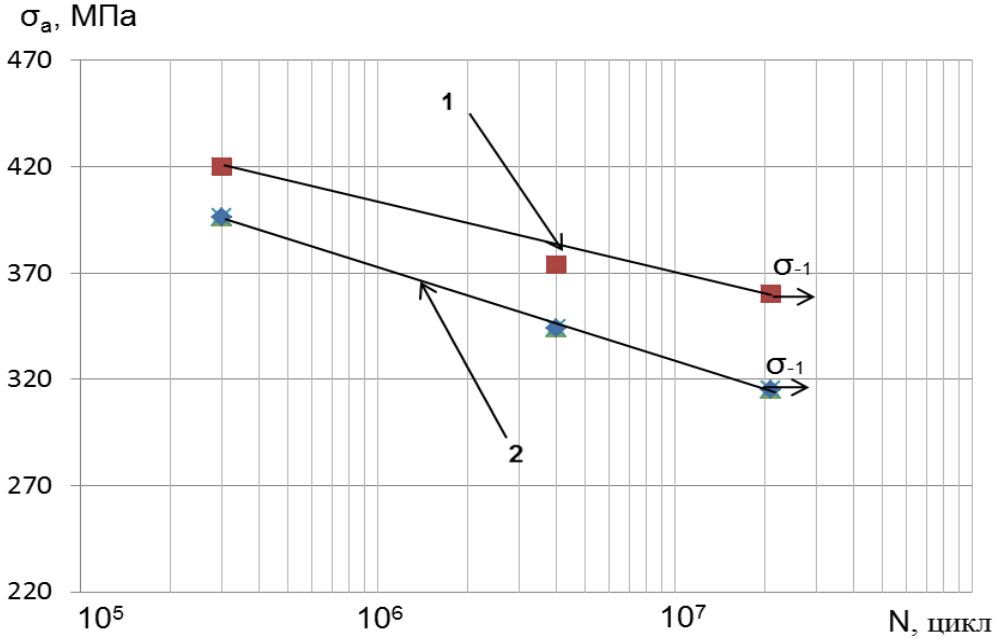
Для оценки усталостных характеристик, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 40Х, прошедших улучшение с закалкой ТВЧ, и образцов, прошедших боросилицирование, в условиях знакопеременного изгиба на частоте 17,9 кГц в условиях резонансного нагружения [5]. Нагружение всех образцов проводилось до появления усталостной

трещины заданного размера, возникновение которой оценивали по падению резонансной частоты колебаний.

Основные результаты

В ходе проведения исследований было установлено увеличение усталостных характеристик для образцов, упрочненных борированием и боросилицированием (рисунки 4 – 6). Связано это главным образом с образованием в поверхностных упрочненных слоях остаточных напряжений сжатия. С увеличением времени и температуры насыщения наблюдается снижение усталостных характеристик образцов при упрочнении борированием (рис.5). При боросилицировании отмечается незначительное уменьшение при времени насыщения 4 – 4,5 часов и температуры обработки 1050°С.

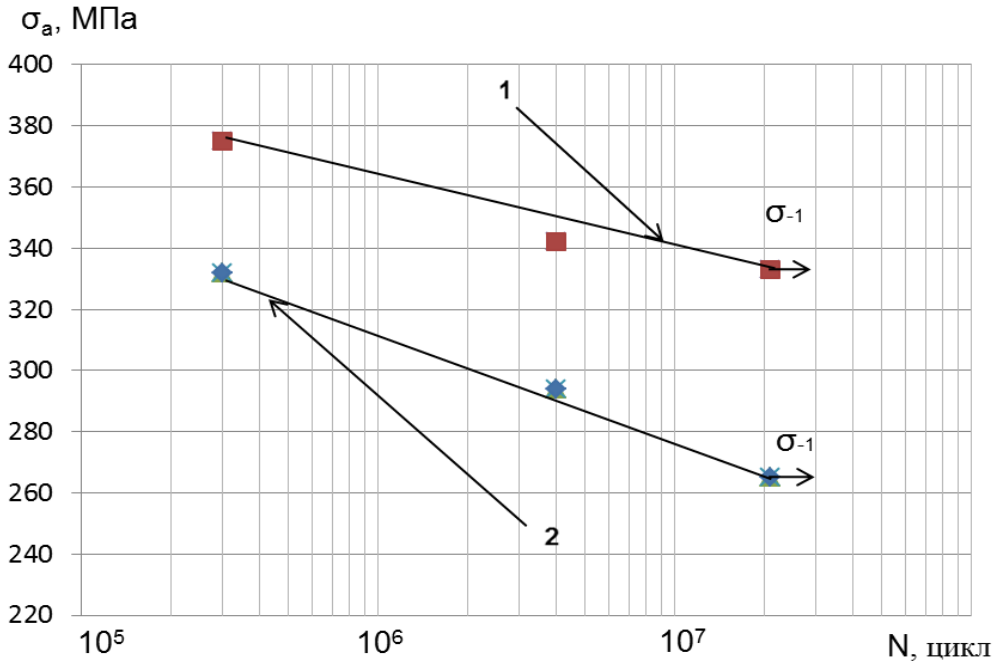
Уменьшение усталостных характеристик образцов при борировании по сравнению с боросилицированием, связано главным образом с образованием в упрочненном слое хрупкой фазы *FeB* [12]. Повышение времени обработки свыше 2,5 часов приводит к постепенному снижению величины $N_ц$ вследствие коагуляции фазы Fe_2B, а также как уже отмечалось образования в поверхностном слое фазы *FeB*. По этой причине при использовании традиционного процесса борирования (без дополнительного введения кремния) существенное снижение усталостной долговечности наблюдается уже после обработки в насыщающей смеси в течение 3,0 часов.



1 – боросилицирование, 2 – борирование

Рис. 4. Усталостные кривые образцов стали 40Х при знакопеременном изгибе (температура насыщения Т = 950°С, время упрочнения 4,5 часа)

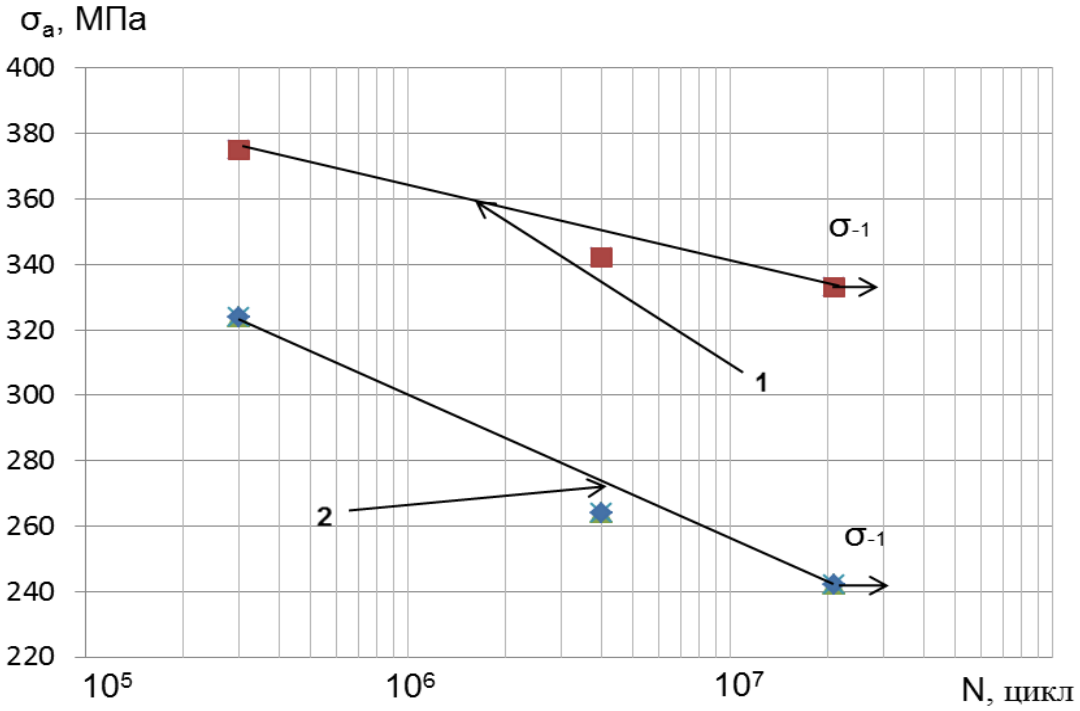
Повышение плотности поверхностного слоя, получаемого при боросилицировании, а также отсутствие фазы *FeB* приводит к существенному снижению по сравнению с борированием его микрохрупкости, что обеспечило возрастание его усталостных характеристик [14].



1 – боросилицирование, 2 – борирование

Рис. 5. Усталостные кривые образцов стали 40Х при знакопеременном изгибе (температура насыщения Т = 1050°С, время упрочнения 4,5 часа)

Преобладание в поверхностном слое фазы Fe_2B способствовало как существенному повышению $N_{ц,}$, так и стабильности данной характеристики при возрастании времени упрочнения до 3 – 4,5 часов. Высокая чувствительность упрочненных борированием поверхностных слоев к изменению температуры и времени насыщения связано как уже отмечалось выше образованием фазы *FeB*. При исследовании усталостных характеристик образцов из стали 25ХГТ было установлено их увеличение по сравнению со сталью 40Х [16-17].



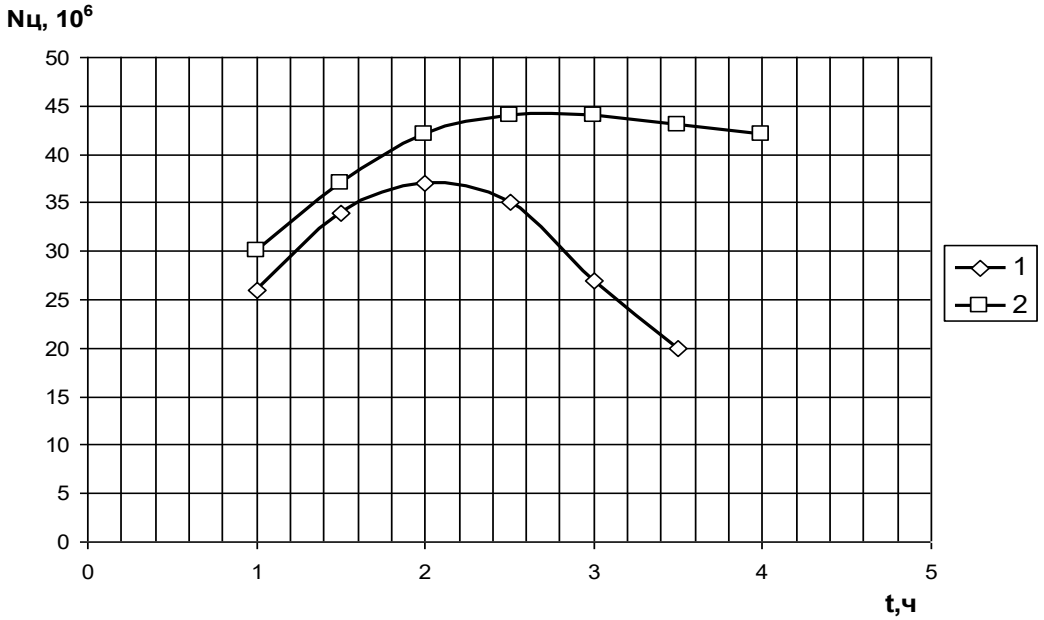
1 – боросилицирование, 2 – цементация

Рис. 6. Усталостные кривые образцов стали 40Х при знакопеременном изгибе (температура насыщения Т = 1050°С, время упрочнения 4,5 часа)

Связано это в первую очередь с содержанием в составах исследуемых сталей углерода. Установлено, что с увеличением времени и температуры насыщении при боросилицировании повышаются усталостные характеристики образцов стали 25ХГТ [17]. Увеличение усталостных характеристик связано с образованием в поверхностных слоях при боросилицировании остаточных напряжений сжатия [9].

Как видно из приведенных данных (рис. 4-6), боросилицирование обеспечивает значительный рост усталостной долговечности при различных уровнях нагружения, что можно объяснить наличием значительных напряжений сжатия в поверхностном слое [9]. Следует отметить, что данный процесс благоприятно влияет на усталостные характеристики как традиционно цементуемой стали 25ХГТ [17], так и среднеуглеродистой стали 40Х, что свидетельствует о его универсальности и возможности замены ряда сталей на менее дорогие и дефицитные.

Также в ходе испытаний в условиях знакопеременного изгиба были определены оптимальные параметры по температуре насыщения и времени насыщения образцов при борировании и боросилицировании (рис. 7).



1 – борирование, 2 – боросилицирование

Рис. 7. Влияние состава смеси и длительности поверхностного упрочнения на усталостные характеристики стали 40 Х

Выводы

Таким образом, было установлено, что в связи со значительной длительностью и трудоемкостью традиционных низкочастотных испытаний применяемых в настоящее время упрочненных образцов конструкционных сталей, использование методики ускоренного определения характеристик усталости является наиболее актуальной.

Для оценки усталостных характеристик, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 40Х в условиях знакопеременного изгиба на частоте 17,9 кГц в условиях резонансного нагружения.

Установлено, что оптимальным для повышения усталостных характеристик при борировании является время насыщения 1,5-2,5 часа при температуре процесса 900-1050^{o}С. При этом образуется упрочненный слой толщиной 70-100 мкм достаточной для работы зубчатых передач трансмиссий в условиях интенсивного изнашивания и динамических нагрузок.

Повышение времени обработки свыше 2,5 часов приводит к постепенному снижению величины $N_{ц}$ вследствие коагуляции фазы Fe_2B, а также образования в поверхностном слое фазы FeB, обладающей повышенной хрупкостью [14]. По этой причине при использовании традиционного процесса борирования существенное снижение усталостной долговечности наблюдается уже после обработки в насыщающей смеси в течение 3,0 часов вследствие образования крупных

игл FeB и общей разрыхленности поверхностного слоя, выявляемой микроструктурным анализом.

Повышение плотности поверхностного слоя, получаемого при боросилицировании, существенное снижение по сравнению с борированием, его микрохрупкости обеспечило возрастание усталостных характеристик. Преобладание в поверхностном слое фазы Fe_2B обеспечило как существенное повышение $N_ц$ так и стабильность данной характеристики при возрастании времени упрочнения до 3-4 часов, что может быть необходимым для получения более толстого диффузионного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Naizabekov A., Lezhnev S., Volokitina I., Panin E., Pishchov M., Belsky S. Investigation of the effect of combined thermomechanical processing on the brass microstructure evolution and the microhardness change // Metalurgija, 63 (2024) –283-286.

[2] Andrey Volokitin, Irina Volokitina, Abdrakhman Naizabekov, Dmitry Kuis, Sergey Lezhnev, Evgeniy Panin FATIGUE PROPERTIES AND TRIBOLOGICAL TESTS OF AISI 316 STEEL AFTER HIGH PRESSURE TORSION // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 58, 2, 2023, 412-419.

[3] Stepankin, I., Naizabekov, A., Kuis, D., Lezhnev, S., Panin, E. Universal method for compact fatigue determination // MethodsX, 14, 2025, 7 pages.

[4] Бельский С.Е., Пищов М.Н., Адель Рашид. Исследование процесса развития усталостного разрушения конструкционных сталей с поверхностным упрочнением // Республиканский межведомственный сборник научных трудов: Машиностроение, Минск. – 2024. С. 254-259.

[5] Царук, Ф.Ф. К методике исследования усталостных свойств конструкционных материалов./ Ф.Ф.Царук, С.Е.Бельский, А.В.Блохин //Труды БГТУ, серия П. 2004. Вып. XI. - С. 233-236.

[6] Блохин, А.В. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования. / А.В.Блохин, Ф.Ф.Царук, Н.А.Гайдук//Труды БГТУ, серия П, Мн., вып. X. - С.213-215.

[7] Бельский, С.Е. Влияние параметров диффузионного упрочнения на шероховатость поверхности обработанных деталей и стабильность их размеров // Труды БГТУ. Сер.II лесн. и деревообраб. пром-сти. 2002. - Вып. X. - С. 204-207.

[8] Довгялло, И.Г. Влияние механических колебаний на качество диффузионного слоя стальных деталей при низкотемпературной карбонитрации. / И.Г.Довгялло, Б.А.Каледин, А.И.Сурус,

С.Е.Бельский // Труды БГТУ. Сер.II лесн. и деревообраб. пром-сти. 2000. - Вып. II. - С. 207-213.
[9] Пищов М.Н. Исследование в поверхностных упрочненных слоях конструкционных сталей остаточных напряжений / М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.2033-206.
[10] Пищов М.Н. Влияние высокочастотных механических колебаний при поверхностном упрочнении на формирование и структуру упрочненных слоев конструкционных сталей. / М.Н. Пищов, С.Е.Бельский, А.И.Сурус // Литье и металлургия. 2003. - № 2. - С.124-127.
[11] Блохин, А.В. Разработка конструкции крепления образца для усталостных испытаний в условиях знакопеременного изгиба / А.В.Блохин, С.Е. Бельский, М.Н. Пищов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.313-316.
[12] Бельский, С.Е. Влияние состава насыщающей смеси при комплексном борировании на структуру и свойства поверхностных слоев / Бельский, М.Н. Пищов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 88-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 24 января–16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. С.288-303.
[13] Симанович, В.А. Особенности эксплуатационных режимов нагружения лесных агрегатных машин / В.А. Симанович, М.Н. Пищов, А.И. Смеян // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 77–78.
[14] Григоров, П.К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, А.И. Катханов // Повышение надежности и долговечности деталей машин. – Ростов на Дону, 1972. – Вып. 16. – С. 97–98.
[15] Макаревич, С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов / С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 327–330.
[16] Ситкевич, М.В. Структура и свойства поверхностных слоев зубчатых передач, упрочненных комплексным борированием / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Технологии ремонта, восстановления и

упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2008 г. – СПб., 2008. – Ч. 2. – С. 346–353.
[17] Ситкевич, М.В. Влияние комплексного боридного упрочнения на структуру и свойства поверхностных слоев сталей для изготовления деталей зубчатых передач трелевочных лесных машин / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Литье и металлургия. – 2008. – С. 140–146.

M.N. Pishchov, S.E. Belsky

STUDY OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEELS WITH HARDENED LAYERS AND COATINGS

Belarusian State Technological University Republic of Belarus, Minsk

Abstract

The article studies changes in a number of physical and mechanical characteristics of structural steel during fatigue testing. The tests were carried out under alternating bending conditions using different loading frequencies of 3.0 kHz - 18.0 kHz on samples that had undergone surface hardening by borosilicate coating. The fatigue characteristics of structural steels with hardened layers and coatings were studied at different temperature-time parameters of the hardening process. It was determined that in order to ensure an increased service life of machine parts operating under high dynamic loads, it is necessary to use hardening methods that make it possible to obtain hardened layers with high hardness, wear resistance and fatigue characteristics. It was established that the proposed surface hardening process does not fundamentally change the features of the development of fatigue damage to structural steel in the considered range of test frequencies. *Key words:* surface layers, samples, hardness, structural steels, testing, fatigue failure, fatigue cracks, surface hardening, microhardness, dislocations.

REFERENCES

[1] Naizabekov A., Lezhnev S., Volokitina I., Panin E., Pishchov M., Belsky S. Investigation of the effect of combined thermomechanical processing on the brass microstructure evolution and the microhardness change // Metalurgija, 63 (2024) –283-286.
[2] Andrey Volokitin, Irina Volokitina, Abdrakhman Naizabekov, Dmitry Kuis, Sergey Lezhnev, Evgeniy Panin FATIGUE PROPERTIES AND

TRIBOLOGICAL TESTS OF AISI 316 STEEL AFTER HIGH PRESSURE TORSION // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 58, 2, 2023, 412-419.
[3] Stepankin, I., Naizabekov, A., Kuis, D., Lezhnev, S., Panin, E. Universal method for compact fatigue determination // MethodsX, 14, 2025, 7 pages.
[4] Belsky S.E., Pishov M.N., Adel Rashid. Study of the process of fatigue failure development in structural steels with surface hardening // Republican interdepartmental collection of scientific papers: Mechanical Engineering, Minsk. - 2024. Pp. 254-259.
[5] Tsaruk, F.F. On the methodology for studying the fatigue properties of structural materials. / F.F. Tsaruk, S.E. Belsky, A.V. Blokhin // Proceedings of BSTU, series P. 2004. Issue XI. - Pp. 233-236.
[6] Blokhin, A.V. Complex of equipment for fatigue testing of process equipment elements. / A.V. Blokhin, F.F. Tsaruk, N.A. Gaiduk // Proceedings of BSTU, series P, Mn., issue. X. - P.213-215.
[7] Bel'skiy, S.E. Influence of diffusion hardening parameters on the surface roughness of processed parts and stability of their dimensions // Proceedings of BSTU. Series II forestry and woodworking industry. 2002. - Issue X. - P.204-207.
[8] Dovgyallo, I.G. Influence of mechanical vibrations on the quality of the diffusion layer of steel parts during low-temperature carbonitriding. / I.G.Dovgyallo, B.A.Kaledin, A.I.Surus, S.E.Bel'skiy // Proceedings of BSTU. Series II forestry and woodworking industry. 2000. - Issue II. - P.207-213.
[9] Pishchev M.N. Study of residual stresses in surface hardened layers of structural steels / M.N. Pishchov, S.E. Belsky // Forest engineering, materials science and design: Proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024 – Minsk: BSTU, 2024. Pp.2033–206.
[10] Pishchov M.N. Effect of high-frequency mechanical vibrations during surface hardening on the formation and structure of hardened layers of structural steels. / M.N. Pishchov, S.E. Belsky, A.I. Surus // Casting and metallurgy. 2003. – No. 2. – Pp.124–127.
[11] Blokhin, A.V. Development of a sample fastening design for fatigue testing under alternating bending conditions / A.V. Blokhin, S.E. Belsky, M.N. Pishchov // Forest engineering, materials science and design: materials of the 88th scientific and technical conference of the faculty, research staff and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024. – Minsk: BSTU, 2024. pp. 313–316.
[12] Belsky, S.E. Influence of the composition of the saturating mixture during complex boriding on the structure and properties of surface layers / Belsky, M.N. Pishchov // Forest engineering, materials science and design:

materials of the 88th scientific and technical conference of the faculty, research staff and postgraduate students, Minsk, January 24–February 16, 2024. – Minsk: BSTU, 2024. pp. 288–303.
[13] Simanovich, V.A. Features of operational loading modes of forestry aggregate machines / V.A. Simanovich, M.N. Pishchev, A.I. Smeyan // Proceedings of BSTU. Series. II, Forestry and woodworking industry. - 2007. - Issue XV. - Pp. 77-78.
[14] Grigorov, P.K. Methodology for determining the brittleness of the borated layer / P.K. Grigorov, A.I. Katkhanov // Improving the reliability and durability of machine parts. - Rostov-on-Don, 1972. - Issue 16. - Pp. 97-98.
[15] Makarevich, S.S. Model of the stress state of the teeth of transmission parts of skidder tractors / S.S. Makarevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Proceedings of BSTU. Series. II, Forestry and woodworking industry. – 2009. – Issue XVII. – P. 327–330.
[16] Sitkevich, M.V. Structure and properties of surface layers of gears strengthened by complex boriding / M.V. Sitkevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Technologies of repair, restoration and strengthening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological tooling: Proc. 10th Int. scientific-practical. conf., St. Petersburg, April 15–18, 2008 – St. Petersburg, 2008. – Part 2. – P. 346–353.
[17] Sitkevich, M.V. The influence of complex boride hardening on the structure and properties of surface layers of steels for the manufacture of gear parts for forestry skidding machines / M.V. Sitkevich, M.N. Pishchev, S.E. Belsky // Casting and metallurgy. - 2008. - P. 140-146.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.77.07
doi:10.18720/SPBPU/2/id-161

П.А. Кузнецов[1], К.В. Лепетан[2], А.О. Просторова[3], В.П. Третьяков[4], В.Г. Теплухин[5]

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ ПРИ ЭЛАСТОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ



[1]Павел Алексеевич Кузнецов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: pa-kuznetsov@yandex.ru



[2]Кирилл Владимирович Лепетан,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: lepetan_k@mail.ru



[3]Александра Олеговна Просторова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: prostorova_ao@spbstu.ru



[4]Валерий Павлович Третьяков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: tretyakov_vp@spbstu.ru



[5]Василий Гельевич Теплухин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: v.teplukhin@onti.spbstu.ru

Аннотация

В работе обоснована перспективность применения двухкомпонентных литьевых полиуретанов для получения изделий из металлических порошков

эластостатическим прессованием (ЭСП). Приведены результаты применения двухкомпонентного литьевого полиуретана Силагерм 6070П для получения порошковых деталей типа "конус". Формообразующие элементы оснастки для литья эластичной пресс-формы изготавливались с помощью 3D-печати. Представлены принципиальные схемы и эскизы пресс-форм для эластостатического прессования типовых изделий из порошков – шаров и ступенчатых втулок.

Ключевые слова: эластомер, полиуретан, прессование, металлический порошок

Введение

Полиуретаны (синтетические эластомеры) нашли широкое применение в промышленности благодаря широкому диапазону свойств, в том числе прочностных характеристик. Механические свойства полиуретанов изменяются в очень широких пределах и зависят от природы и длины участков цепи между уретановыми группами, структуры цепей (линейная или сетчатая), молекулярной массы и степени кристалличности.

Для получения полиуретана применяется сложное высокотехнологичное оборудование и специальные технологии, позволяющие получить сырье с определенными характеристиками [1-4]. Материал может иметь и разную форму – вспененный, жидкий, напыляемый. В качестве конструкционного материала наиболее востребован твердый полиуретан – листовой, в виде стержней или пластин.

Двухкомпонентный полиуретан получают смешиванием двух компонентов. В качестве первого компонента используются различные изоцианатные соединения, в качестве второго – соединения, содержащие гидроксильные группы [2]. При смешивании компонентов происходит полимеризация. Горячая полимеризация осуществляется в условиях высоких температур, холодная – в условиях обычной температуры окружающей среды. Наиболее технологичен для изготовления деталей из полиуретана метод литья, при котором не требуются большие усилия и высоко технологичное оборудование.

Особо следует выделить литьевые полиуретаны, полимеризация которых проходит при комнатной температуре. К таким полиуретанам относится литьевой двухкомпонентный полиуретан Силагерм 6070П, предназначенный для изготовления эластичных форм под бетонное, гипсовое литьё; изготовления высокопрочных и износостойких изделий, работающих в условиях воздействия агрессивных сред. Вакуумная дегазация не обязательна. Физико-механические свойства полиуретана Силагерм 6070П представлены в таблице 1 [2]. Физические и химические свойства двухкомпонентного полиуретана обеспечивают его применение

при интенсивных нагрузках, характерных для обработки материалов давлением — листовой штамповке, прессовании порошков и др.

Таблица 1. Физико-механические свойства полиуретана марки Силагерм 6070П

Физико-механические свойства	Значение
Твёрдость по Шору А, усл.ед	68-75
Допустимая температура эксплуатации, °С	-20 – +60
Кратковременное повышение температуры, до °С	+80
Относительное удлинение при разрыве, % не менее	550-750
Относительная остаточная деформация, % не более	8-12
Удельный вес (плотность), г/см^3	1,04
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	8,0-15,0
Усадка при полимеризации, % менее	0,1

При прессовании порошков [5] к полиуретановым материалам предъявляются особые требования, а именно: высокая стойкость к истиранию, высокие показатели твердости, высокая прочность на разрыв, требуемая для реализации значительной деформации, особенно при прессовании порошков с малой насыпной плотностью и с большим коэффициентом уплотнения; восстановление исходной формы и геометрических размеров после снятия деформации, необходимое для получения точных заготовок и др.

Благодаря уникальным характеристикам полиуретанов, сочетающим высокую эластичность со значительной твердостью, применение литьевых материалов перспективно для прессования самых различных изделий из порошков эластичными средами, то есть эластостатическим прессованием (ЭСП) [6-8].

На рисунке 1 представлены принципиальные схемы типовых пресс-форм для эластостатического прессования порошков в простых или составных формах. На рис. 1,а показано ЭСП в простых эластичных матрицах, которое осуществляют следующим образом [9]. Эластичные матрицы 4 и 5 помещают в контейнер 2 на опору 6. Внутреннюю полость в эластичных полуматрицах заполняют порошком 3.

Усилие пресса Р через верхний пуансон 1 передается на эластичные матрицы 4 и 5, которые создают квазиизостатическое давление в порошке 3,

под действием которого порошок равномерно уплотняется.

На рисунке 1,б представлена принципиальная схема составной пресс-формы для прессования ступенчатой конической втулки [9]. Пресс-форма работает следующим образом. Жесткий контейнер 1 устанавливают на жесткую опору 3. В отверстие жесткой опоры 3 вводят нижний пуансон 4 с входящим в его отверстие оправку 5.

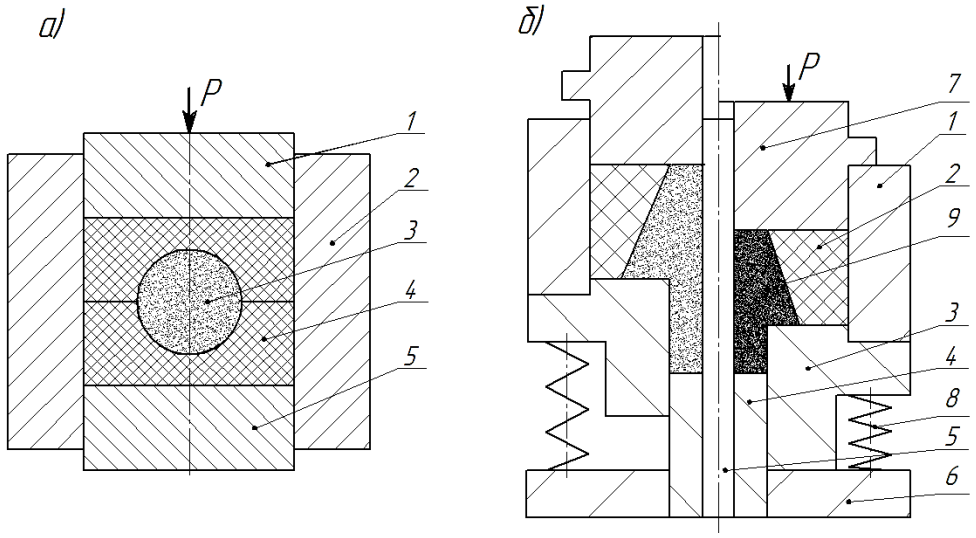


Рис. 1. Принципиальные схемы типовых пресс-форм для эластостатического прессования порошков: а) в простых эластичных матрицах, б) в составной эластичной и жесткой пресс-форме: 1 – жесткий контейнер, 2 – эластичная матрица, 3 – жесткая опора, 4 – нижний пуансон, 5 – оправка, 6 – плита, 7 – верхний пуансон, 8 – пружина, 9 – прессовка.

Жесткую опору 3 с жестким контейнером 1, нижний пуансон 4 с оправкой 5 устанавливают на пружины 9 и плиту 6. Полость между внутренней поверхностью эластичной матрицы 2, внутренней поверхностью жесткой опоры 3, оправкой 5 и торцом нижнего пуансона 4 является камерой засыпки порошка для прессуемого изделия. Порошок засыпается в указанную полость, рабочий объём обоймы замыкается верхним пуансоном 7, который одевается на оправку 5 и при этом вводится в жесткий контейнер 1 (на левой части рисунка). Пресс-форму в сборе помещают на стол гидравлического пресса. Усилие от траверсы пресса P прикладывается к верхнему пуансону 7 и передается на эластичную матрицу 2 и порошок. В процессе движения траверсы происходит сжатие пружин 8, опускание жесткого контейнера 1 и прессование нижней части прессовки 9 (на правой части рисунка). Благодаря эффекту «плавающей матрицы» и созданию в эластичной среде квазиизостатического давления плотность прессовки по объёму выравнивается. В конце процесса прессования жесткая опора 3 упирается в плиту 6. После снятия нагрузки пресс-форма разбирается, готовая прессовка 9 извлекается из жесткой обоймы 3 и эластичной матрицы 4.

Простота изготовления эластичных элементов обеспечивает

эффективность использования технологии ЭСП в мелкосерийном и даже в опытном производстве.

Методы

Технология изготовления эластичных матриц из двухкомпонентного полиуретана включает в себя операции: подготовка оснастки для заливки (покрытия контактирующих поверхностей восковым разделителем), изготовления двухкомпонентной смеси, заливка полученной смеси в подготовленную оснастку, полимеризация в течение 6-12 часов при комнатной температуре. После завершения полимеризации полиуретановую матрицу извлекают из оснастки.

На рисунке 2,а показана принципиальная схема оснастки для отливки эластичных полуматриц из литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П, а на рисунке 2,б – принципиальная схема пресс-формы для ЭСП образцов «конус». Процесс прессования осуществляют следующим образом (рис.2, б).

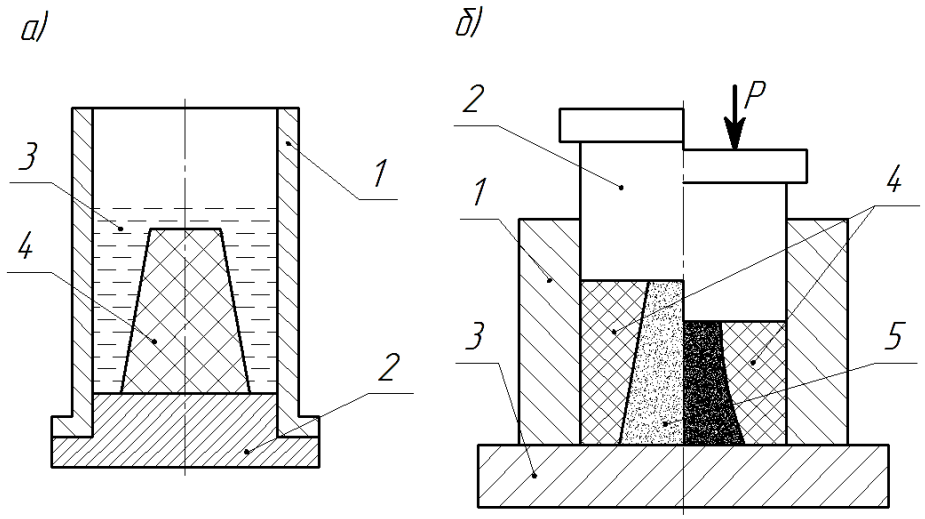


Рис. 2. Принципиальные схемы: а) оснастки для отливки эластичных полуматриц из литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П : 1 – жёсткий контейнер для заливки, 2 – основание, 3 – двухкомпонентный полиуретан, 4 – «напечатанная» конусовидная оправка; б) принципиальная схема пресс-формы для ЭСП образцов «конус»: 1– контейнер, 2 – пуансон, 3 опора, 4 – эластичная матрица, 5 – порошок.

Жесткий контейнер 1 устанавливают на жесткую опору 3. В полость контейнера на опору устанавливают эластичную матрицу 4. Полость между внутренней поверхностью эластичной матрицы 4 и внутренней поверхностью жесткой опоры 3 является камерой засыпки порошка для прессуемого изделия. Порошок 5 засыпается в указанную полость, рабочий объём контейнера замыкается верхним пуансоном 2, который вводится в отверстие жесткого контейнера 1. Оснастку устанавливают на стол

гидравлического пресса и с заданным усилием Р осуществляют прессование образца.

Низкая трудоёмкость изготовления формующих эластичных элементов обеспечивает возможность применения технологии порошковой металлургии не только в серийном, но также в мелкосерийном и опытном производстве. Оснастка для литья эластичных элементов достаточна проста в изготовлении и использовании.

Целью исследования являлся анализ технологических возможностей использования литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П для прессования металлического порошка марки АНС 100.29.

Результаты

Образцы, полученные прессованием в эластичной матрице, показаны на рисунке 3,а. Исследование подтвердило возможность эффективного использования литьевого полиуретана марки Силагерм 6070П при прессовании порошков. Ожидаемая стойкость эластичных матриц лежит в пределах тысяч штук.

Детали в виде усеченного конуса являются характерной деталью, которую трудно получить в жесткой пресс-форме, но можно получить прессованием в эластичной среде. При ЭСП изделий из порошков важной задачей является расчет геометрических размеров проектируемой эластичной матрицы.

а) *б)*

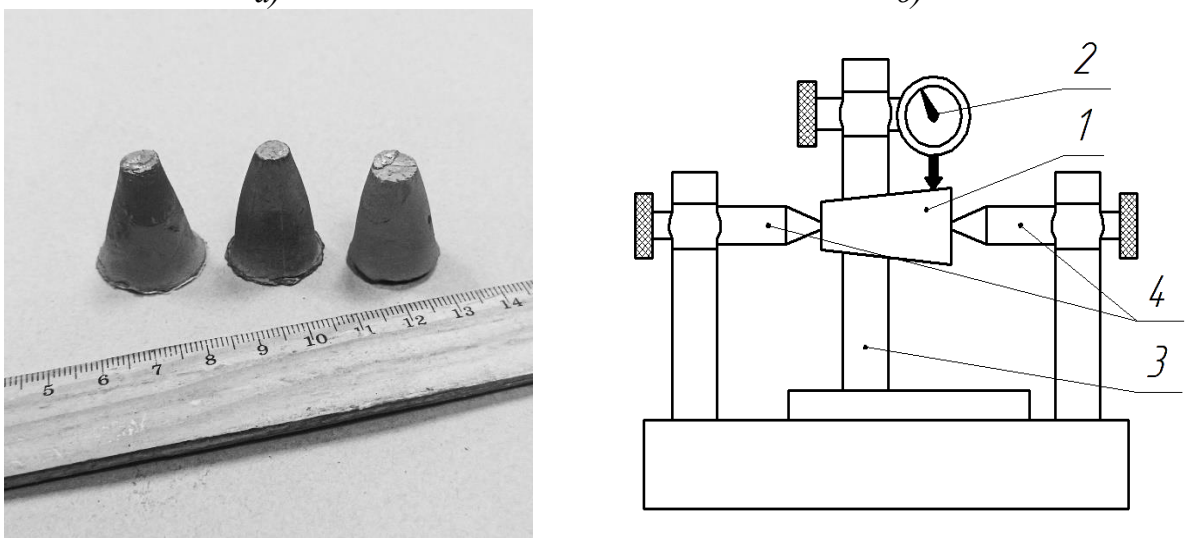


Рис. 3. а) образцы типа «конус», полученные методом ЭСП; б) принципиальная схема измерения размеров спрессованного образца «конус»; 1 – спрессованный образец, 2 – индикатор, 3 – стойка для индикатора, 4 – конусные центры.

Учесть все особенности и параметры процесса даже при моделировании деформации полиуретана и одновременного уплотнении

порошка затруднительно [10-12]. В ряде случаев приемлемого результата можно добиться экспериментальным путем. Методика корректировки размеров полиуретановой матрицы показана на образце типа «конус». На рис. 3,б показана принципиальная схема измерения размеров спрессованного образца «конус». Форма спрессованного образца практически повторяет форму внутренней поверхности эластичной матрицы в момент окончания процесса прессования. Следовательно, измеряя форму и размеры спрессованного образца, можно анализировать поведение эластичного материала при его деформации.

На рисунке 4 показаны графические результаты измерения образцов «конус», полученных прессованием в эластичной матрице. Линия 1 – образующая внутренней поверхности эластичной матрицы в начальном ненагруженном состоянии, линия 2 – образующая линия внутренней поверхности матрицы при прессовании.

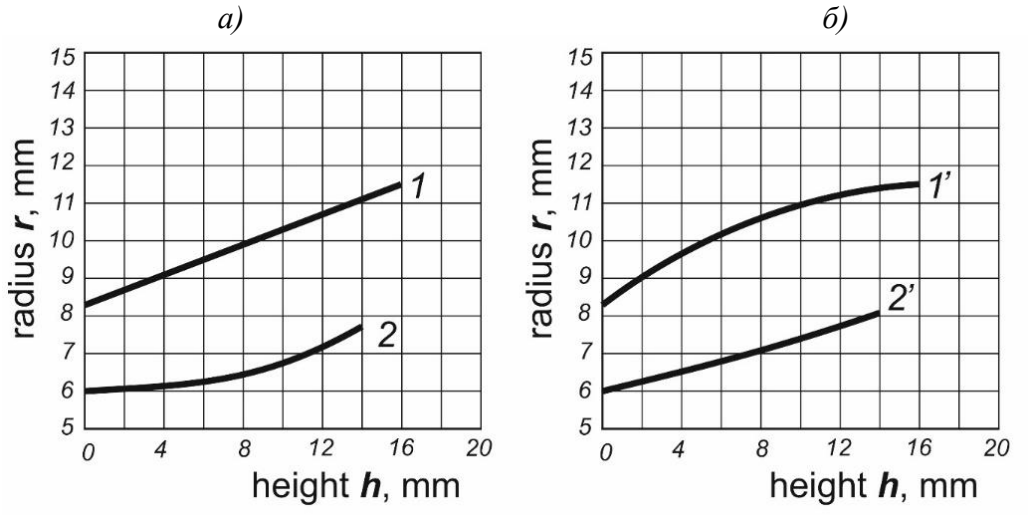


Рис. 4. Графические результаты измерения образцов «конус», полученных прессованием: а – в предварительной эластичной форме; б – в скорректированной эластичной форме.

На рис. 4,а видно, что если в предварительной эластичной матрице образующая линия прямая, то при прессовании внутренняя поверхность искажается, а форма прессовки получается с вогнутой боковой поверхностью. Результаты измерений позволяют оценить величину вогнутости и внести коррективы в эластичную матрицу либо проточив её, либо изготовив новую.

На рис. 4,б представлены измерения, проведенные после прессования порошка в скорректированной матрице. В этом случае внутренняя поверхность эластичной матрицы вогнутая. Путем последовательных приближений нетрудно добиться, чтобы конус на спрессованном образце стал прямым. Следовательно, использование литьевых полиуретанов

позволит получать более точные детали и снизить трудоёмкость их изготовления.

Обсуждение

Эластостатическое прессование точных профилированных заготовок и деталей из порошков несомненно расширится при использовании литьевых полиуретанов [13-15]. Этому будет способствовать улучшение технологичности метода, в том числе быстрое изготовление опытных пресс-форм. Важным моментом является появление новых недорогих полиуретановых материалов, обладающих характеристиками, востребованными именно для прессования порошков, например, низкой относительной остаточной деформацией после снятия нагрузки. Кроме того, следует отметить, что достоинством технологии является возможность получения элементов с различными технологическими свойствами, в том числе различной твёрдости по Шору. Например, в составной оснастке твердость различных эластичных элементов может варьироваться от 85-90 ед. до 60-65 ед. по Шору А, что может использоваться для управления процессом уплотнения порошка.

Заключение

- Анализ технической и патентной литературы показывает, что использование полиуретанов в качестве формообразующей среды при прессовании порошковых материалов является высокоэффективным и экономически целесообразным методом;
- Уникальные физико-механические характеристики полиуретанов обеспечивают высокую стойкость пресс-форм, достаточную точность и низкую шероховатость поверхности получаемых прессовок, которые могут быть использованы как точные профилированные заготовки и детали;
- Исследованный вариант гибкой технологии, включающий изготовление оснастки для отливки на фотопринтере, подготовку двухкомпонентной смеси требуемого состава, заливку смеси в оснастку и её полимеризацию при комнатной температуре, подтвердил возможность применения такой технологии как в мелкосерийном, так и опытном производстве;
- Метод литья двухкомпонентных полиуретанов позволяет изготавливать эластичные элементы оснастки для прессования порошков самой сложной конфигурации и больших размеров, что существенно расширяет номенклатуру прессуемых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Райт П., Камминг А. Полиуретановые эластомеры. «Химия». Ленинград. 1973. 340 с.

[2] Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. М.: Додэка-XXI. 2004. 320 с.

[3] Круль Л.П. Об агрегатных состояниях полимеров. Полимерные материалы и технологии. 2022. 8(4). С. 5.

[4] Попович А.А. Перспективные материалы и технологии аддитивного производства. Т.1. Новые материалы для аддитивных технологий. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2023. – 346 с.

[5] Цзычжао Х., Алишин Т.Р. Изучение деформации металлических порошков в процессе квазиизостатического прессования. Перспективы развития фундаментальных наук (Томск). 2022. 1. С. 203-205.

[6] Deli, L. The quasi-isostatic pressing method of ceramic products. Shandong Ceramics. 2003. 26(004). pp. 24-28.

[7] Timokhova, M. Industnal technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing. Refractories and Industrial Ceramics. 2011. 52(6). pp. 389-392.

[8] Timokhova, M. Some features of the method of quasi-isostatic pressing of ceramic and refractory products. New Refract. 2019. 3. pp. 17-20.

[9] Кузнецов П.А., Просторова А.О., Радкевич М.М. Устройство для прессования трубчатых ступенчатых изделий из порошков. Патент РФ RU 217620 U1. 2023. 10. Бюллетень ФСИС.

[10] Jonsen, P., Haggblad, H., Gustafsson, G. Modelling the non-linear elastic behavior and fracture of metal powder compacts. Powder Technology. 284. 2015. pp. 496-503.

[11] Lezhnev, A., Naizabekov, A., Volokitin, A., Volokitina, I., Panin, E., Knapinski, M. Development and research of combined process of equal channel angular pressing – drawing. J. Chem. Technol. Metall. 2017. 52. pp. 172-179.

[12] Lipin, V.A., Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Karzina, Yu.S. Junction Adhesion Strength in a Layer of Aluminum-Carbon-Fiber Composite Material. Fibre Chemistry. 2024. 56. pp. 72-75.

[13] Vinokurova, A.A., Poletaev, A.P., Kotov, S.A., Parshikov, R.A., Ganin, S.V. Investigation of Pressing and Sintering Processes of Powder Copper Samples for Equal Channel Angular Pressing. Key Engineering Materials. 2023. 941. pp. 129-134.

[14] Kuznetsov, P., Kuznetsov, R., Lepetan, K. Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 200-206.

[15] Kuznetsov, P., Prostorova, A., Kuznetsov R., Tretyakov, V. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts. 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 180-186.

P.A. Kuznetsov, K.V. Lepetan, A.O. Prostorova, V.P. Tretyakov, V.G. Teplukhin[1]

BEHAVIOR OF TWO-COMPONENT POLYURETHANES IN THE ELASTOSTATIC PRESSING OF METAL POWDERS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

We discuss the prospects of using two-component injection-molded polyurethanes to produce products from metal powders by elastostatic pressing (ESP). The results of the application of two-component injection molded polyurethane Silaherm 6070P for the production of powder parts of the "cone" type are presented. The forming elements of the tooling for casting an elastic mold were made using 3D printing. Schematic diagrams and sketches of molds for elastostatic pressing of typical products made of powder balls and stepped bushings are developed.

Key words: elastomer, polyurethane, pressing, metal powder

REFERENCES

[1] Rait, P., Kamming, A. Polyurethane elastomers. "Chemistry". Leningrad. 1973. 340 p. (rus.)
[2] Bolton, W. Structural materials: metals, alloys, polymers, ceramics, composites. Moscow: Dodeka-XXI. 2004. 320 p. (rus.)
[3] Krul, L.P. About the aggregate states of polymers. 2022. Polymer materials and technologies. 8(4). p. 5. (rus.)
[4] Popovich, A.A. Promising materials and technologies of additive manufacturing. V. 1. New materials for additive technologies. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS. 2023. 346 p. (rus.)
[5] Jizhao, H., Alishin, T.R. Study of deformation of metal powders in the process of quasi-isostatic pressing. 2022. Prospects for the development of fundamental sciences (Tomsk). 1. pp. 203-205. (rus.)
[6] Deli, L. The quasi-isostatic pressing method of ceramic products. 2003. Shandong Ceramics. 26(004). pp. 24-28.

[7] Timokhova, M. Industnal technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing. 2011. Refractories and Industrial Ceramics. 52(6). pp. 389-392.
[8] Timokhova, M. Some features of the method of quasi-isostatic pressing of ceramic and refractory products. 2019. New Refract. 3. pp. 17-20.
[9] Kuznetsov, P.A., Prostorov, A.O., Radkevich, M.M. Installation for pressing tubular products from powders. The patent of the Russian Federation 217620 U1. 2023. 10. FSIS Official Bulletin. (rus.)
[10] Jonsen, P., Haggblad, H., Gustafsson, G. Modelling the non-linear elastic behavior and fracture of metal powder compacts. 2015. Powder Technology. 284. pp. 496-503.
[11] Lezhnev, A., Naizabekov A., Volokitin, A., Volokitina, I., Panin, E., Knapinski, M. Development and research of combined process of equal channel angular pressing – drawing. 2017. J. Chem. Technol. Metall. 52. pp. 172-179.
[12] Lipin, V.A., Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Karzina, Yu.S. Junction Adhesion Strength in a Layer of Aluminum-Carbon-Fiber Composite Material. 2024. Fibre Chemistry. 56. pp. 72-75.
[13] Vinokurova, A.A., Poletaev, A.P., Kotov, S.A., Parshikov, R.A., Ganin, S.V. Investigation of Pressing and Sintering Processes of Powder Copper Samples for Equal Channel Angular Pressing. 2023. Key Engineering Materials. 941. pp. 129-134.
[14] Kuznetsov, P., Kuznetsov, R., Lepetan, K. Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 200-206.
[15] Kuznetsov, P., Prostorova, A., Kuznetsov, R., Tretyakov, V. Technology of Bimetallic Products Forming Based on Sintered Inserts. 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 180-186.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.77.04
doi:10.18720/SPBPU/2/id-162

М.М. Радкевич[1], И.С. Кузьмичев[2]

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ



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



[2]Иван Сергеевич Кузьмичев
ЗАО Фирма «АНАГАЗ»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: Megavolt2020@yandex.ru

Аннотация

В статье представлены результаты освоения технологических процессов для реализации способа электролитно-плазменного полирования деталей из сталей, меди и ее сплавов, а также базовые принципы выполнения исследований в этой области и критерии применимости, позволяющие определить целевое направление и область использования электролитно-плазменного полирования в машиностроении при решении специальных задач повышения качества поверхностей деталей.

Ключевые слова: технология, оборудование, приспособление, деталь, потенциал, электролит, плазма, полирование, шероховатость, критерии, режимы, концентрация, температура, поток, электрод, эквидистантный, локальный.

Введение

Несмотря на то, что имеется значительное количество работ, посвященных исследованию технологии обработки прецизионных поверхностей ответственных деталей методом электролитно-плазменного полирования в условиях лабораторий, они, тем не менее, не находят широкого применения в промышленных условиях. Это объясняется

отсутствием завершенных проектов разработки и эксплуатации специального оборудования для реализации данного метода финишной обработки на промышленных предприятиях. К оборудованию предъявляются особые требования, одним из которых является автоматизация технологического процесса обработки с целю обеспечения необходимого уровня производственной безопасности. Кроме того, для достижения целевого уровня качества полирования поверхностей ответственных деталей критически важно соблюдать ряд технологических режимов. В этой связи стоит вопрос оценки области применимости данной технологии. Критериями оценки возможности применения электролитно-плазменного полирования (ЭПП) для финишной обработки поверхностей деталей из различных материалов и сплавов являются условия, обеспечивающие стабильность протекания процесса в заданном диапазоне параметров технологического процесса при реализации выбранной схемы обработки.

Методы

В работе, при проектировании, использовался «КОМПАС-3D». Для исследования и проведения опытных работ использовалась разработанная экспериментальная установка «ЭЭПП-100», позволяющая посредством применения специальных приспособлений реализовать ЭПП по различным схемам обработки.

Результаты

Основные требования и критерии оценки применимости технологии ЭПП.

Определение основных требований и критериев оценки возможности применимости ЭПП является принципиально важной задачей проектирования технологических процессов и установления основных параметров и режимов обработки, которые определяются выбором той или иной схемы реализации ЭПП. При этом, учитывается состав используемого электролита, а также геометрия (конфигурация) обрабатываемых поверхностей и материал обрабатываемой детали.

Следовательно, для реализации финишной обработки поверхностей деталей методом ЭПП требуется определить из какого материала изготовлена деталь, ее габаритные размеры, а также назначить те поверхности, которые будут использованы в качестве технологических баз и мест подвода электрического потенциала. Это имеет значение при выборе состава электролита, источника постоянного тока необходимой мощности и способа крепления детали в приспособлении.

Успешное решение поставленной задачи требует базового понимания области применения выбранной технологии в которой обеспечивается

стабильный процесс полирования. Ключевым критерием получения высокого качества обработки является выбор подходящей схемы реализации ЭПП под заданную номенклатуру деталей определенной геометрии, что в свою очередь позволят оценить возможность её применения и определить основные параметры технологического процесса, а также область, их рабочих значений [1,2].

Таким образом, при проектировании (разработке) технологического процесса важно понимать, какие результаты принципиально могут быть достигнуты при выборе той или иной схемы реализации ЭПП.

Рассмотрим несколько вариантов применимости ЭПП:

1. Технологический процесс ЭПП по схеме погружения обрабатываемой детали в ванну с электролитом.

Необходимо полировать две заготовки для изготовления термопары «хромель-копель». Одна заготовка из медноникелевого сплава «копель» МНМц 43-0,5, а другая из хромоникелевого сплава «хромель» НХ 9,5. Обрабатываемые наружные поверхности заготовок представляют собой простую конфигурацию, при этом площадь поверхностей каждой заготовки не превышает (S) 15 см^2.

Такого типа задачи, удовлетворяют условиям (критериям), которые в полной мере позволяют осуществить широко применяемый в настоящее время доступный технологический процесс ЭПП, который заключается в полировании деталей методом погружения в ванну с электролитом (рис.1).

Реализация данной схемы не требует использования специального оборудования и приспособлений, при этом обработка осуществляется при стабильном протекании процесса полирования в широком диапазоне варьирования основных параметров, что обеспечивает простоту достижения требуемых показателей качества обработки [3,4].

а) *б*)

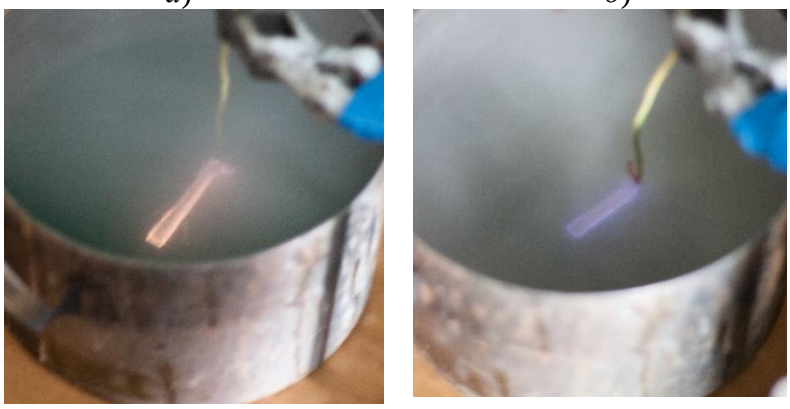


Рис. 1. Реализация технологического процесса ЭПП с погружением заготовок в электролит. а) полирование заготовки из сплава МНМц 43-0,5; б) полирование заготовки из сплава НХ 9,5.

Процесс ЭПП деталей из указанных материалов осуществляется в электролите, который представляет собой водный раствор с массовой долей сернокислого аммония (n) в пределах от 3 % до 5 %.

Примечание. Добавление в состав лимонной кислоты в количестве 0,05 % позволяет расширить область применения для полирования деталей из материалов согласно табл. 1.

Таблица 1. Состав электролита и материал деталей.

Компоненты электролита	Массовая доля компонентов, %	Материал детали
H_2O	96,95	Сталь 12Х18Н10 Медь М1, М2, М3 Латунь Л96, Л63
$(NH_4)_2SO_4$	3	
$C_6H_8O_7$	0,05	

В предложенном электролите процесс ЭПП протекает при плотности тока (j), равной 0,7 А/см^2. Значение напряжения (U) может находиться в диапазоне от 250 В до 320 В, а температура электролита (Т) в диапазоне от 70 ºС до 90 ºС.

Требуемая мощность (N, Вт) источника питания рассчитывается по формуле:

$$N = U \cdot I \cdot K, \quad (1)$$

где I – потребляемый ток, А; К = 2 – коэффициент пусковых токов.

Потребляемый ток рассчитывается по формуле:

$$I = j \cdot S \quad (2)$$

Соответственно, требуемая минимальная мощность, с учетом двукратного запаса, равна 6300 Вт для ЭПП одной заготовки с заданными техническими параметрами.

На рис. 2 представлена зависимость целевого параметра шероховатости (Ra) от двух основных варьируемых параметра, концентрации (n) и температуры (Т) электролита, оказывающих наибольше влияние на процесс полирования наружных поверхностей.

Таким образом, рациональная область применения ЭПП в которой протекает стабильный процесс обработки деталей и сопровождается снижением параметра шероховатости Ra определяется следующими значениями режимов обработки: напряжение (U) от 250 до 320 В, концентрация электролита (n) от 3 до 5 %, температура электролита (Т) от 70 до 90 ºС. Потребляемый ток, рассчитываемый по формуле 2.

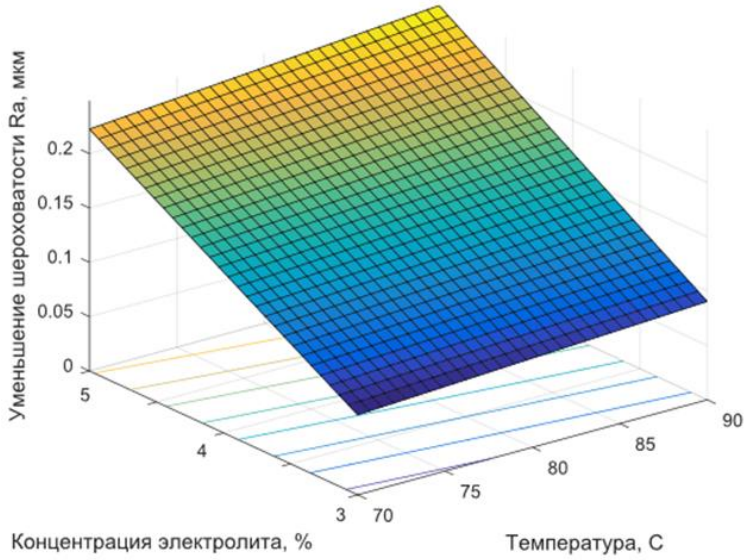


Рис. 2. График зависимости целевого параметра шероховатости (Ra, мкм) от концентрации (n, %) и температуры электролита (T, ºC).

В заданном интервале значений параметров режимов технологического процесса ЭПП обеспечивается процесс полирования деталей при исходной шероховатости поверхности Ra = 0,32 мкм до шероховатости поверхности Ra 0,23 - 0,06 мкм.

При исходной шероховатости Ra = 0,63 мкм, достигается снижение параметра Ra = 0,32 мкм, при исходной шероховатости Ra = 0,16 мкм снижается до Ra = 0,01 мкм.

2. Технологический процесс ЭПП по схеме принудительной подачи электролита в зону полирования и размещением электрода в обрабатываемом отверстии.

При производстве деталей с отверстиями появляется необходимость полирования внутренних поверхностей в таких изделиях, как трубки топливных систем, цилиндры поршневых приводов, детали волноводной техники, оружейных стволов и т.п.

В этом случае, рассмотренный выше технологический процесс ЭПП не может быть применим, в силу условий и особенностей механизма, физических явлений, которые протекают при обработке внутренних поверхностей сквозных отверстий.

Одним из основных условий реализации схемы принудительного ЭПП (ПЭПП) для поверхностей сквозных отверстий является образование пароплазменной оболочки (ППО) в межэлектродном зазоре (МЭЗ), что необходимо для стабильного протекания процесса полирования. При этом, первостепенное влияние оказывает характер кипения электролита на поверхности обрабатываемой детали. Эксперименты показали, что при обработке детали, в МЭЗ, на внутренней обрабатываемой поверхности

наблюдается два вида кипения электролита - пузырьковое или пленочное. Установлено, что процесс полирования при ПЭПП обеспечивается в случае пленочного кипения электролита, при котором осуществляется устойчивое и равномерное расплавление микровыступов поверхности обрабатываемой детали. В противном случае происходит прожигание поверхностного слоя из-за появления в МЭЗ единичных электрических разрядов, которые при определенных условиях, переходят в электрическую дугу [5, 6].

Таким образом, для обеспечения в зоне обработки пленочного кипения и, как следствие, стабильного протекания процесса ПЭПП, необходимо обеспечить условия для создания в области гальванического экранирования уровня напряженности и плотности тока, достаточных для ионизации электролита. Кроме того, интенсивность нагрева, то есть скорость повышения температуры потока электролита, прокачиваемого в МЭЗ, должна удовлетворять условию, при котором обеспечивается тепловой баланс.

Рассмотрим пример полирования внутреннего диаметра трубки изготовленной из меди марки М3. Внутренний диаметр трубки (d) 16 мм, длина (L) 100 мм.

Медь марки М3 полируется в среде электролита (табл. 1). При этом, оптимальной концентрацией электролита при полировании меди n = 3 %.

Для подключения электрического потенциала в область гальванического экрана, а также подачи электролита в МЭЗ разработано специальное приспособление, чертеж которого показан на рис. 4, а на рис. 5 конструкция приспособления. Данная конструкция обеспечивает надежное крепление заготовки, подачу электролита в обрабатываемое отверстие и поддерживает заданный уровень напряженности электрического поля благодаря электрод-катоду (ЭК), размещенного эквидистантно вдоль оси полируемого отверстия детали [7].

Диаметр ЭК выбирается исходя из представленного соотношения $\frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{катода}}} = \frac{8}{3}$.

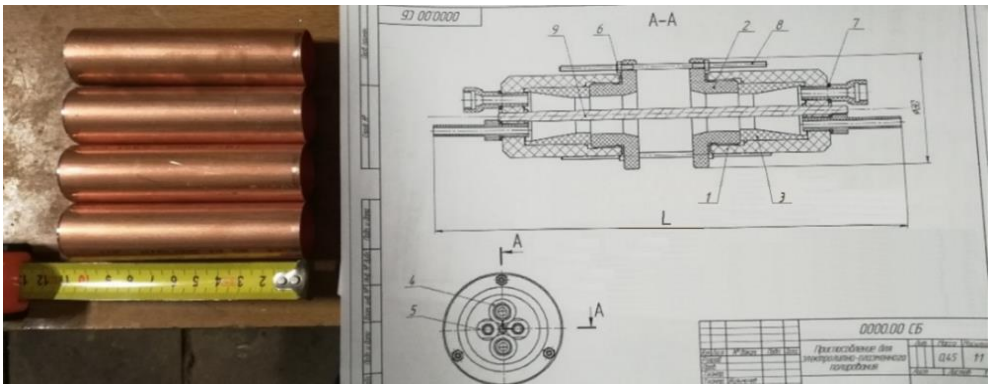


Рис. 3. Детали-образцы из меди марки М3 и чертеж приспособления.

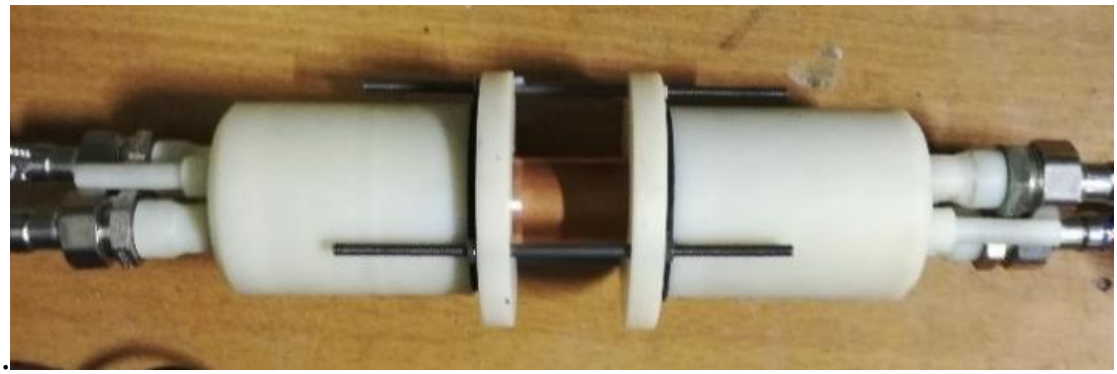


Рис. 4. Приспособление в сборе с деталью-образцом.

Расчетные значения тока I, А, исходя из площади обрабатываемой внутренней поверхности детали, находим по формуле (2), затем определяем затрачиваемую мощность по формуле (1) без учета коэффициента запаса на пусковые токи.

Следовательно, I = 35,2 А; N = 10550 Вт.

Определяем эквивалент тепловой энергии исходя из затраченной мощности электрической энергии при условии, что 1 Вт равен 1 Дж/с. Тогда выделившееся количество тепловой энергии (Q, Дж) будет равно 10550 Дж/с. Исходя из количества тепловой энергии, которая преобразуется из электрической за одну секунду, записываем уравнение теплового баланса и переходим к его решению.

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T \qquad (3)$$

где, m – масса, кг; C – удельная теплоемкость, Дж · кг · °C;

ΔT – разница между начальной температурой и температурой кипения.

На рис. 5 представлена расчетная схема определения объема полости обрабатываемого отверстия детали, в котором находится электролит.

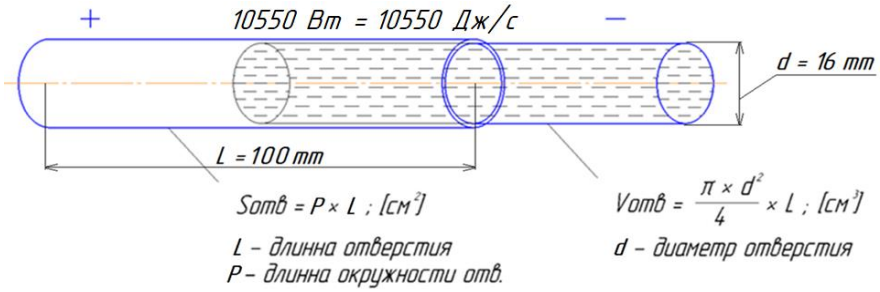


Рис. 5. Расчетная схема и характеристики зоны обработки.

Зная плотность и теплоемкость электролита определяем какое количество тепловой энергии потребуется, чтобы данный объем электролита нагреть до кипения при условии, что температура электролита на входе в обрабатываемое отверстие 70 ºС, а температура кипения 100 ºС, получаем ΔT = 30 °C. Расчетный объем канала детали равен 20 см^3 (0,021 кг).

Зная объем канала, плотность электролита ρ = 1,05 г/см^3, разность температур ΔT = 30 °C и теплоемкость C = 4100 Дж·кг·°C, по уравнению (3) определяем количество теплоты, необходимое для нагрева объема электролита в канале до температуры кипения за одну секунду, таким образом Q = 2585 Дж.

Для стабильного протекания процесса ПЭПП внутренней поверхности трубки диаметром 16 мм и длиной 100 мм затрачивается 10550 Вт электрической энергии, эквивалентной такому же значению тепловой энергии.

Соответственно, чтобы температура электролита объемом 0,02 л находилась в пределах, при которых будет иметь место пленочное кипение, необходимо прокачивать объем электролита в четыре раза больший, соответственно ν = 0,08 л/с.

Зная, что скорость потока электролита при постоянном расходе зависит от поперечного сечения межэлектродного зазора и учитывая гидравлические потери в МЭЗ расход необходимо увеличить на 25 %, согласно формуле расчета скорости потока (4).

$$\nu_{эл} = \nu \cdot 1{,}25 \qquad (4)$$

Экспериментально подтверждено, что процесс пленочного кипения электролита нарушается при выборе значения параметра скорости потока без учета потерь в МЭЗ. При этом увеличение скорости потока более чем на 50 % относительно расчетной величины приводит к срыву ППО в МЭЗ. В том и другом случае будет иметь место нарушение стабильности процесса, что приводит к браку (рис. 6 (в, г)).

а) *б*) *в*) *г*)



Рис. 6. (*а*) детали-образцы до полирования; (*б*) детали-образцы после обработки при рациональных режимах; (*в*) при срыве ППО, (*г*) при пузырьковом кипении и пробое МЭЗ.

Определение величины расхода электролита и выбор такой скорости потока – $\nu_{эл}$, при которой электролит будет находится в состоянии пленочного кипения в МЭЗ, между поверхностью анода-заготовки и электродом-катодом, возможно по формуле:

$$\nu_{эл} = P_{отв.} \cdot L \cdot \frac{j \cdot U}{C \cdot \rho_{раб.ж.} \cdot \Delta T} \cdot 1{,}25 \qquad (5)$$

где $P_{отв}$ – периметр обрабатываемого отверстия [см]; L – длина отверстия [см]; C – теплоемкость электролита [Дж/кг·°с]; ρ – плотность электролита [$г/см^3$];
j – плотность тока [$А/см^2$]; U – напряжение [В]; ΔT – разница температур электролита на входе в обрабатываемое отверстие и температурой кипения [°C].

На рис. 7 приведен фрагмент съемки процесса полирования деталей-образцов по схеме ПЭПП. Внутренняя поверхность с начальной шероховатостью Ra = 0,32 мкм (рис. 6, а) подвергались обработке ПЭПП при варьировании основных параметров процесса, влияющих на целевой параметр шероховатости внутренней поверхности.



Рис. 7. Процесс ПЭПП внутренней поверхности детали-образца.

На рис. 8 приведено графическое представление изменения целевого параметра шероховатости (Ra) в зависимости от концентрации (n) и скорости потока ($ν_{эл}$) электролита, оказывающих наибольше влияние на процесс полирования отверстий.

Таким образом, протекание стабильного процесса ПЭПП, сопровождающегося снижением параметра Ra обрабатываемых внутренних поверхностей деталей, обеспечивается при следующих технологических режимах: напряжение (U) от 250 до 320 В, концентрация электролита (n) от 3 до 5 %, температура электролита (T) от 70 до 90 ºС, скорость потока ($ν_{эл}$) от 0,1 до 0,2 л/с. Потребляемый ток, рассчитываемый по формуле 2.

В заданном интервале значений параметров режимов технологического процесса ПЭПП обеспечивается процесс обработки внутренних поверхностей деталей при исходной шероховатости поверхности Ra = 0,32 мкм до шероховатости поверхности Ra 0,23 - 0,06 мкм. Уменьшение параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей Ra в интервале 0,23 - 0,06 мкм можно достичь вследствие снижения концентрации электролита с 5 до 3 %, а скорости потока электролита с 0,2 до 0,1 л/с соответственно. Температура электролита на входе полируемого отверстия 70 ºС.

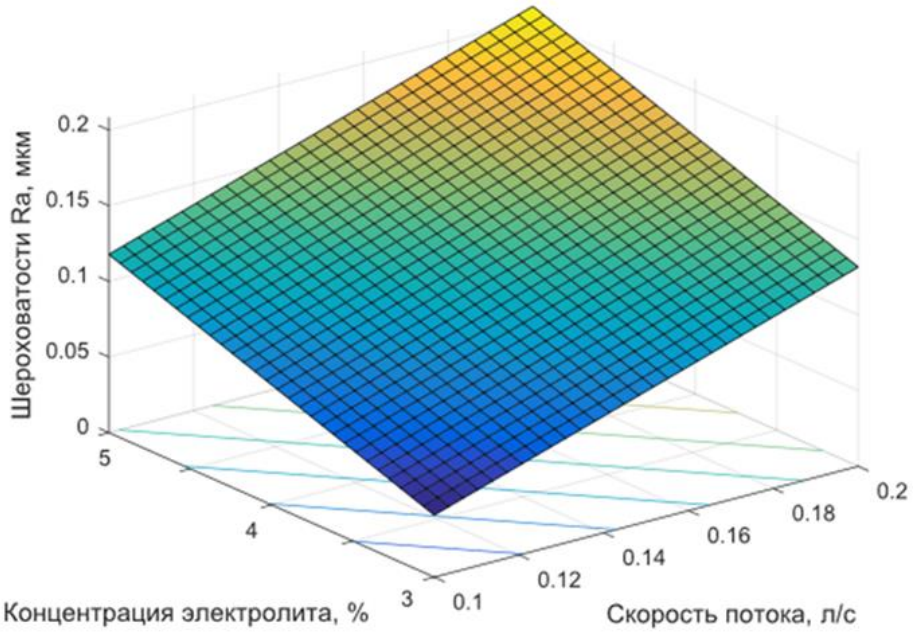


Рис. 8. График зависимости целевого параметра шероховатости (Ra, мкм) от концентрации (n, %) и скорости потока электролита ($\nu_{эл}$, л/с).

Соответственно, рациональной областью применения схемы ПЭПП внутренних поверхностей отверстий деталей с отношением длины к диаметру L < 6d ограничивается следующими значениями параметрами режимов технологического процесса: U = 300 В, T = 70 ºС, n = 3 %, $\nu_{эл}$ = 0,1 л/с. Потребляемый ток I, рассчитывается по формуле 2. Состав электролита выбирается с учетом материала обрабатываемой детали, согласно табл. 1.

3. Технологический процесс ПЭПП по схеме с локальной зоной полирования деталей с отношением длины отверстия к диаметру L > 6d.

В случае, когда длина детали много большее диаметра полируемого отверстия, рассмотренный выше технологический процесс ПЭПП не может быть применим в силу особенности распределения напряженности электрического поля в МЭЗ при обработке внутренних поверхностей протяженных сквозных отверстий.

Условием обеспечения стабильного процесса ПЭПП является необходимость обеспечить такой уровень напряженности и плотности тока, который будет достаточен для ионизации электролита на всей площади внутренней поверхности отверстия, обрабатываемой детали.

Рассмотрим пример полирования внутреннего диаметра трубки изготовленной из меди марки М3. Внутренний диаметр трубки (d) 16 мм, длина (L) 150 мм.

Предлагаемая схема локального ПЭПП (ЛПЭПП) отличается тем, что осуществляется последовательная пошаговая обработка внутренней поверхности по ее длине. Для этого, определенная часть поверхности ЭК

изолируется керамическими втулками, а открытая часть ЭК, образует локальную рабочую зону обработки, которая равна длине не изолированной части электрода (рис. 9).

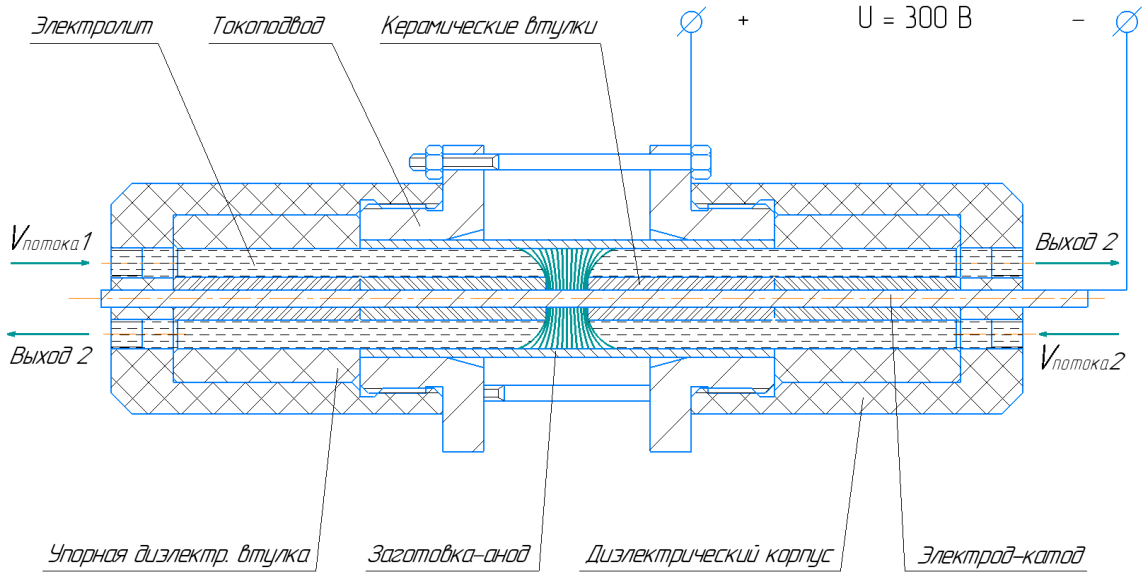


Рис. 9. Схема локального ПЭПП.

Таким образом, обеспечивается постоянство значений уровня напряженности электрического поля на локальном участке (площади) поверхности обрабатываемого отверстия. Вследствие поступательного перемещения изолирующих втулок, с заданным шагом, осуществляется смещение локальной рабочей зоны ЭК по длине отверстия, за счет чего обеспечивается поэтапное полирование внутренних поверхностей отверстия деталей любой протяженности [8-10].

Обработка трубок из меди М3 с диаметром отверстия 16 мм, длинной 150 мм и начальной Ra = 0,63 мкм осуществлялась в три проход (N = 3) при следующих режимах: U = 300 В, T = 70 ºС, n = 3 %, $\nu_{эл}$ = 0,15 л/с, $l_{лз}/L_{дет}$ = 1/3 (локальная зона 50 мм).

На рис. 10 приведены фотографии процесса по схеме локального ПЭПП в три прохода.

На рис. 11 приведено графическое представление изменения целевого параметра шероховатости (Ra) в зависимости от скорости потока электролита ($\nu_{эл}$) и длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$), оказывающих наибольше влияние на процесс полирования отверстий по схеме ЛПЭПП. При этом, концентрация и температура электролита соответственно равны n = 3 %, T = 70 ºС.

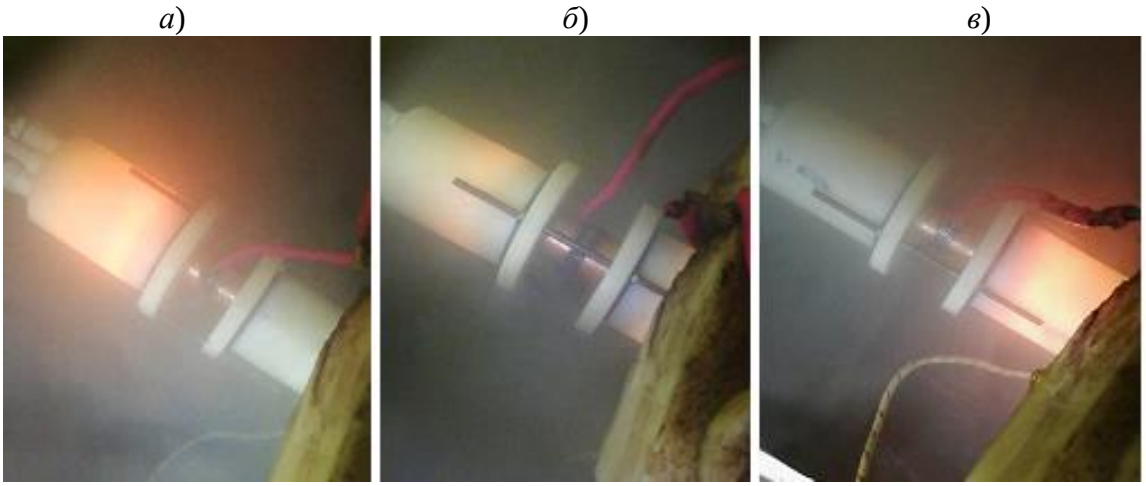


Рис. 10. *а*) обработка левой части детали, *б*) центральной части, *в*) правой части.

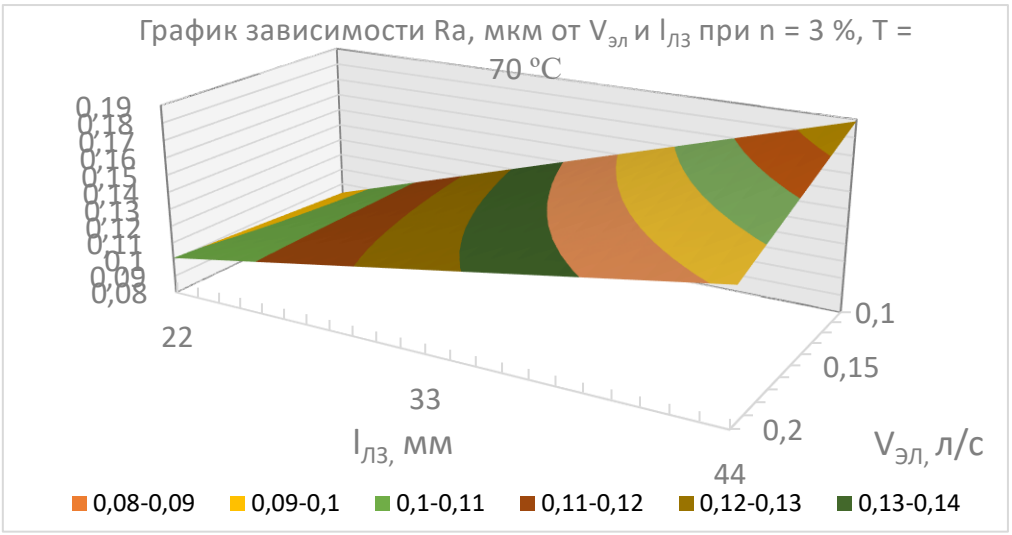


Рис. 11. График зависимости Ra, мкм от $\nu_{эл}$, л/с и *l*лз, мм при n = 3 %, T = 70 ºС.

В заданном интервале значений параметров режима технологического процесса ЛПЭПП, обеспечивается стабильность процесса обработки внутренних поверхностей, что позволяет при исходной шероховатости Ra = 0,32 мкм снизить данный параметр с 0,19 до 0,09 мкм обработанной поверхности.

Значительного снижения параметра Ra можно достичь в результате уменьшения длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$) при расчетной скорости потока электролита ($\nu_{эл}$), не приводящая к пробою МЭЗ вследствие нарушения пленочного кипения электролита.

Результаты эксперимента по отработке рационального режима ЛПЭПП при полировании трубки-образца с исходной шероховатостью поверхности Ra = 0,32 мкм проиллюстрированы изменением состояния внутренней поверхности до и после обработки (рис.12). Обработка осуществлялась за три

прохода по 60 с каждый. Установлено, что снижение параметра шероховатости Ra в интервале 0,06 - 0,09 мкм.

а) *б*)



Рис. 12. Шероховатость поверхности: *а*) до обработки, *б*) после обработки.

Соответственно, рациональная область применения схемы ЛПЭПП внутренних поверхностей отверстий деталей с отношением длины к диаметру L > 6d ограничивается следующими значениями параметрами режимов технологического процесса: U = 300 В, T = 70 ºС, n = 3 %, $\nu_{эл}$ = 0,1 л/с в три прохода (N). Потребляемый ток I, рассчитывается по формуле 2. Состав электролита выбирается с учетом материала обрабатываемой детали, согласно табл.1. Скорость потока электролита ($\nu_{эл}$) определяется по формуле 5 с поправкой на параметр длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$). Длина локальной зоны полирования ($l_{лз}$), выбирается исходя из геометрических параметров поперечного сечения обрабатываемого отверстия протяженной детали [11-15].

Заключение

В результате проведенных экспериментально-теоретических исследований выполнена научно обоснованная критериальная оценка возможной области применимости ЭПП. Установлены границы области основных параметров процесса обработки наружных и внутренних поверхностей деталей при различных технологических схемах ЭПП.

Определены рациональные режимы ЭПП при реализации технологических процессов по схеме погружения обрабатываемой детали в ванну с электролитом, по схеме принудительной подачи электролита в зону полирования и размещением ЭК в обрабатываемом отверстии, а также процесса по схеме принудительного ЭПП с локальной зоной полирования внутренних поверхностей протяженных деталей.

Приведена графическая интерпретация областей реализации обработки деталей по вышеуказанным схемам и влияние основных варьируемых

режимных параметров на изменение целевого параметра Ra для каждой рассмотренной схемы реализации ЭПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Надеев А.И., Попов А.И., Сурин А.В., Свечников Ю.К. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

[2] Безденежных Т.И., Шапкин В.В., Угольникова О.В. [и др./ Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2012. – 131 с. – ISBN 978-5-228-00590-7. – EDN TLVEJZ.

[3] Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. / Электролитно-плазменная обработка материалов / Минск: «Белорусская навука». 2010. - 232 стр. ISBN 978-985-08-1215-5.

[4] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. [и др.]. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов исплавов. Том 2. Монография / – Москва: Техносфера, 2011. – 512 с. – ISBN 978-5-94836-268-7. – EDN RBATRZ

[5] Кузьмичев И.С., Ушомирская Л.А., Шмельков А.В., Сысоев И.А. Финишная технология обработки сквозных прямоосных, глубоких, цилиндрических отверстий в металлических изделиях принудительным электролитно-плазменным полированием. Научно-производственный журнал «Металлообработка». АО «Издательство "Политехника"». №3 (99)/2017. стр. 21-27. ISSN 1684-6702.

[6] Попов А.И., Тюхтяев М.И., Радкевич М.М., Новиков В.И. Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке, Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 4(254)' 2016, УДК. 621.78, DOI:10.5862/JEST.254.15

[7] Ushomirskaya L.A., Baron Yu.M., Kuzmichev I.S. Design of Special Device for the Forced Electrolytic-Plasma Polishing of Internal Surfaces by Counter Flows // Key Engineering Materials, ISSN: 16629795, Vol. 822, pp 610-616, https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.822.610.Надеев А.И., Попов А.И., Сурин А.В., Свечников Ю.К.. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

[8] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Technological Schemes for Elongated Foramen Internal Surface Finishing by Forced Electrolytic-Plasma Polishing

// Advances in Mechanical Engineering. “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia, June 2020 - pp 102-111. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62062-

[9] Попов А.И., Новиков В.И., Радкевич М.М.. Особенности формирования электрического разряда между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57. – № 4. – С. 483-495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.

[10] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation 250 and inline metrology / Micromachines. – 2019. – Vol. 10. – No 3. – P. 214. – DOI 10.3390/mi10030214. – EDN QPFGBH.

[11] Радкевич М.М., Кузьмичев И.С. Применение локального принудительного электролитно-плазменного полирования для обработки отверстий // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, 14-15 декабря 2020 г. ¬– с. 119-124. ISBN 978-5-398-02489-0.

[12] Кузьмичев И.С. Технологическое обеспечение и повышение качества обработки протяженных отверстий при локальном принудительном электролитно-плазменном полировании: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2021. – 22 с. Доступ из сети Интернет (чтение). http://elib.spbstu.ru/dl/2/r21-31.pdf.

[13] Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С. [и др.]. Патент № 2656318 C1 Российская Федерация, МПК C23C 14/35. Магнетронная распылительная головка: № 2017111428: заявл. 04.04.2017: опубл. 04.06.2018/ заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN UQSEXB.

[14] Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G.. Thinnest Finishing

[15] Treatment with a Focused Jet of Electrolytic Plasma // Advances in Mechanical Engineering: Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME), Saint-Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 139-149. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_15. – EDN SSNLCQ.

[16] Zakharov S.V., Korotkikh M. T.. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model / // Advances in Mechanical Engineering: Part of the

Lecture Notesin Mechanical Engineering book series (LNME), Saint Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 193-208. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_20. – EDN FDKQTK.

Michail M. Radkevich[1]
Ivan S. Kuzmichev[2]

ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]ZAO «ANAGAZ», Saint Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the results of mastering the technological processes required for the implementation of electrolytic-plasma polishing on parts made of steel, copper and its alloy. It also describes the basic principles of engineering and research necessary to determine the criteria for applying electrolytic-plasma polishing in mechanical engineering in order to solve specific problems related to improving the surface quality of parts.

Keywords: technology, equipment, device, part, potential, electrolyte, plasma, polishing, roughness, criteria, modes, concentration, temperature, flow, electrode, equidistant, local.

REFERENCES

[1] Nadeev A.I., Popov A.I., Surin A.V., Svechnikov Yu.K. Principes van het bouwen van geautomatiseerde systemen ter ondersteuning van de levenscyclus van innovatieve producten / sensoren en systemen. – 2006. – nr. 11. – Blz. 59-63. – EDN KWMQTP.

[2] Bezdenezhnykh T.I., Shapkin V.V., Oegolnikova O.V. [en anderen / Institutionele aspecten van innovatieve economie: monografie / St. Petersburg State University of Service and Economics. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Service and Economics, 2012. - 131 blz. - ISBN 978-5-228-00590-7. - EDN TLVEJZ.

[3] Kulikov I.S., Vashenko S.V., Kamneva A,Ya. / Elektrolitno-plazmennaya obrabotka matrialov / Minsk: “Belorusskaya navuka”. 2010. – 232 s. ISBN 978-985-08-1215-5.

[4] Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V. [i dr.]. Plasma-elektrolytische modificatie van het oppervlak van metalen en legeringen. Deel 2. Monografie / – Moskou : Technosfeer, 2011. – 512 blz. – ISBN 978-5-94836-268-7. – EDN RBATRZ. Slovetsky D.I, Terentyev S.D. Parametry elektricheskogo razryada v electrolitakh I fiziko-khimicheskiye protsessy v

electrolitnoy plasma. Khimiya vysokikh energy. 2003, T. 37, No 5. s. 355–362. (rus.)
[5] Kuzmichev I.S., Ushomirskaya L.A., Shmelkov A.V., Sysoev I.A. Linear, inner, lengthy surfaces finishing using the forced-flow electrolyte-plasma process for metal products. Nauchno-proizvodstvennii jurnal “Metalloobrabotka”. AO «Izdatel’stvo “Politehnika”». №3 (99)/2017. – 70 str. (rus.) ISSN 1684-6702.
[6] Popov A.I., T’uhtyaev M.I., Radkevich M.M., Novikov V.I.. Analiz teplovih yavlenii pri struinoi fokusirovannoi elektrolitno-plazmennoi obrabotke, Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta, 4(254)' 2016, UDK. 621.78, DOI:10.5862/JEST.254.15
[7] Ludmila A. Ushomirskaya, Yuri M. Baron, Ivan S. Kuzmichev. Design of Special Device for the Forced Electrolytic-Plasma Polishing of Internal Surfaces by Counter Flows // Key Engineering Materials, ISSN: 16629795, Vol.822,pp 610-616, https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.822.610.
[8] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Technological Schemes for Elongated Foramen Internal Surface Finishing by Forced Electrolytic-Plasma Polishing // Advances in Mechanical Engineering. “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia, June 2020 - pp 102-111.https://doi.org/10.1007/978-3-030-62062-2.
[9] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S. [en anderen]. Octrooi nr. 2656318 C1 Russische Federatie, IPC C23C 14/35. Magnetron sputterkop: Nee 2017111428: Toepassing 04.04.2017: uitg. 04.06.2018/ aanvrager Federale Staat Autonome Onderwijsinstelling voor Hoger Onderwijs "Peter de Grote St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.
[10] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation 250 and inline metrology / Micromachines. – 2019. – Vol. 10. – No 3. – P. 214. – DOI 10.3390/mi10030214. – EDN QPFGBH.
[11] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Application of local compulsory electrolyte-plasma polishing for hole processing. – Perm, December 14-15 2020 г. ¬– с. 119-124. ISBN 978-5-398-02489-0.
[12] Kuzmichev I.S. Quality improvement of elongated foramen surfaces by the local forced electrolytic-plasma polishing technological implementation: Specialty: 05.02.08 “Mechanical engineering technology”: abstract of Ph.D. dissertation; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – Saint-Petersburg, 2021. – 22 p. Internet access (reading) http://elib.spbstu.ru/dl/2/r21-31.pdf.
[13] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S. [en anderen]. Octrooi nr. 2656318 C1 Russische Federatie, IPC C23C 14/35. Magnetron sputterkop: Nee 2017111428: Toepassing 04.04.2017: uitg. 04.06.2018/ aanvrager

Federale Staat Autonome Onderwijsinstelling voor Hoger Onderwijs "Peter de Grote St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.
[14] Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G.. Thinnest Finishing
[15] Treatment with a Focused Jet of Electrolytic Plasma // Advances in Engineering: Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME), Saint-Petersburg, Russia, 01–02 June, 2019.– Cham: Springer, 2020. – P. 139-149. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_15. – EDN SSNLCQ.
[16] Zakharov S.V., Korotkikh M. T.. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model / // Advances in Mechanical Engineering: Part of the Lecture Notesin Mechanical Engineering book series (LNME), Saint Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 193-208. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_20. – EDN FDKQTK.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.7.044.4
doi:10.18720/SPBPU/2/id-163

К.С. Арсентьева[1], В.С. Мамутов[2], А.О. Просторова[3], В.П. Третьяков[4]

ТЕХНОЛОГИЯ И КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ



[1]Ксения Сергеевна Арсентьева, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: xenia.ars@xmail.ru



[2]Вячеслав Сабайдинович Мамутов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru.



[3]Александра Олеговна Просторова, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: prostorova_ao@spbstu.ru.



[4]Валерий Павлович Третьяков, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: tretyakov_vp@spbstu.ru.

Аннотация

Статья посвящена исследованию условий, при которых происходит обрезка тонкостенной цилиндрической заготовки на режущей кромке ножа при комбинированной электрогидроимпульсной штамповке полых деталей с плоским фланцем. Получена эмпирическая зависимость предельного прогиба заготовки при ее формовке в кольцевой зазор на момент разделения материала от параметров материала, геометрических размеров заготовки и

оснастки. Проведено компьютерное моделирование исследуемого процесса в конечно-элементном комплексе LS-DYNA. Результаты исследований показали, что электрогидроимпульсная штамповка может совмещать за один переход такие операции как раздача, формовка, обрезка, пробивка, калибровка и отбортовка. Данная технология может эффективно использоваться при изготовлении полых пространственных деталей с фланцем.

Ключевые слова: комбинированная электрогидроимпульсная штамповка, конечно-элементное моделирование, высокоскоростное деформирование, LS-DYNA, предельная деформация, тонкостенные цилиндрические детали.

Введение

Электрогидроимпульсная (ЭГИ) штамповка листовых заготовок, основанная на применении энергии высокоскоростного электрического разряда в жидкости, успешно применяется при проектировании высокопроизводительных технологических процессов [1÷4], особенностью которых является комбинирование калибровки, разделительных (вырубка, пробивка) и формообразующих операций. При этом степень совмещения (отношение количества одновременно выполняемых операций к числу установок заготовки при штамповке) может достигать значений более 8 при различных сочетаниях последовательности выполнения [5]. При изготовлении деталей из тонкостенных пространственных заготовок зачастую применяется совмещение таких операций как раздача, формовка, обрезка, пробивка, калибровка и отбортовка. Предельные размеры заготовок зависят от формы и материала детали, технологической схемы выполнения операции, степени их совмещения, энергетических возможностей электрогидроимпульсного оборудования [5, 6].

Основные технологические схемы комбинированной ЭГИ штамповки деталей с фланцем из полых цилиндрических заготовок представлены на рисунке *1*. Деформирование заготовки с предварительной обрезкой может осуществляться с использованием универсальных разрядных камер с вынесенной за пределы очага деформации зоной разряда (рис. *1*, *а* и *б*). Отбортовка концов полых цилиндрических заготовок производится при расположении разрядной камеры над заготовкой (*а*) или метанием жидкости (*б*). Для концентрации энергии в очаге деформации при штамповке пространственных заготовок используются отражатели различной формы [5, 6, 7]. Процесс раздачи, обрезки и последующей отбортовки может осуществляться также с инициированием разряда взрывающимся проводником (проволочки) в межэлектродном пространстве (рис. *1*, *в*).

Современные методы расчета и моделирования [8–12] позволяют адекватно описывать различные технологические процессы импульсного нагружения. Однако, ввиду влияния на ЭГИ процесс значительного ряда различных факторов, отсутствие рекомендаций по проектированию технологии комбинированной электрогидроимпульсной штамповки полых деталей с фланцем сдерживает ее широкое применение в промышленности. В первую очередь это связано с неопределенностью момента обрезки заготовки на режущей кромке ножа, т. е. отсутствием формализованного условия перехода одного этапа деформирования в другой.

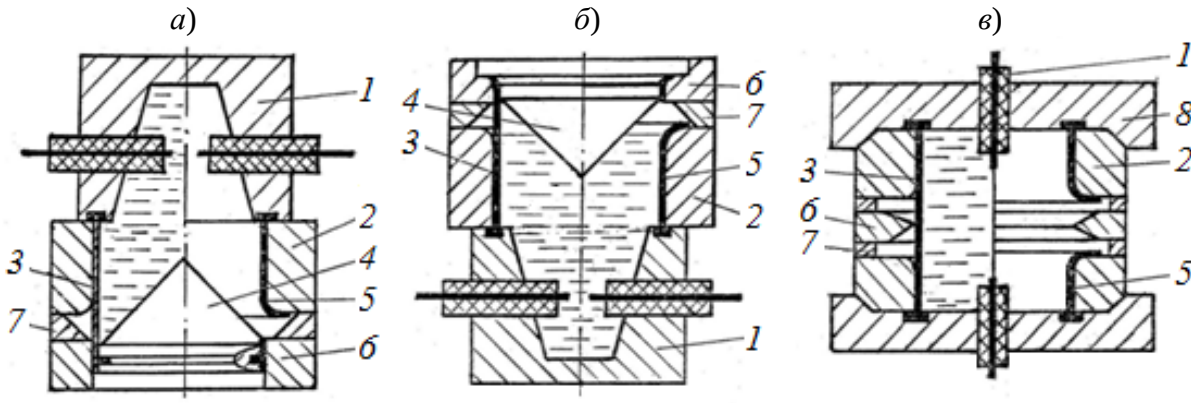


Рис. 1. Способы ЭГИ штамповки деталей с фланцем из тонкостенных цилиндрических заготовок с верхним (*а*) и нижним (*б*) расположением разрядной камеры, с разрядом вдоль образующей заготовки (*в*): 1- разрядное устройство; 2 - матрица; 3 - заготовка; 4 – отражатель; 5 - деталь; 6 - обрезной нож; 7 - кольцо; 8 - фиксирующий конус

При выполнении данной работы определены следующие задачи исследования:

- определение параметров, влияющих на процесс обрезки тонкостенной цилиндрической заготовки при схеме комбинированной электрогидроимпульсной штамповки с разрядом вдоль образующей заготовки аналитическим методом;
- обработка экспериментальных данных и получение эмпирической зависимости для фиксации момента обрезки цилиндрической заготовки на режущей кромке ножа при комбинированной ЭГИ штамповке полых деталей с плоским фланцем с последующей верификацией при помощи компьютерного моделирования в конечно-элементном комплексе LS-DYNA.

Методы

Рассмотрим процесс электрогидроимпульсной отбортовки тонкостенной цилиндрической оболочки по технологической схеме,

представленной на рисунке 2, *а*. После заполнения рабочей камеры *1* водой производится накопление электрической энергии в конденсаторной батарее *C*, коммутация *K* и формирование (инициирование) с помощью взрывающегося проводника *2* в межэлектродном промежутке ионизированного токопроводящего канала. Под действием переменного импульсного давления, возникающего в результате выделения электрической энергии в осевом канале разряда, часть заготовки *3*, расположенная ниже опорного кольца *4*, деформируется в кольцевой зазор, образованный ножом *5* и матрицей *6*. При реализации данной технологии необходимо обеспечить герметичность и высокую стойкость изоляции *7* электродной системы. При выполнении разделительных операций большое значение имеет индуктивность *L* разрядного контура *8*, определяющая скорость выделения энергии в канале разряда.

Процесс деформирования заготовки при комбинировании операций, указанных выше, можно условно разбить на три этапа:

1. Формовка поперечного рифта (гофра) на оболочке вращения между режущей кромкой (РК) ножа *5* и матрицей *6* с радиусом скругления $r_м$. Деформирование заготовки происходит до тех пор, пока прогиб (стрелка прогиба) гофра не достигнет такого значения $f_{пр}$ (рис. 2, *б*), при котором толщинная деформация на режущей кромке ножа будет равна критической.

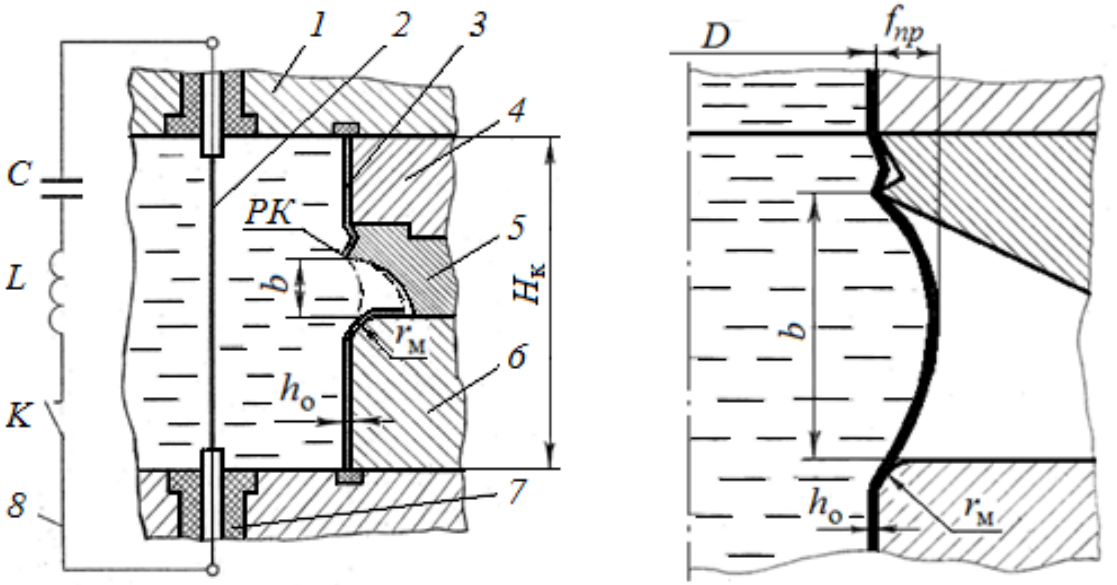


Рис. 2. Технологическая схема процесса электрогидроимпульсной штамповки тонкостенной цилиндрической заготовки с осевым разрядом: *а*) формообразование фланца; *б*) момент обрезки заготовки на режущей кромке ножа.

2. Обрезка заготовки на режущей кромке, сопровождающаяся, как показано экспериментальными исследованиями, например, в работе [13], резким падением до нуля давления, действующего на заготовку.

3. Отбортовка свободной (неограниченной матрицей) заготовки под действием сил инерции. Кинетическая энергия, приобретенная деформирующейся частью заготовки к моменту ее разделения на режущей кромке ножа должна быть достаточна для полного формообразования фланца.

Численная реализация расчетной модели при моделировании комбинированной ЭГИ штамповки деталей с фланцем требует задания момента разделения заготовки на режущей кромке ножа, т. е. условия перехода одного этапа деформирования в другой [13, 14]. Существуют два подхода к решению этого вопроса. В первом случае начало разделения заготовки определяют по предельным толщинным деформациям $\varepsilon_{h\text{кр}}$. Данный метод обусловлен тем, что в условиях плоского напряженного состояния материала заготовки (σ_1 и σ_2 - растягивающие напряжения и $\sigma_3 = 0$) толщинная деформация ε_h приблизительно равна величине интенсивности деформаций ε_i, с предельным значением которой связан момент разделения.

Недостатком такого подхода по определению условия разделения заготовки является то, что толщинная деформация ε_h фиксируется после разделения заготовки на режущей кромке.

Более корректным является второй подход, где начало разделения оценивают величиной максимального (предельного) прогиба заготовки, которая в конечном итоге при ЭГИ отбортовке будет влиять на ширину получаемого фланца детали. Кроме того, материал заготовки, имеющий предельный прогиб комплексно учитывает напряженно-деформированное состояние, в то время как критическая интенсивность деформаций неоднозначно определяет прогиб деформирующейся части заготовки, соответствующий моменту обрезки на режущей кромке ножа.

Поэтому при комбинированной ЭГИ штамповке начало обрезки тонкостенной цилиндрической заготовки на режущей кромке кольцевого ножа будем оценивать ее предельным прогибом $f_{\text{пр}}$ (рис. *2, б*). В качестве параметра, характеризующего положение заготовки в данный момент, принимаем отношение прогиба деформируемой части заготовки к ширине зазора между режущей кромкой и матрицей $\overline{f_m} = f/b$.

Угол заточки режущей кромки обрезного ножа принимали равным 30 °, так как это значение угла является оптимальным в разделительных процессах при импульсном нагружении [5, 14].

Результаты

Анализ разделительных операций, в том числе в совмещенных процессах, при импульсном нагружении [5, 13, 14], а также предварительно проведенные эксперименты позволили установить, что на величину

предельного прогиба деформирующейся части заготовки существенное влияние оказывает относительное удлинение материала при растяжении δ_{10}, геометрические параметры технологической оснастки (радиус закругления матрицы $r_м$, зазор b) и заготовки (толщина $h_о$ и исходный диаметр $D_о$). Очевидно, что на процесс разрушения материала на режущей кромке ножа влияет ряд других факторов, например, трение, анизотропия материала заготовки и другие. Кроме того, на качество обрезки, несомненно, влияет удельная скорость нарастания электрической мощности, определяемая параметрами разрядного контура. Однако в данном случае эти факторы не учитываются и считаются неконтролируемыми.

В качестве параметра отклика принят безразмерный комплекс $f_{пр}/b$, а целью проводимых исследований являлось получение зависимости вида:

$$Y_м = f_{пр}/b = f(\delta_{10};\ h_0/b;\ r_м/b;\ b/D)$$

Диапазоны варьирования параметров; $\delta_{10} \in [0{,}08; 0{,}385]$; $h_0/b \in [0{,}016; 0{,}215]$; $r_м/b \in [0{,}67; 1{,}01]$; $b/D \in [0{,}05; 0{,}15]$.

Применение теории планирования эксперимента, позволяет получить математическую модель, описывающую экспериментальные данные в конкретной области с заданной погрешностью. При этом рассматривался план типа 2^4, в котором каждый фактор X_i принимает значения только на концах интервала варьирования. При проведении полного факторного эксперимента типа 2^4 контролируются факторы $X_1 = \delta_{10}$; $X_2 = h_0/b$; $X_3 = r_м/b$ и $X_4 = b/D$, которые варьировались на следующих уровнях: $X_1^- = 0{,}08$; $X_1^+ = 0{,}385$; $X_2^- = 0{,}016$; $X_2^+ = 0{,}2$; $X_3^- = 0{,}067$; $X_3^+ = 1{,}0$; $X_4^- = 0{,}05$; $X_4^+ = 0{,}15$. Первому фактору соответствовали материалы сварных заготовок сталь 20 (нагартованная) и латунь Л63М. На каждом уровне плана проводилось по 8 измерений. Результаты экспериментов, проведенных на электрогидроимпульсном прессе ПЭГ-25, приведены в таблице 1.

После обработки данных полного факторного эксперимента типа 2^4 с использованием дисперсионного и регрессионного анализов была получена эмпирическая зависимость относительного предельного прогиба заготовки от параметров материала, геометрических размеров заготовки и технологической оснастки (см. рис. 1):

$$f_{пр}/b = 0{,}307(\delta_{10})^{0{,}447} \cdot (h_0/b)^{-0{,}352} \cdot (r_м/b)^{0{,}295} \cdot (b/D)^{0{,}114}$$

Таблица 1. Результаты полного факторного эксперимента типа 2^4 по определению критического прогиба заготовки при комбинированной ЭГИ штамповке цилиндрических оболочек

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4	Прогиб $Y_{i,j}$								
					1	2	3	4	5	6	7	8	$\bar{Y}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,08	0,016	0,067	0,05	0,158	0,136	0,137	0,116	0,141	0,146	0,135	0,128	0,137
2	0,385	0,016	0,067	0,05	0,281	0,341	0,296	0,271	0,256	0,268	0,251	0,242	0,275
3	0,08	0,2	0,067	0,05	0,053	0,059	0,049	0,048	0,064	0,056	0,064	0,046	0,055
4	0,385	0, 2	0,067	0,05	0,111	0,100	0,096	0,128	0,112	0,118	0,107	0,122	0,112
5	0,08	0,016	1,0	0,05	0,318	0,314	0,329	0,339	0,299	0,322	0,326	0,306	0,319
6	0,385	0,016	1,0	0,05	0,547	0,523	0,422	0,547	0,740	0,738	0,499	0,674	0,588
7	0,03	0,2	1,0	0,05	0,146	0,134	0,111	0,117	0,114	0,118	0,117	0,155	0,126
8	0,385	0,2	1,0	0,05	0,237	0,252	0,235	0,223	0,286	0,281	0,225	0,248	0,248
9	0,08	0,016	0,067	0,15	0,152	0,186	0,106	0,147	0,179	0,151	0,144	0,145	0,151
10	0,385	0,016	0,067	0,15	0,279	0,343	0,258	0,324	0,289	0,378	0,274	0,304	0,306
11	0,08	0,2	0,067	0,15	0,063	0,060	0,071	0,073	0,055	0,066	0,056	0,055	0,062
12	0,385	0,2	0,067	0,15	0,136	0,116	0,131	0,138	0,139	0,145	0,154	0,151	0,139
13	0,08	0,016	1,0	0,15	0,336	0,254	0,296	0,366	0,401	0,381	0,355	0,305	0,337
14	0,385	0,016	1,0	0,15	0,669	0,740	0,643	0,798	0,720	0,691	0,703	0,763	0,716
15	0,08	0,2	1,0	0,15	0,180	0,128	0,124	0,165	0,137	0,130	0,119	0,152	0,142
16	0,385	0,2	1,0	0,15	0,304	0,266	0,196	0,249	0,278	0,290	0,309	0,279	0,272

Расхождение между опытными данными и вычисленной величиной $f_{\text{пр}}/b$ не превышает 8 % для всех точек плана, а средняя погрешность аппроксимации ниже 5 %. Экспериментальные исследования проведены также для материалов (сталь 12Х18Н10Т и сплав АМг2М), невошедших в план эксперимента, Расхождение между расчетными Y_m и опытными значениями исследуемой величины не превышает 10 % (см. табл. 2), что подтверждает корректность полученной эмпирической зависимости в выбранном диапазоне варьируемых факторов.

Таблица 2. Оценка корректности полученной зависимости по определению критического прогиба заготовки при комбинированной ЭГИ штамповке цилиндрических оболочек

№ п/п	Материал	$\vec{X}$				$\overline{Y}$	Y_m	$\frac{(\overline{Y}-Y_m)\cdot 100\%}{Y_m}$
		X_1	X_2	X_3	X_4			
1	Латунь Л63М	0,385	0,2	1	0,15	0,272	0,284	-4,5
			0,016	0,067	0,05	0,275	0,274	0,1
2	Сталь 30	0,08	0,2	1	0,15	0,143	0,141	0,8
			0,016	0,067	0,05	0,137	0,136	0,6
3	Сталь 12Х18Н10Т	0,31	0,03	0,5	0,1	0,353	0,332	9,9
			0,03	0,3	0,1	0,330	0,337	1,9
4	Сплав АМг2М	0,15	0,1	0,3	0,1	0,144	0,159	9,4
			0,06	0,2	0,1	0,190	0,173	-8,9

Для верификации использовалось компьютерное моделирование плоской задачи разделения и отбортовки в конечно-элементном комплексе LS-DYNA. Поскольку программа позволяет решать упрощенную задачу без внесения существенной погрешности [15], задавалась геометрия комбинированной матрицы, участка трубной заготовки и жидкой передающей среды (воды), импульсное нагружение задавалось положительной полуволной синусоиды [16].

Для оснастки, заготовки и передающей среды использовались типы элементов *PLANE 162*. Для матрицы использовалась модель материала *RIGID* со следующими свойствами: модуль Юнга $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\upsilon = 0{,}3$; плотность $\rho = 7800$ кг/м^3. Для передающей среды использовалась модель материала *ELASTIC_FLUID* со следующими свойствами: плотность $\rho = 1000$кг/м^3; коэффициент Пуассона $\upsilon = 0{,}49$; модуль объемной упругости $K = 2.2$ ГПа.

Для трубной заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром 96 мм и толщиной стенки 0,3 мм задавалась модель материала *STANDART_PIECEWISE_LINEAR* со следующими свойствами: плотность $\rho = 7800$ кг/м^3; модуль Юнга $E = 190$ ГПа, коэффициент Пуассона $\upsilon = 0{,}29$; напряжение теучести $\sigma_s = 474.4$ МПа; касательный модуль, определяющий кривизну кривой деформационного упрочнения на пластическом участке при линейной аппроксимации $B = 2322.5$ МПа, предельная пластическая деформация $\varepsilon_p^f = 0.35$, используемая в качестве критерия разрушения материала. При расчете с применением модели материала заготовки *STANDART_PIECEWISE_LINEAR*, любой конечный элемент, достигший предельной пластической деформации, считаеся разрушенным и удалаяется из расчета, тем самым моделируя разделение материала.

Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 представлены этапы компьютерного моделирования: рисунок 3, *а* демонстрирует начальное положение заготовки иоснастки до приложения нагрузки; рисунок 3, *б* показывае момент, когда завершается разделение заготовки по толщине режущей кромкой; рисунок 3, *в* и *г* демонстрируют этапы заполнения матрицы под действием нагрузки; рисунок 3, *г* показывает конечным момент расчета.

Рисунок 4 подробно демонстрирует этапы внедрения в материал режущей кромки и стадии разделения: рисунок 4, *а* – начальное положение заготовки и оснастки; рисунок 4, *б* – начало вндрения режущей кромки в поверхность материала; рисунок 4, *в* – последующее внедрение инструмента в заготовку; рисунок 4, *г* – конечный этап резки, полное отделение одной части материала заготовки от другой.

При этом аналитический расчет показал, что $f_{\text{пр}}/b = 0{,}262$, а расчет по данным компьютерного моделирования показал $f_{\text{пр}}/b = 0{,}258$. Следовательно, погрешность составляет около 1,5%, что допустимо для инженерных рассчетов.

Обсуждение

Применение зависимости предельного прогиба заготовки $f_{\text{пр}}/b$ позволяет определить момент разделения цилиндрической оболочки на режущей кромке ножа и выполнить переход от этапа формообразования криволинейного поперечного рифта и отбортовке свободной, неограниченной матрицей, части заготовки.

Получена эмпирическая зависимость для предельного прогиба деформирующейся части заготовки перед обрезкой в процессе

комбинированной ЭГИ штамповки от параметров материала, геометрических размеров заготовки и оснастки.

Проведено компьютерное модлирование процеса в конечно-элементном комплексе LS-DYNA на примере резки-отбортовки трубной заготвки из стал 12Х18Н10Т с толщиной стенки 0,3 мм, которое показало сходимость с аналитическими расчетами с погрешность в 1.5%.

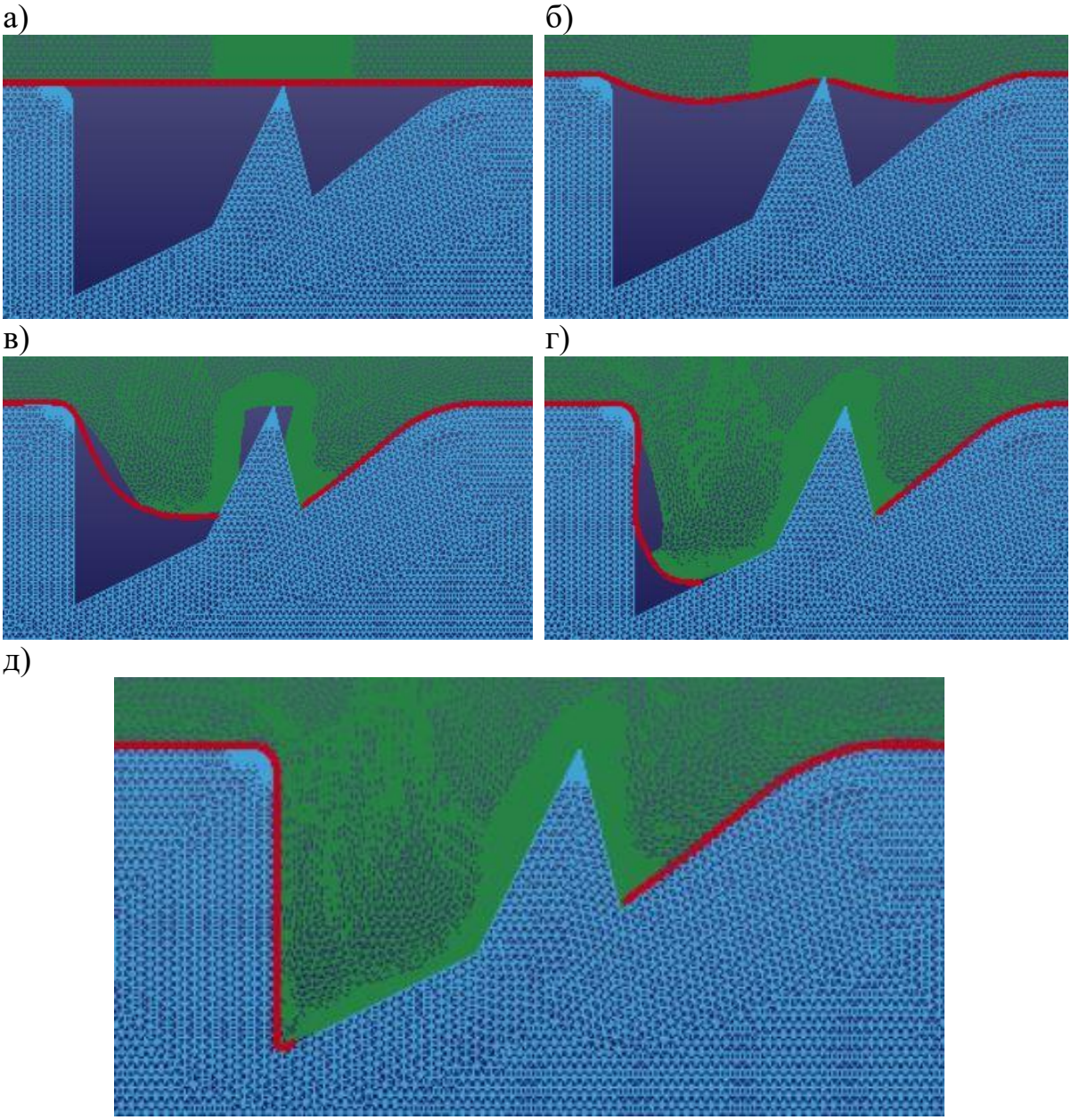


Рис. 3. Этапы компьютерного расчета комбинированного процесса ЭГИ разделения и формовки

Полученные результаты создают предпосылки для практического проектировании новых высокопроизводительных технологических

процессов и дальнейшего исследования комбинированной ЭГИ штамповки цилиндрических оболочек.

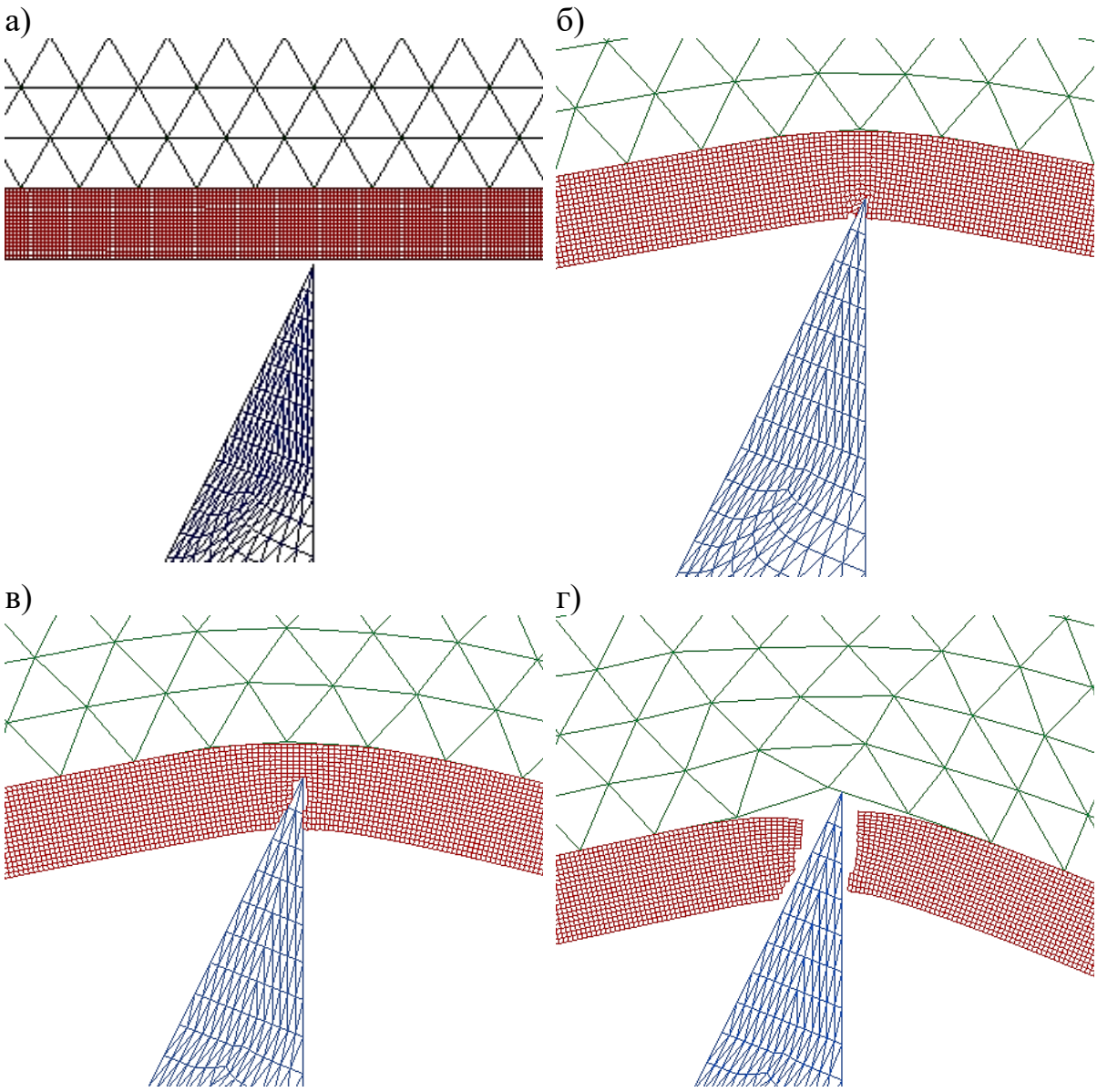


Рис. 4. Этапы разделения заготовки реущей кромкой при компьютерном моделировании

Заключение

Анализ результатов исследований комбинированной ЭГИ штамповки цилиндрических оболочек показывает, что применение в расчетных моделях полученной эмпирической зависимости предельного прогиба деформирующейся части заготовки перед обрезкой позволяет проводить моделирование исследуемых процессов.

Предварительный аналитический расчет позволить снизить количество компьютерных расчетов для отладки технологии, связанные с многофакторностью процесса ЭГИ штамповки, что в перспективе сократит время разработки новой технологии и подготовки производства.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследовательских работ и разработки новых технологических процессов ЭГИ штамповки тонкостенных пространственных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.

[2] Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.

[3] Atieh S., Carvalho A.A., Santillana I.A. et all. First results of SFR cavity fabrication by electro–hydraulic forming at CERN. Proceedings of SFR 2015. Whistler. BC. Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. P. 1-7.

[4] Zia M., Fazli A., Soltanpour M. Warm electrohydraulic forming: A novel high speed forming process. Procedia Engineering. 2017; 207: 323–328. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.782.

[5] Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении. / Чачин В.Н., Богоявленский К.Н., Вагин В.А. и др. Минск : Наука и техника. - 1987, 231 с.

[6] Гулый Г.А., Малюшевский П.П, Кривицкий Е.В. и др. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М. : Машиностроение, 1977. 320 с.

[7] Мазуровский Б. Я., Сизёв А. Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. Киев : Наукова думка, 1983. - 192 с.

[8] Мамутов В.С., Мамутов А.В. Моделирование канала высоковольтного разряда в воде при электрогидроимпульсной штамповке. Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 6-й Международной научно-практической конференции. 2017. С. 656-665.

[9] Мамутов В.С., Арсентьева К.С., Блажевич В.В., Калатозишвили И.В. Замкнутый компьютерный расчет электрогидроимпульсной штамповки. В сборнике: Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. СПб, 2022. С. 188–192.

[10] Mamutov V.S., Arsentyeva X.S., Kalatozishvili I.V. Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Stamping. A. N. Evgrafov (Ed.): MMESE 2022, LNME, pp. 49-56, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1_7

[11] Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 2021;871:80–86.
[12] Косенков В.М., Бычков В.М. Математическое моделирование переходных процессов в разрядном контуре и разрядной камере электрогидравлической установки. Электронная обработка материалов, 2015, 51(2). С. 66–72.
[13] Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В.А. Вагин, Г.Н. Здор, В.С. Мамутов. Минск : Навука і тэхніка, 1990. - 206 с.
[14] Мамутов, В.С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2012. № 2. С. 465–471.
[15] Арсентьева К. С., Мамутов В. С. Электрогидроимпульсная вытяжка-формовка с интенсификацией течения фланца заготовки. Металлообработка, 2020, № 3, с. 26–34. DOI 10.25960/mo.2020.3.26
[16] Арсентьева, К. С. Задание нагружения в расчетах специальных методов листовой штамповки / К. С. Арсентьева, Е. В. Сидорова // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 164–169. – EDN ILRCFO.

X.S. Arsentyeva, V. S.Mamutov, A. O. Prostorova, V. P. Tretyakov

TECHNOLOGY AND COMPUTER SIMULATION OF COMBINED ELECTROHYDROIMPULSE FORMING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This study explores trimming conditions for thin-walled cylindrical workpieces in electrohydoimpulse forming of flanged hollow parts. An empirical relationship was obtained for the maximum deflection of the workpiece during forming an annular gap at the moment of material separation, depending on material properties, workpiece geometry, and tooling dimensions. Computer modeling of the process was performed using the finite element software LS-DYNA. The results demonstrate that electrohydoimpulse forming can combine multiple operations in a single step, including bulging, forming, trimming, punching, sizing, and flanging. This technology can be efficiently applied in the manufacturing of hollow spatial parts with flanges.

Key words: combined electrohydoimpulse forming, finite element analysis, LS-DYNA, high-speed forming, material fracture, thin-walled cylindrical parts.

REFERENCES

[1] Taranenko, M.E. (2011). *Electrohydraulic Forming: Theory, Equipment, and Processes*. Kharkiv: KhAI Publishing. 272 p. (in Russian).
[2] Zdor, G.N., Isaevich, L.A., & Kachanov, I.V. (2010). *High-Speed Metal Forming Technologies*. Minsk: BNTU. 456 p. (in Russian).
[3] Atieh, S., Carvalho, A.A., Santillana, I.A., et al. (2015). First Results of SFR Cavity Fabrication by Electro-Hydraulic Forming at CERN. *Proceedings of SFR 2015*, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release, 25 Sept., pp. 1–7.
[4] Zia, M., Fazli, A., & Soltanpour, M. (2017). Warm Electrohydraulic Forming: A Novel High-Speed Forming Process. *Procedia Engineering*, 207, 323–328. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.782.
[5] Chachin V.N., Bogoyavlenskii K.N., Vagin V.A. Electrohydroimpulse working of materials in machine-building. – Mn.: Science and techniques, 1987 – 231 p. (in Russian).
[6] Gulyi, G.A., Malyushevskiy, P.P., Krivitskiy, E.V., et al. (1977). *Equipment and Technological Processes Using the Electrohydraulic Effect*. Moscow: Mashinostroenie. 320 p. (in Russian)
[7] Mazurovskiy, B.Ya., Sizov, A.N. (1983). *Electrohydraulic Effect in Sheet Metal Forming*. Kyiv: Naukova Dumka. 192 p. (in Russian).
[8] Mamutov, V.S., Mamutov, A.V. (2017). Modeling of a High-Voltage Discharge Channel in Water During Electrohydropulse Forming. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*, 6th Int. Conf. Proc., pp. 656–665. (in Russian).
[9] Mamutov, V.S., Arsentyeva, X.S., Blazhevich, V.V., & Kalatozishvili, I.V. (2022). Closed-Loop Computer Simulation of Electrohydropulse Forming. In: *Models and Methods for Advancing Mechanical Engineering in the Digital Economy*. St. Petersburg, pp. 188–192. (in Russian).
[10] Mamutov, V.S., Arsentyeva, X.S., Kalatozishvili, I.V. (2023). Pressure on Thin Sheet Blank in Discharge Chamber During Electrohydropulsed Forming. In: A.N. Evgrafov (Ed.), *MMESE 2022* (LNME, pp. 49–56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1_7.
[11] Wei, Y., Zhang, F., Wei, B., Xu, H., & He, K. (2021). Experimental and Numerical Analyses of Tubular Electrohydraulic Forming Process. *Key Engineering Materials*, 871, 80–86.
[12] Kosenkov, V.M., Bychkov, V.M. (2015). Mathematical Modeling of Transient Processes in the Discharge Circuit and Chamber of an Electrohydraulic System. *Electronnaya Obrabotka Materialov*, 51(2), 66–72. (in Russian).

[13] Vagin, V.A., Zdor, G.N., Mamutov, V.S. (1990). *Methods for Studying High-Speed Metal Deformation*. Minsk: Nauka i Tekhnika. 206 p. (in Russian).
[14] Mamutov, V.S. (2012). Computer Simulation of Fracture During Fine-Blanking of Ultra-Thin Sheet Metals. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*, 2, 465–471. (in Russian).
[15] Arsentyeva, X.S., Mamutov, V.S. (2020). Electrohydropulse Drawing-Forming with Intensified Blank Flange Flow. *Metalworking*, 3, 26–34. https://doi.org/10.25960/mo.2020.3.26.
[16] Arsentyeva, X.S., & Sidorova, E.V. (2022). Load Definition in Simulations of Special Sheet Forming Methods. In: *Models and Methods for Advancing Mechanical Engineering in the Digital Economy* (pp. 164–169). St. Petersburg: POLITECH-PRESS. EDN: ILRCFO. (in Russian).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 620.179.16
doi:10.18720/SPBPU/2/id-164

Д.А. Третьяков[1], Д.Б. Куатхина[2]

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В АЛЮМИНИИ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА



[1]Дмитрий Алексеевич Третьяков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (962)707-6338, E-mail: tretyakov_da@spbstu.ru



[2]Дарья Борисовна Куатхина,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (996)759-6978, E-mail: kuathina.db@edu.spbstu.ru .

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования акустоупругого эффекта при упруго-пластической деформации алюминиевых образцов с начальной анизотропией упругих свойств, изготовленных из промышленного проката. Предложен подход, позволяющий определять заранее неизвестную ориентацию осей главных напряжений и анизотропии механических свойств путем поворота системы ортогонально поляризованных поперечных волн. Он основан на построении и анализе угловых диаграмм акустической анизотропии. Было установлено, что на характерная форма угловых диаграмм определяется степенью поврежденности материала, что является диагностическим признаком. Предложенный подход может быть использован при входном неразрушающем контроле магистральных трубопроводов, парогенераторов, другой металлопродукции из проката, а также материалов, имеющих ориентированную внутреннюю структуру.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, акустическая анизотропия, ультразвук, пластические деформации, разрушение.

Введение

Возникновение пластических деформаций и развитие микродефектов оказывают влияние на прочностные характеристики металлов, вызывают деградацию механических свойств и являются предвестниками разрушения. Их своевременное обнаружение является условием для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных узлов и деталей машин. В настоящее время активно развиваются технологии акустического неразрушающего контроля металлов, в частности, методы акустической тензометрии [1]. Они используются для определения текущего напряженно-деформированного состояния без предварительной разгрузки. В основе таких методов лежит исследование акустоупругости – свойства, характеризующего анизотропию распространения упругих продольных и поперечных волн, вызванную внутренними напряжениями материала [2].

Акустоупругий эффект был предсказан теоретически в работах Г. Грина [3] и Л. Бриллюэна [4] и экспериментально обнаружен в металлах и горных породах П. Бриджменом [5] и Ф. Берчем [6]. Его физическое объяснение было построено на основе модели нелинейно-упругого материала с использованием упругого потенциала Ф. Мурнагана [7,8]. Теоретические модели, описывающие линейную акустоупругость, связаны с работами Д. Хьюза и Дж. Келли [9], Р. Тупина и Б. Бернштейна [10], К. Трусделла [11], Р. Смита [12], Д. Крекрафта [13], Т. Токуока и М. Сайто [14], Ю. Ивашимидзу [15], К. Окада [16], Х. Фукуока [17] и других.

Количественной характеристикой акустоупругого эффекта является параметр акустической анизотропии [18]. Расчет параметра акустической анизотропии связан с нахождением величины относительной разности скоростей плоско поляризованных поперечных волн взаимно ортогональной поляризации. Способ оценки главных напряжений посредством измерений параметра акустической анизотропии для одноосного и двухосного напряженного состояния был предложен Р. Бенсоном и В. Рилсоном [2]. Согласно действующим стандартам [19,20], вместо скоростей волн прецизионно измеряются временные задержки t_1, t_2 между n отраженными волновыми пакетами. Расчет акустической анизотропии проводится по формуле:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_{\text{ср}}} = \frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)/2} \cong \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2} = \frac{t_2 - t_1}{t_{\text{ср}}}$$

Для удобства параметр акустической анизотропии, как правило, рассчитывается в процентах:

$$a, \% = \frac{t_2 - t_1}{(t_1 + t_2)/2} \cdot 100\%$$

Современные результаты в области акустической тензометрии на базе акустоупругого эффекта были получены отечественными научными группами под руководством и при участии Н.Е. Никитиной [21,22],

А.О. Ватульяна [23], В.И. Ерофеева [24], В.В. Мишакина, А.В. Гончара и К.В. Курашкина [25-28], А.Л. Углова и А.А. Хлыбова [29-32], А.В. Федорова и И.В. Беркутова [33], Л.Н. Степановой [34], В.В. Муравьева и Л.В. Волковой [36-39], и ряда зарубежных исследователей [40-43].

В классических моделях акустоупругости предполагается, что вызванная наличием упругих напряжений и деформаций анизотропия упругих волн на порядок величины превосходит влияние других факторов. Для учета начальной текстуры и малых пластических деформаций Г. Джонсоном [44], М. Хирао и Ю. Пао [45], М. Кобаяши [46] были разработаны модели слабо-анизотропного нелинейно-упругого материала и модели нелинейно-упруго-пластического материала с упрочнением, объединенные под общим названием акустопластичности.

Новейшие эксперименты в металлах с начальной анизотропией упругих свойств, к числу которых относится промышленный прокат, выявили преимущественное влияние текстуры и пластических деформаций на акустическую анизотропию по сравнению с чисто упругими деформациями [47-50]. Это ранее было предсказано в работах Л.Б. Зуева [51]. Однако остается актуальной задача исследования акустической анизотропии при больших упруго-пластических деформациях металлов с ненулевой начальной анизотропией упругих свойств.

В статьях Н.Е. Никитиной [21,22] и других авторов направление действия нагрузки было заранее известно, были определены главные напряжения и их оси, а скорости поперечных волн были ориентированы строго вдоль них. Этот случай хорошо описан в теории акустоупругости [18,52]. Более сложным является случай, когда направления действия главных напряжений в материале заранее неизвестно.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования акустической анизотропии в условиях больших упруго-пластических деформаций образцов из алюминиевого проката. Для определения ориентации осей главных напряжений и осей анизотропии упругих модулей предлагается подход, основанный на расчете и анализе угловых диаграмм параметра акустической анизотропии. По содержанию он близок к способу построения индикатрис скоростей волн Лэмба, предложенному В.В. Муравьевым при изучении тонколистового проката электромагнитно-акустическим методом [53,54].

Методы

Для расчета угловых диаграмм параметра акустической анизотропии используется плоская поперечная волна, направленная вдоль оси n_3 по толщине материала, плоскость распространения которой определяется осью n_1. В начальном состоянии ось n_1 волны 1 (она совпадает с продольной осью датчика) и продольная ось $n_{||}$ образца расположены коллинеарно друг

другу. Для исследуемого участка наносится разметка с равным шагом $\Delta\varphi$ по углу (см. центральную точку образца на рис. 1). Далее, осуществляется поворот оси n_1 относительно оси $n_{||}$ на угол φ. Начальное значение $\varphi = 0°$ выбирается для угла, соответствующего нулю тригонометрического круга. Положительное изменение $\Delta\varphi > 0$ угла φ отсчитывается при повороте плоскости поляризации поперечной волны против часовой стрелки (на рис. 2). Шаг, с которым осуществляется поворот, отсчитывается от 90º по формуле (1):

$$90°/m = 2\Delta\varphi, \quad (1)$$

где m – целое число ($m = 1,2,3$ ...).

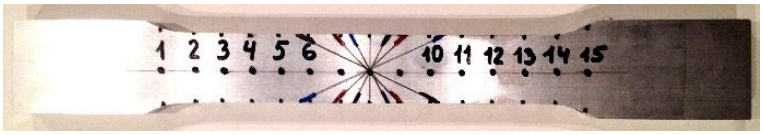


Рис. 1. Разметка в алюминиевом образце для измерения угловых диаграмм

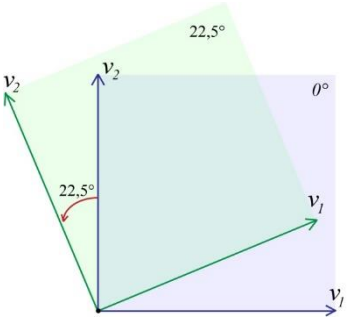


Рис. 2. Направление поворота осей

Измерения временных задержек рекомендуется проводить одним пьезоэлектрическим блоком ультразвукового датчика (на рис. 3) путем его поворота (на рис. 4), либо с помощью многокристальных (лепестковых) пьезодатчиков, устройство которых позволяет осуществлять излучение волн вдоль различных направлений при фиксированном положении излучателя. Требуется выполнение условия на малые погрешности результатов измерений при одних и тех же значениях угла φ в начале и конце каждого этапа измерений.

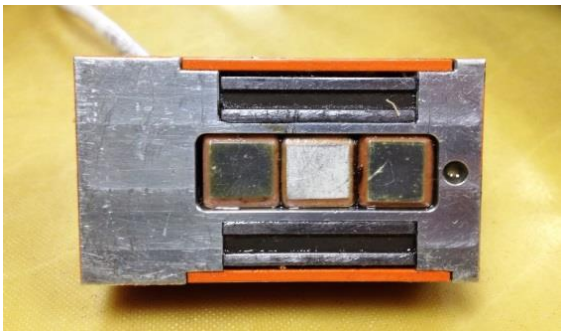


Рис. 3. Ультразвуковой датчик для исследования акустической анизотропии поперечных волн

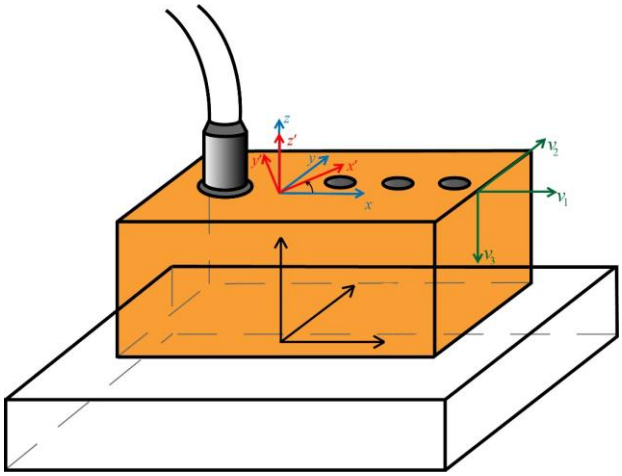


Рис. 4. Поворот датчика в процессе измерений для получения угловой диаграммы с равным угловым шагом

Для расчета угловых диаграмм необходима определенная форма расчета величины параметра акустической анизотропии. Фактически, в процессе измерений наблюдается одна поперечная волна, компоненты скорости которой V меняются при повороте плоскости ее поляризации на угол φ. В начальном положении, когда $\Delta\varphi = 0°$ (пусть $m = 2$), измеряется скорость V_1:

$$V^{2\cdot m\cdot\Delta\varphi}|_{\Delta\varphi=0,m=2} = V_1{}^{0°},$$

при повороте на угол 90° ($\Delta\varphi = 22.5°$) рассматривается скорость V_2:

$$V^{2\cdot m\cdot\Delta\varphi}|_{\Delta\varphi=22.5°,m=2} = V_2{}^{90°},$$

что соответствует случаю, когда орт n_1 волны 1 совпадает с ортом n_2 волны 2, ориентированным в перпендикулярном направлении, и с ортом $n_\perp$ поперечной оси образца. Примем в качестве угла антисимметрии $\varphi = 90°$, а в качестве угла симметрии $\varphi = 180°$, и введем следующее обозначение (2):

$$\varphi = 2 \cdot m \cdot \Delta\varphi \qquad (2)$$

Для расчета акустической анизотропии необходимо выполнение условия на ортогональность волн (3):

$$a^\varphi = (V^\varphi - V^{\varphi+90°})/((V^\varphi + V^{\varphi+90°})/2) \qquad (3)$$

При поляризации волны $V^{2\cdot m\cdot\Delta\varphi}$ вдоль направления действия одноосной растягивающей нагрузки (главного напряжения σ_1, случай $\Delta\varphi = 0°$), формула (3) принимает известный вид (4):

$$a^{0°} = (V^{0°} - V^{90°})/((V^{0°} + V^{90°})/2) = (V_1 - V_2)/((V_1 + V_2)/2) \qquad (4)$$

Измерения при значениях $\Delta\varphi \neq 0°$ позволяют получить информацию об акустической анизотропии при отличных от $\varphi = 0°$ углах ориентации системы ортогонально поляризованных поперечных волн V^φ и $V^{\varphi+90°}$, где $\varphi = 2m\Delta\varphi$. Таким образом, целью подхода к построению угловых диаграмм является изучение акустической анизотропии a^φ при повороте

системы $\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\}$ плоских поперечных волн взаимно ортогональной поляризации относительно осей нагружения и осей анизотропии материала.

С учетом перехода к расчету величины $a^{0^{\circ}}$ через временные задержки, соотношение (4) примет вид (5):

$$a^{\varphi} = (t^{\varphi+90^{\circ}} - t^{\varphi})/((t^{\varphi+90^{\circ}} + t^{\varphi})/2) \quad (5)$$

Аналогично находится (6) при $\varphi = 0°$:

$$a^{0^{\circ}} = (t^{90^{\circ}} - t^{0^{\circ}})/((t^{90^{\circ}} + t^{0^{\circ}})/2) = (t_2 - t_1)/((t_2 + t_1)/2) \quad (6)$$

Исследование угловых диаграмм позволяет анализировать начальную (на рис.5) и деформационно-обусловленную анизотропию скоростей поперечных волн в материале (на рис.6). Диаграммы акустической анизотропии могут строиться либо по модулю ($|a^{\varphi}|$), либо с учетом знака (на рис.5), который сменяется на противоположный при антисимметричном преобразовании системы $\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\}$ путем поворота на 90º (7):

$$a\{V^{\varphi+90^{\circ}}, V^{\varphi+180^{\circ}}\} = -a\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\} \quad (7)$$

Напротив, поворот системы $\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\}$ на 180º для любого угла φ приводит к симметричному преобразованию (8):

$$a\{V^{\varphi+180^{\circ}}, V^{\varphi+270^{\circ}}\} = a\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\} \quad (8)$$

Использование правил (7) и (8) позволяет строить угловые диаграммы акустической анизотропии a^{φ} для диапазона углов $[0°, 360°]$.

Результаты акустических измерений при одноосном монотонном упруго-пластическом нагружении

В работе исследовались алюминиевые образцы марки АМц двух партий: 500х70х20 мм с пределом текучести $\sigma_{т_1} = 65 \div 70$ МПа (партия №1) и 300х30х15 мм с $\sigma_{т_2} = 55 \div 60$ МПа (партия №2). Испытания на одноосное (вдоль оси $n_{||}$) монотонное растяжение образцов из партии №1 осуществлялись на машине INSTRON-8850, из партии №2 – на машине INSTRON-8801. Для измерения локальных деформаций использовался индукционный тензодатчик с базой измерений 10 мм и точностью 10^{-4} мм.

Сначала подход к построению угловых диаграмм был применен в опытах на растяжение алюминиевого образца партии №1 (на рис.1), вырезанного поперек направления проката. Образец был разгружен без разрушения после больших пластических деформаций (осевая деформация $\varepsilon^{e-p} = 16.6\%$) до достижения предела прочности $\sigma_{пр1}$.

Для измерения временных задержек и расчета параметра акустической анизотропии был использован прибор ИН-5101А [55]. Он реализует эхо-импульсный метод неразрушающего контроля механических напряжений методом акустоупругости [18]. В экспериментах использовался контактный датчик с частотой зондирующего импульса 5 МГц (на рис.3).

Измерения временных задержек осуществлялись в центральной точке (образец с разметкой на рис.1) при 7-ми значениях углов φ с равным шагом $\Delta\varphi = 22.5°$ в диапазоне $0° \div 157.5°$. При построении угловых диаграмм a^{φ} использовалось соотношение (5), а также правила симметрии (8) и антисимметрии (7). Серия угловых диаграмм, полученных по итогам 7-ми этапов нагружения образца при фиксированных значениях деформаций ε^{e-p} представлена на рис. 5.

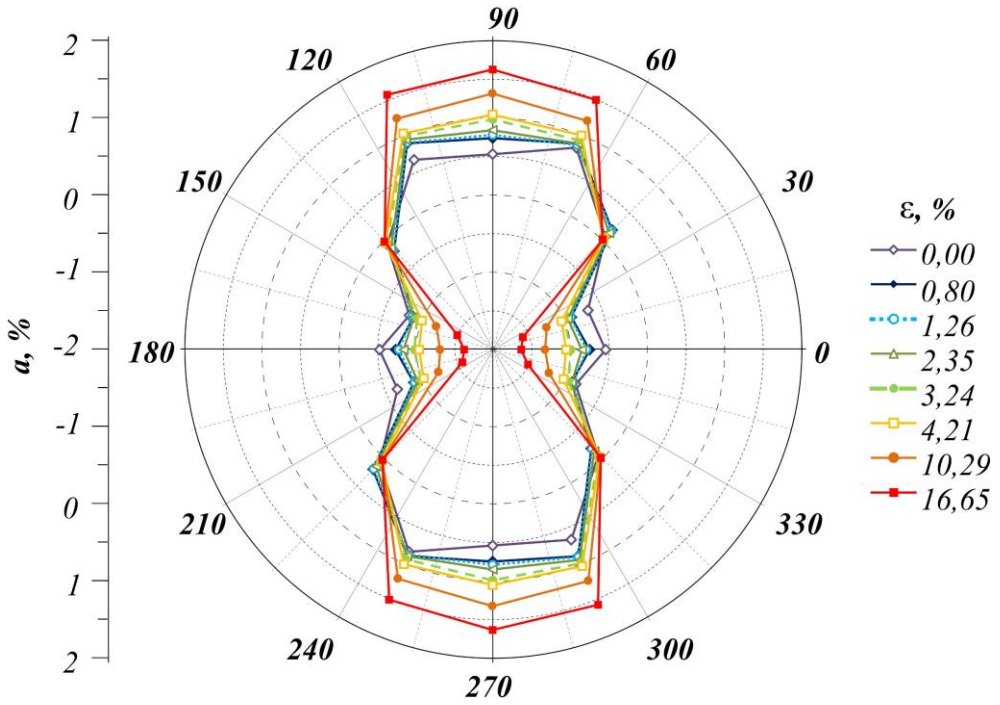


Рис. 5. Угловые диаграммы акустической анизотропии с ростом упруго-пластических деформаций алюминиевого образца партии №1

На рис.6 представлены графики изменения величины акустической анизотропии с ростом деформаций ε^{e-p} для углов $\varphi_1 = 45°$, $\varphi_2 = 67.5°$, $\varphi_3 = 90°$ и $\varphi_4 = 112.5°$. Наибольшие значения деформационно-обусловленной анизотропии наблюдаются для угла $\varphi_3 = 90°$ и равны 1.095%. Максимальные значения анизотропии при углах поворота датчика $67.5°$ и $112.5°$, то есть расположенных симметрично относительно φ_3 с шагом $\Delta\varphi = \pm 22.5°$, составляют 0.671% и 0.911% соответственно. Их отличие может быть вызвано асимметрией напряженного состояния в процессе испытаний, когда растяжение образца осуществляется только с верхнего захвата испытательной машины, в то время как нижний остается неподвижным, представляя собой жесткую заделку.

В то же время для угла $\varphi_1 = 45°$ значения анизотропии не превышают 0.125%, а с ростом деформаций выше уровня $\varepsilon^{e-p} \cdot 100\% \geq 0.8\%$ и вовсе

начинают убывать к величине, близкой к нулю (на рис. 6). Таким образом, при повороте системы ортогональных поперечных волн $\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\}$ на угол $\varphi = 45°$, а также смежные с ним направления, полученные по формулам (7) и (8), параметр акустической анизотропии оказывается нечувствительным к деформациям ε^{e-p} за границами малых упруго-пластических деформаций ($\varepsilon^{e-p} \cdot 100\% < 1\%$). Это означает, что даже погрешность в пределах $10° \div 20°$ при установке акустического датчика относительно ориентации осей главных напряжений σ_1, σ_2 может привести к большим ошибкам при проведении неразрушающего контроля. Для определения фактической ориентации осей главных напряжений может быть использован подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии a^{φ} (на рис. 5).

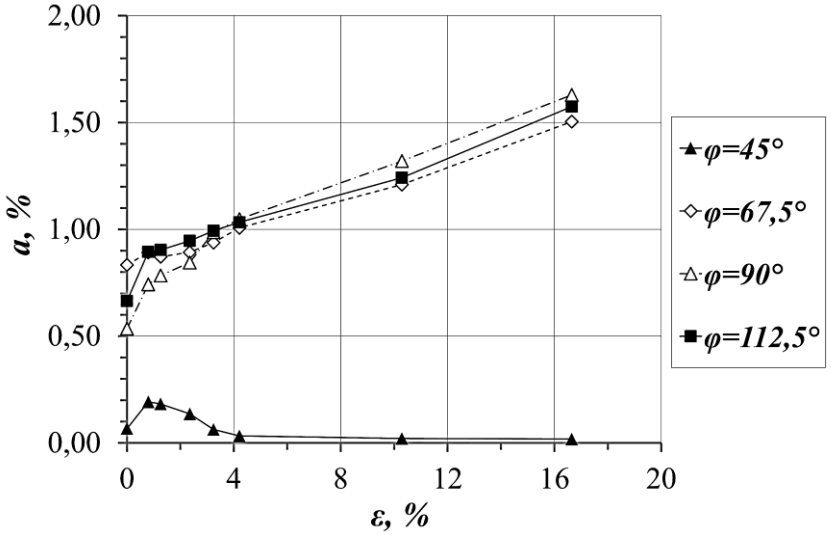


Рис. 6. Акустическая анизотропия для отдельных углов φ поворота системы поперечных волн $\{V^{\varphi}, V^{\varphi+90^{\circ}}\}$ в образце партии №1

Результаты акустических измерений при шлифовке поверхности после пластического разрушения

Исследования влияния повреждений на акустическую анизотропию проводились на образце партии №2 после разгрузки в результате пластического разрушения (разрыва). Было размечено $n = 8$ участков, расположенных на расстоянии $l = 24$ мм друг от друга (на рис.7). Толщина образца до нагружения составляла в среднем величину $\overline{h_0} = 20.5$ мм. После разрушения наблюдалось монотонное убывание толщины от $h_1 = 20.4$ мм в точке №1 до $h_1 = 16.8$ мм в точке №7.

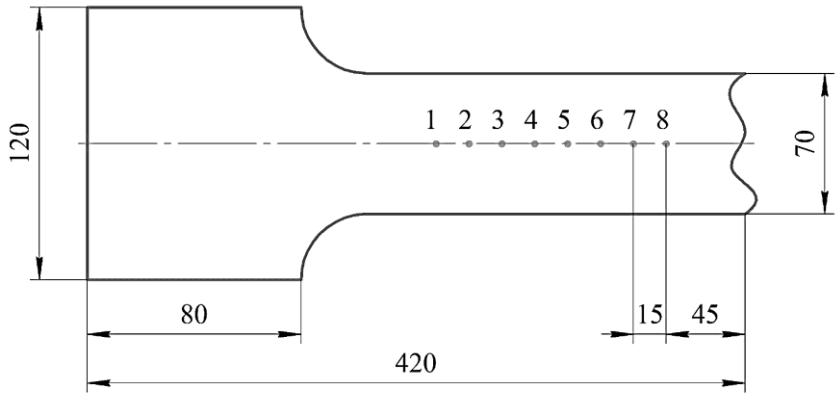


Рис. 7. Схема расположения исследуемых точек в образце партии №2 после разрушения

Были получены угловые диаграммы параметра акустической анизотропии для углов поворота ультразвукового датчика на $\varphi = 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°, 112.5°, 135°$ и $157.5°$ при его последовательном перемещении от точки №1, расположенной у галтельного перехода в месте закрепления образца захватами испытательной машины, до точки №8 вблизи места разрушения (на рис.7). На рис.8 представлены диаграммы без симметричного отражения из предположения $a^{\Delta\varphi} = a^{\Delta\varphi+180°}$.

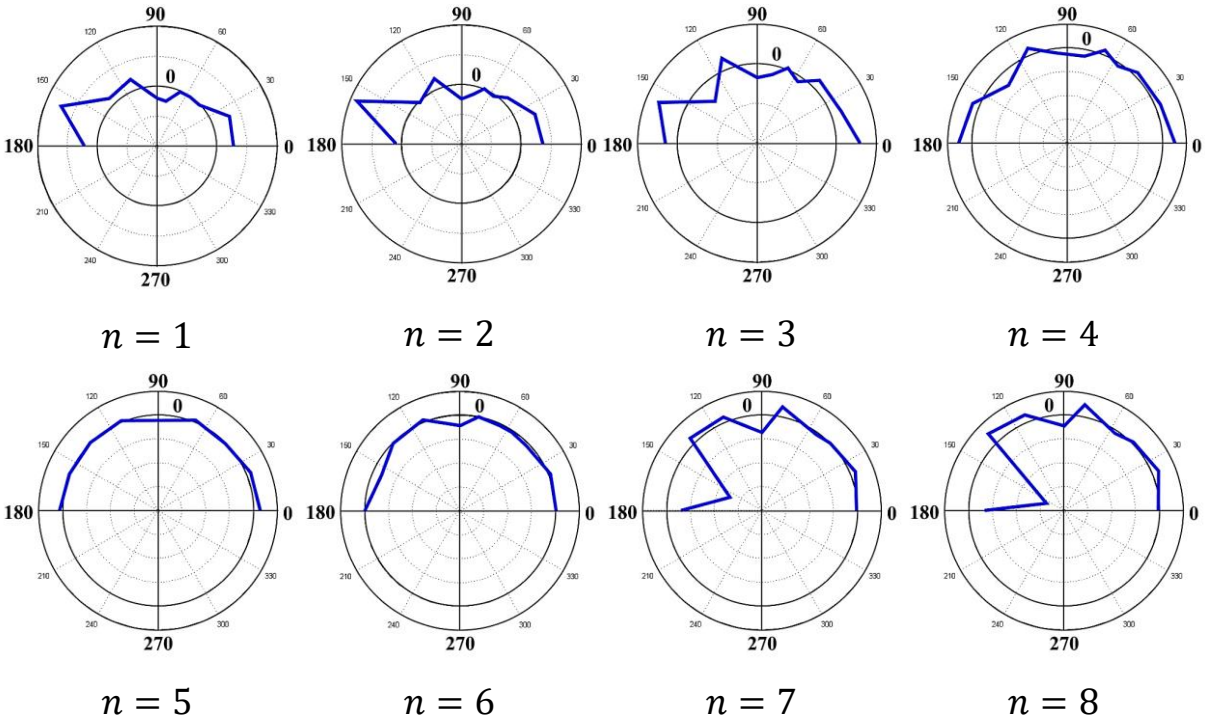


Рис. 8. Диаграммы акустической анизотропии в $n = 8$ точках образца партии №2 после разрушения

Были проведены опыты по шлифовке алюминиевого образца, при этом на каждом этапе шлифовки в точках 1-7 рассчитывались линейные распределения акустической анизотропии, а в точке №5 строились угловые диаграммы. Всего было проведено 8 этапов шлифовки с одной стороны образца. Средняя толщина $\overline{\Delta h}$ удаленного слоя на 8 этапах составила $65, 140, 220, 275, 440, 570, 670$ и 690 микрон соответственно. Линейные распределения акустической анизотропии в точках вдоль оси образца после этапов 1-4 и этапов 5-8 шлифования образца представлены на рис. 9 и рис. 10.

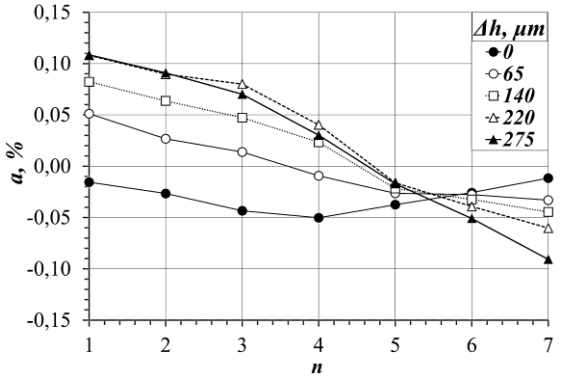


Рис. 9. Акустическая анизотропия в образце партии №2 после 1-4 этапов шлифования

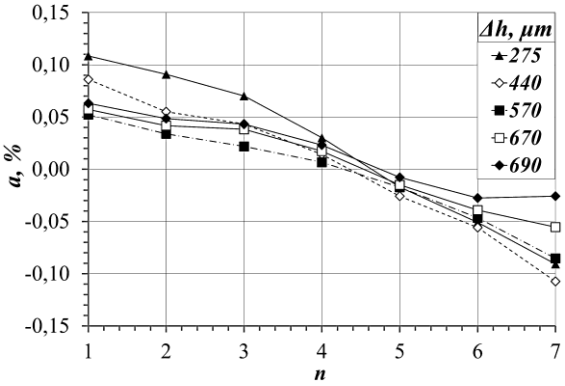


Рис. 10. Акустическая анизотропия в образце партии №2 после 4-8 этапов шлифования

График изменения величины акустической анизотропии в точках 1-5 образца в зависимости от толщины сошлифованного поверхностного слоя представлен на рис. 11.

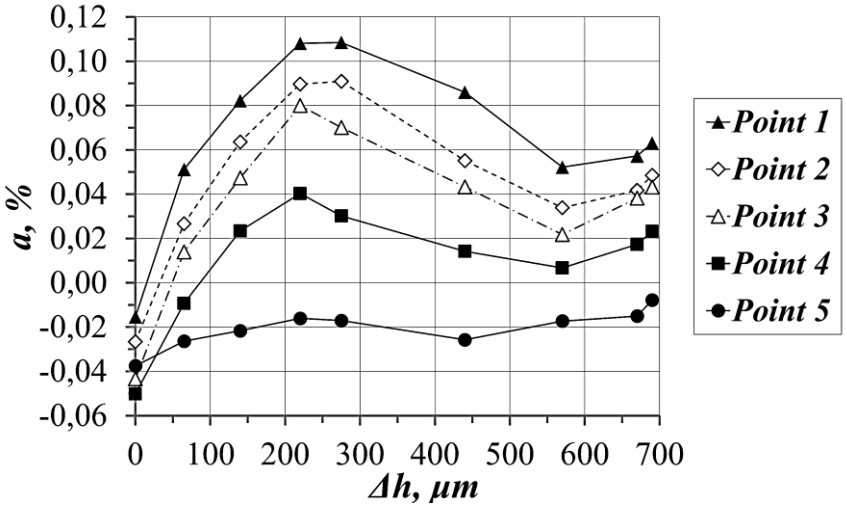


Рис. 11. Зависимость анизотропии от толщины сошлифованного слоя в точках 1-5 образца партии №2

На рис. 12 представлено семейство угловых диаграмм акустической анизотропии, построенное по результатам измерений в точке 5 на расстоянии 75 мм от места разрыва до испытаний, а также на этапах №2, 4, 6 и 8 шлифовки образца.

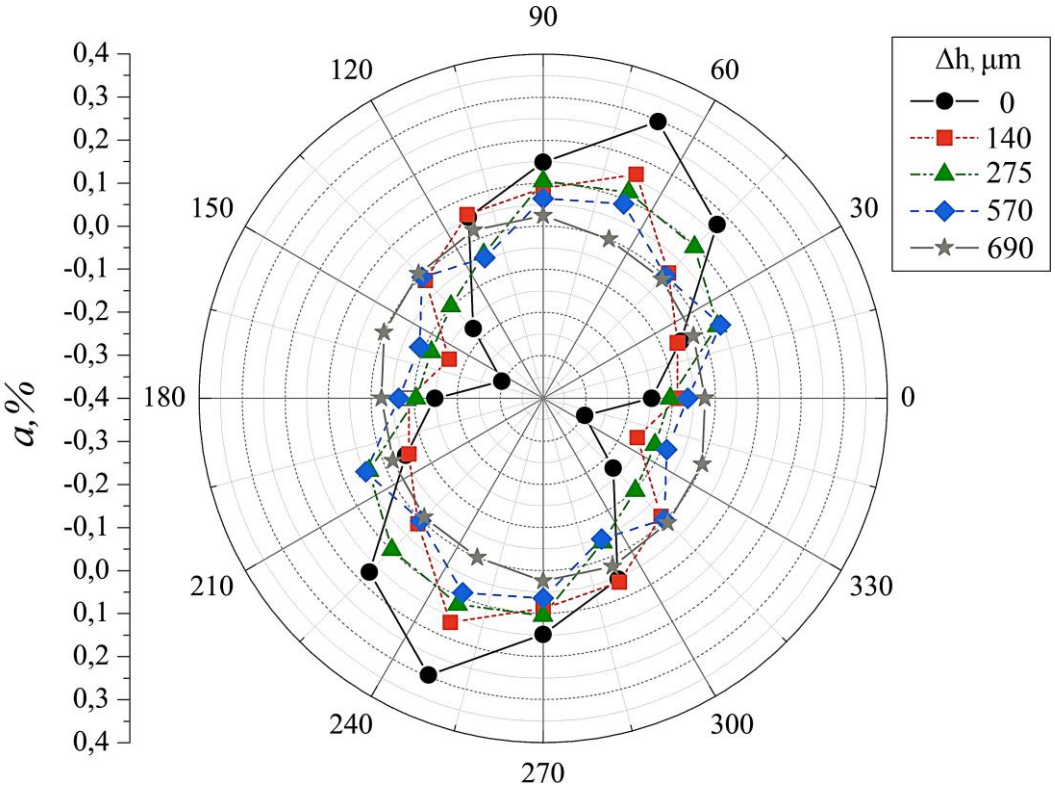


Рис. 12. Угловые диаграммы акустической анизотропии в точке №5 до и после 2,4,6 и 8-го этапов шлифования образца партии №2

Обсуждение

Исходя из вида диаграмм на рис.5 можно сделать вывод о том, что характер углового распределения акустической анизотропии a^{φ} определяется эффектом от начальной анизотропии упругих модулей. На него накладывается эффект деформационно-обусловленной анизотропии, вызванный упруго-пластическими деформациями ε^{e-p} образца. В случае алюминиевого проката эти два эффекта оказываются сопоставимы между собой по абсолютной величине (на рис.6). Построение угловых диаграмм при $\varepsilon^{e-p} = 0\%$ (на рис.5) позволяет установить ориентацию осей анизотропии материала и избежать ошибок при определении величины начальной (собственной) акустической анизотропии металла в соответствии со стандартами [19,20].

Можно видеть, как в уже разрушенном и разгруженном образце при переходе от одного участка измерений к другому (слева направо на рис.8) наблюдается эволюция угловых диаграмм с образованием характерных

изломов, предположительно вызванных влиянием накопленных в результате пластического разрушения повреждений.

На основании распределений на рис.9 и на рис.10 можно сделать вывод о том, что послойное удаление поврежденного поверхностного слоя приводит к неодинаковому изменению акустической анизотропии на различных участках образца не только по величине, но и по знаку, а также о смене характера распределения акустической анизотропии по всему образцу. Так, на этапах 1-4 приращение $\Delta a > 0$ наблюдается в точках №1-4 ($\Delta a \cong +0.13\%$ по величине), в то время как между точками №5 и №6 имеется участок, на котором происходит убывание величины акустической анизотропии $\Delta a < 0$ (в самих точках №5 и 6 $\Delta a \cong \pm 0.03\%$). Смена тренда Δa наступает на этапах 5-8 шлифования, причем сразу по всему образцу ($\Delta a < 0$ становится в точках №1-4 и, наоборот, $\Delta a > 0$ в точках №5-7). Таким образом, влияние поврежденного слоя на величину $a, \%$ оказывается неоднозначным, это видно по разности значений акустической анизотропии для фиксированных n точек на рис.9 и рис.10.

Влияние повреждений на акустическую анизотропию по мере удаления поверхностного слоя сверх определенной толщины (предположительно, коррелирующей со средним размером зерна металла) имеет затухающий характер. Так, если на этапах 1-3 шлифовки при среднем значении удаленного слоя $\overline{\Delta h_{1-3}} = 220$ микрон максимальное изменение составило $|\Delta a_{\max 1-3}| = 0.124\%$, то после удаления дополнительных $\overline{\Delta h_{4-8}} = 470$ микрон поверхности изменение акустической анизотропии оказалось равным только $|\Delta a_{\max 4-8}| = 0.058\%$.

Характер затухания эффекта по мере удаления поверхностного слоя (на рис.11) имеет осциллирующий вид, который качественно сохраняется, однако меняет свою амплитуду при приближении к месту разрыва образца (на рис.7) при движении от точки 1 к точке 5.

В результате шлифования меняется характер угловых диаграмм акустической анизотропии. На рис.12 видно, что изменяется не только размер и форма, но и ориентация угловых диаграмм в одной и той же области материала, а именно происходит “разворот” в положение, соосное с осями анизотропии механических свойств материала. В результате этапе 8 шлифовки (690 микрон удаленного слоя) устанавливается эллиптическая форма диаграммы (на рис.12), обусловленная влиянием текстурирования материала – как начального, так и приобретенного в ходе пластической деформации.

Смена характера угловых диаграмм вызвана ослаблением влияния поврежденного слоя металла. Стабилизация формы и размеров диаграмм в результате шлифовки может являться диагностическим признаком того, что поврежденный поверхностный слой более не оказывает существенного влияния на результаты измерений акустической анизотропии. При этом изменение величины параметра акустической анизотропии относительно

своего начального уровня при шлифовании поверхностного слоя металла является признаком накопленной поврежденности в процессе деформации. Удаление 200-300 микрон поверхностного слоя металла не оказывает существенного влияния на несущую способность конструкций ввиду малой глубины шлифования. В ряде случаев очистка и шлифовка поверхности являются необходимыми условиями при проведении ультразвукового контроля.

Заключение

В работе был рассмотрен подход к построению угловых диаграмм акустической анизотропии. Он позволил установить ориентацию осей анизотропии материала в случае металлического проката, определить направления действия максимальных напряжений и установить характер анизотропии механических свойств.

Был сделан вывод о том, что характер угловых диаграмм акустической анизотропии определяется начальной анизотропией упругих модулей, величиной деформационно-обусловленной анизотропии поперечных волн, а также степенью поврежденности металла.

Стабилизация формы и размеров угловых диаграмм в результате послойной шлифовки поверхностного слоя на глубину нескольких размеров зерна может являться диагностическим признаком снижения влияния поверхностных повреждений металла на результаты ультразвуковой диагностики металла по всей его толщине.

Предлагаемый подход позволяет оценивать величину упругих напряжений и пластических деформаций в конструкции без ее разгрузки. Он может быть использован при входном неразрушающем контроле труб, проката, другой металлопродукции, а также материалов, имеющих ориентированную внутреннюю структуру. Требованием к его реализации является обеспечение качества контакта пьезопреобразователей с поверхностью образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 171–178. https://doi.org/10.1134/S1061830915030079

[2] Benson R.W., Raelson V.J. Acoustoelasticity. Production Engineering. 1959. 30(29), pp. 56-59.

[3] Green G. An Essay on the Determination of the Exterior and Interior attractions of Ellipsoids of Variable Densities. Mathematical Papers of George Green, New York, Chelsea. 1828.

[4] Brillouin L. Sur les tensions de radiation. Annales de Physique. 1925. 10(4), pp. 528-586. https://doi.org/10.1051/anphys/192510040528
[5] Bridgman P. W. The effect of pressure on the rigidity of several metals. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, American Academy of Arts & Sciences. 1929. 64(3), pp. 39-49. https://doi.org/10.4159/harvard.9780674287822.c28
[6] Birch F. The effect of pressure on the modulus of rigidity of several metals and glasses. Journal of Applied Physics. 1937. 8(2), pp. 129-133. https://doi.org/10.1063/1.1710264
[7] Murnaghan F. D. Finite deformations of an elastic solid. American Journal of Mathematics. 1937. 59(2), pp. 235-260. https://doi.org/10.2307/2371405
[8] Birch F. The effect of pressure upon the elastic parameters of isotropic solids, according to Murnaghan's theory of finite strain. Journal of Applied Physics. 1938. 9(4), pp. 279-288. https://doi.org/10.1063/1.1710417
[9] Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids. Physical Review. 1953. 92(5), pp. 1145-1149. https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145
[10] Toupin R. A., Bernstein B. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect. The Journal of the Acoustical Society of America. 1961. 33(2), pp. 216-225. https://doi.org/10.1121/1.1908623
[11] Truesdell C. General and exact theory of waves in finite elastic strain. Archive for rational mechanics and analysis. 1961. 8(1), pp. 263-296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88691-1_5
[12] Smith R.T. Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect. Ultrasonics. 1963. 1(3), pp. 135-147. https://doi.org/10.1016/0041-624X(63)90003-9
[13] Crecraft D. I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. Journal of Sound and Vibration. 1967. 5(1), pp. 173-192. https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1
[14] Tokuoka T., Saito M. Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals. The Journal of the Acoustical Society of America. 1969. 45(5), pp. 1241-1246. https://doi.org/10.1121/1.1911595
[15] Iwashimizu Y., Kubomura K. Stress-induced rotation of polarization directions of elastic waves in slightly anisotropic materials. International Journal of Solids and Structures. 1973. 9(1), pp. 99-114. https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90035-8
[16] Okada K. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. Journal of the Acoustical Society of Japan (E). 1980. 1(3), pp. 193-200. https://doi.org/10.1250/ast.1.193
[17] Fukuoka H., Toda H., Naka H. Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity. Experimental Mechanics. 1983. 23(1), pp. 120-128. https://doi.org/10.1007/BF02328690

[18] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ. 2005. 208 с.
[19] ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2007.
[20] ГОСТ Р 52890-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. Москва: Стандартинформ. 2008.
[21] Nikitina N.E., Kazachek S.V. Theoretical and experimental study of stress concentration during stretching of a plate with a cut. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. 37, pp. 38–41. https://doi.org/10.1007/s12001-008-1009-9
[22] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. 45, pp. 861–866. https://doi.org/10.1134/S1061830909120043
[23] Vatul'yan A.O. The theory of inverse problems in the linear mechanics of a deformable solid. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2010. 74(6), pp. 648–653. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.004
[24] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic Sensing Method for Evaluating the Limit State of Metal Structures Associated with the Onset of Plastic Deformation. Physical Mesomechanics. 2020. 23, pp. 241–245. https://doi.org/10.1134/S102995992003008X
[25] Курашкин К. В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале. Акустический журнал. 2019. 65(3), с. 382-388. https://doi.org/10.1134/S0320791919030055
[26] Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Use of Texture-Dependent Ultrasonic Parameter as Indicator of Degradation of Hot-Rolled Thin-Sheet Steel Under Uniaxial Tension. Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. 41(2), p. 46. https://doi.org/10.1007/s10921-022-00879-w
[27] Gonchar A.V., Sergeeva O.A., Kurashkin K.V. Metallographic and ultrasonic studies of fatigue failure of ASTM 1020 steel in the base metal and heat affected zone. Procedia Structural Integrity. 2022. 40, pp. 166-170. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.04.022
[28] Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Acoustic Birefringence Changes in the Base Metal and Heat Affected Zone of ASTM 1020 Steel under Plastic Deformation and Fatigue. E3S Web of Conferences. 2023. 398, pp. 01044. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801044
[29] Uglov A.L., Khlybov A.A. On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 210–216. https://doi.org/10.1134/S1061830915040087

[30] Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Uglov A.L., Anosov M.S., Shatagin D.A. Usage of the acoustic method for monitoring of the gaz pipelines stress. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1499, pp. 012044. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1499/1/012044
[31] Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. 57, pp. 21-30. https://doi.org/10.1134/S1061830921010083
[32] Khlybov A.A., Uglov A.L. On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. 59(1), pp. 22-32. https://doi.org/10.1134/S1061830923700183
[33] Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E. et al. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. Measurement Techniques. 2018. 61, pp. 297–302. https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3
[34] Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. (7), с. 103-109.
[35] Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. 82(12), с. 52-57.
[36] Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Булдакова И.В. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов. Приборы и методы измерений. 2019. 10(1), с. 42-52. https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52
[37] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Volkova L.V. et al. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022. 51, pp. 102-635. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635
[38] Волкова Л.В., Муравьева О.В., Колпаков К.В. Сравнительный анализ акустической анизотропии труб и листов с использованием SH- и TH-волн. Дефектоскопия. 2023. (8), с. 68-70. https://doi.org/10.31857/S0130308223080092
[39] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Nagovitsyn A.A. Investigation of acoustic parameters of dispersion-hardening corrosion-resistant steel XM-12. AIP Conference Proceedings. 2023. 2605(1), pp. 020021. https://doi.org/10.1063/5.0122757
[40] Castellano A., Foti P., Fraddosio A., Marzano S., Paparella F., Piccioni M. D. Monitoring applied and residual stress in materials and structures by non-

destructive acoustoelastic techniques. 2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). IEEE. 2016. pp. 1-5. https://doi.org/10.1109/EESMS.2016.7504830
[41] Castellano A., Fraddosio A., Marzano S., Piccioni M. D. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect. Procedia engineering. 2017. 199, pp. 1519-1526. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.494
[42] Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. 53(1), pp. 39-50. https://doi.org/10.1134/S1061830917010077
[43] Ivanova Y. Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods. MATEC Web of Conferences. 2018. 145, pp. 05007. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814505007
[44] Johnson G. C. Acoustoelastic theory for elastic–plastic materials. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981. 70(2), pp. 591-595. https://doi.org/10.1121/1.386748
[45] Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. The Journal of the Acoustical society of America. 1985. 77(5), pp. 1659-1664. https://doi.org/10.1121/1.391964
[46] Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. International Journal of Plasticity. 1987. 3(1), pp. 1-20. https://doi.org/10.1016/0749-6419(87)90014-3
[47] Alhimenko A. A., Belyaev A. K., Grishchenko A. I., Semenov A. S., Tretyakov D. A., Polyanskiy V. A., Yakovlev Y. A. Propagation of acoustic waves during the control of hydrogen-induced destruction of metals by the acoustoelastic effect. 2018 Days on Diffraction (DD), IEEE. 2018. pp. 11-16. https://doi.org/10.1109/DD.2018.8553151
[48] Tretyakov D. A., Belyaev A. K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing. 2019. 2176(1), pp. 020011. https://doi.org/10.1063/1.5135123
[49] Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Tretyakov D.A. Acoustoelastic Effect During Plastic Deformation of Anisotropic Metals. International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”, Cham: Springer International Publishing. 2020. pp. 296-302. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_23
[50] Третьяков Д. А. Акустическая анизотропия на различных стадиях деформационного процесса в металлах. Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2020. 1, с. 43-56. https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.1.043-056
[51] Semukhin B. S., Zuev L. B., Bushmeleva K. I. The velocity of ultrasound in low-carbon steel deformed at the low yield limit. Journal of applied

mechanics and technical physics. 2000. 41(3), pp. 556-559. https://doi.org/10.1007/BF02465311
[52] Гузь А.Н., Махорт Ф. Г., Гуща О.И. Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка. 1977. С. 148.
[53] Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. Steel in Translation. 2016. 46, pp. 752–756. https://doi.org/10.3103/S0967091216100077
[54] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of acoustic anisotropy of thick-sheet steel. Steel in Translation. 2021. 51, pp. 335-341. https://doi.org/10.3103/S0967091221050120
[55] Прибор для измерения механических напряжений ИН-5101А. Руководство по эксплуатации. ИНКО.468160.008 РЭ. Нижний Новгород: ООО "ИНКОТЕС". 2022. 59 с.

D.A. Tretyakov, D.B. Kuatkhina

NON-DESTRUCTIVE ULTRASONIC TESTING OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATIONS IN ALUMINUM BY MEASURING THE ACOUSTOELASTIC EFFECT

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The work is devoted to experimental study of the acoustoelastic effect during elasto-plastic deformation of aluminum specimens with initial anisotropy of elastic properties. The approach to determining directions of transverse waves polarization in case of unknown directions of principal stress axes and anisotropy of mechanical properties was proposed. It is based on analysis of angular diagrams of acoustic anisotropy parameter. It was found that shape of angular diagrams is determined by material damage. The approach can be used in incoming non-destructive testing of pipelines, steam generators, and different materials with oriented internal structure.

Key words: non-destructive testing, acoustoelasticity, acoustic anisotropy, ultrasound, plastic deformation, destruction.

REFERENCES

[1] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 171–178. https://doi.org/10.1134/S1061830915030079

[2] Benson R.W., Raelson V.J. Acoustoelasticity. Production Engineering. 1959. 30(29) pp. 56-59.
[3] Green G. An Essay on the Determination of the Exterior and Interior attractions of Ellipsoids of Variable Densities. Mathematical Papers of George Green, New York, Chelsea. 1828.
[4] Brillouin L. Sur les tensions de radiation. Annales de Physique. 1925. 10(4), pp. 528-586. https://doi.org/10.1051/anphys/192510040528
[5] Bridgman P. W. The effect of pressure on the rigidity of several metals. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, American Academy of Arts & Sciences. 1929. 64(3), pp. 39-49. https://doi.org/10.4159/harvard.9780674287822.c28
[6] Birch F. The effect of pressure on the modulus of rigidity of several metals and glasses. Journal of Applied Physics. 1937. 8(2), pp. 129-133. https://doi.org/10.1063/1.1710264
[7] Murnaghan F. D. Finite deformations of an elastic solid. American Journal of Mathematics. 1937. 59(2), pp. 235-260. https://doi.org/10.2307/2371405
[8] Birch F. The effect of pressure upon the elastic parameters of isotropic solids, according to Murnaghan's theory of finite strain. Journal of Applied Physics. 1938. 9(4), pp. 279-288. https://doi.org/10.1063/1.1710417
[9] Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids. Physical Review. 1953. 92(5), pp. 1145-1149. https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145
[10] Toupin R. A., Bernstein B. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. Acoustoelastic effect. The Journal of the Acoustical Society of America. 1961. 33(2), pp. 216-225. https://doi.org/10.1121/1.1908623
[11] Truesdell C. General and exact theory of waves in finite elastic strain. Archive for rational mechanics and analysis. 1961. 8(1), pp. 263-296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88691-1_5
[12] Smith R.T. Stress-induced anisotropy in solids – the acousto-elastic effect. Ultrasonics. 1963. 1(3), pp. 135-147. https://doi.org/10.1016/0041-624X(63)90003-9
[13] Crecraft D. I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. Journal of Sound and Vibration. 1967. 5(1), pp. 173-192. https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90186-1
[14] Tokuoka T., Saito M. Elastic wave propagations and acoustical birefringence in stressed crystals. The Journal of the Acoustical Society of America. 1969. 45(5), pp. 1241-1246. https://doi.org/10.1121/1.1911595
[15] Iwashimizu Y., Kubomura K. Stress-induced rotation of polarization directions of elastic waves in slightly anisotropic materials. International Journal of Solids and Structures. 1973. 9(1), pp. 99-114. https://doi.org/10.1016/0020-7683(73)90035-8

[16] Okada K. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique. Journal of the Acoustical Society of Japan (E). 1980. 1(3), pp. 193-200. https://doi.org/10.1250/ast.1.193
[17] Fukuoka H., Toda H., Naka H. Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity. Experimental Mechanics. 1983. 23(1), pp. 120-128. https://doi.org/10.1007/BF02328690
[18] Nikitina N. E. Acoustoelasticity. Practical application experience. N. Novgorod: TALAM. 2005. p. 208. (rus)
[19] GOST R 52731-2007. Non-destructive testing. Stress evaluation by ultrasound. General requirements. Moscow: Standartinform. 2007. (rus.)
[20] GOST R 52890-2007. Non-destructive testing. Evaluation of stresses in material of pipelines by ultrasound method. General requirements. Moscow: Standartinform. 2007. (rus.)
[21] Nikitina N.E., Kazachek S.V. Theoretical and experimental study of stress concentration during stretching of a plate with a cut. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. 37, pp. 38–41. https://doi.org/10.1007/s12001-008-1009-9
[22] Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. 45, pp. 861–866. https://doi.org/10.1134/S1061830909120043
[23] Vatul'yan A.O. The theory of inverse problems in the linear mechanics of a deformable solid. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2010. 74(6), pp. 648–653. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2011.01.004
[24] Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A. et al. Ultrasonic Sensing Method for Evaluating the Limit State of Metal Structures Associated with the Onset of Plastic Deformation. Physical Mesomechanics. 2020. 23, pp. 241–245. https://doi.org/10.1134/S102995992003008X
[25] Kurashkin K.V. Study of the Acoustoelastic Effect in an Anisotropic Plastically Deformed Material. Physical foundations of technical acoustics. 2019. 65(3), pp. 316-321. https://doi.org/10.1134/S1063771019030047
[26] Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Use of Texture-Dependent Ultrasonic Parameter as Indicator of Degradation of Hot-Rolled Thin-Sheet Steel Under Uniaxial Tension. Journal of Nondestructive Evaluation. 2022. 41(2), p. 46. https://doi.org/10.1007/s10921-022-00879-w
[27] Gonchar A.V., Sergeeva O.A., Kurashkin K.V. Metallographic and ultrasonic studies of fatigue failure of ASTM 1020 steel in the base metal and heat affected zone. Procedia Structural Integrity. 2022. 40, pp. 166-170. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.04.022
[28] Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Acoustic Birefringence Changes in the Base Metal and Heat Affected Zone of ASTM 1020 Steel

under Plastic Deformation and Fatigue. E3S Web of Conferences. 2023. 398, pp. 01044. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339801044
[29] Uglov A.L., Khlybov A.A. On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. 51, pp. 210–216. https://doi.org/10.1134/S1061830915040087
[30] Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Uglov A.L., Anosov M.S., Shatagin D.A. Usage of the acoustic method for monitoring of the gaz pipelines stress. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1499, pp. 012044. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1499/1/012044
[31] Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. 57, pp. 21-30. https://doi.org/10.1134/S1061830921010083
[32] Khlybov A.A., Uglov A.L. On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. 59(1), pp. 22-32. https://doi.org/10.1134/S1061830923700183
[33] Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E. et al. Development of Acoustic Methods of Control of the Stress-Strain State of Threaded Connections. Measurement Techniques. 2018. 61, pp. 297–302. https://doi.org/10.1007/s11018-018-1424-3
[34] Stepanova L.N., Bekher S.A., Kurbatov A.N., Tenitilov E.S. Studying the stressed state of a rail by acoustoelasticity and tensometry. Izvestiya Vyssikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo. 2013. (7), pp. 103–109. (rus.)
[35] Murav’ev V.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. Acousto-Elastic Study of the Internal Stresses in Metal Structures. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2016. 82(12), pp. 52-57. (rus.)
[36] Volkova L.V., Murav’eva O.V., Murav’ev V.V., Buldakova I.V. Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines’ Metal. Devices and Methods of Measurements. 2019. 10 (1), pp. 42–52. (rus.) https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52
[37] Murav’eva O.V., Murav’ev V.V., Volkova L.V. et al. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022. 51, pp. 102-635. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635
[38] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Kolpakov K.V. Comparative analysis of acoustic anisotropy of pipes and sheets using SH- and tH-waves. Defektoskopia. 2023. (8), pp. 68-70. (rus.) https://doi.org/10.31857/S0130308223080092

[39] Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Nagovitsyn A.A. Investigation of acoustic parameters of dispersion-hardening corrosion-resistant steel XM-12. AIP Conference Proceedings. 2023. 2605(1), pp. 020021. https://doi.org/10.1063/5.0122757
[40] Castellano A., Foti P., Fraddosio A., Marzano S., Paparella F., Piccioni M. D. Monitoring applied and residual stress in materials and structures by non-destructive acoustoelastic techniques. 2016 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). IEEE. 2016. pp. 1-5. https://doi.org/10.1109/EESMS.2016.7504830
[41] Castellano A., Fraddosio A., Marzano S., Piccioni M. D. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect. Procedia engineering. 2017. 199, pp. 1519-1526. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.494
[42] Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. 53(1), pp. 39-50. https://doi.org/10.1134/S1061830917010077
[43] Ivanova Y. Non-destructive monitoring of tensile of mild steel samples by magnetic Barkhausen and ultrasonic methods. MATEC Web of Conferences. 2018. 145, pp. 05007. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814505007
[44] Johnson G. C. Acoustoelastic theory for elastic–plastic materials. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981. 70(2), pp. 591-595. https://doi.org/10.1121/1.386748
[45] Hirao M., Pao Y. H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. The Journal of the Acoustical society of America. 1985. 77(5), pp. 1659-1664. https://doi.org/10.1121/1.391964
[46] Kobayashi M. Theoretical study of acoustoelastic effects caused by plastic anisotropy growth. International Journal of Plasticity. 1987. 3(1), pp. 1-20. https://doi.org/10.1016/0749-6419(87)90014-3
[47] Alhimenko A. A., Belyaev A. K., Grishchenko A. I., Semenov A. S., Tretyakov D. A., Polyanskiy V. A., Yakovlev Y. A. Propagation of acoustic waves during the control of hydrogen-induced destruction of metals by the acoustoelastic effect. 2018 Days on Diffraction (DD), IEEE. 2018. pp. 11-16. https://doi.org/10.1109/DD.2018.8553151
[48] Tretyakov D. A., Belyaev A. K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing. 2019. 2176(1), pp. 020011. https://doi.org/10.1063/1.5135123
[49] Belyaev A.K., Galyautdinova A.R., Tretyakov D.A. Acoustoelastic Effect During Plastic Deformation of Anisotropic Metals. International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics", Cham: Springer International Publishing. 2020. pp. 296-302. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_23

[50] Tretyakov D. A. Acoustic anisotropy at different stages of the deformation process in metals. Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2020. 1, pp. 43-56. (rus.) https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.1.043-056
[51] Semukhin B. S., Zuev L. B., Bushmeleva K. I. The velocity of ultrasound in low-carbon steel deformed at the low yield limit. Journal of applied mechanics and technical physics. 2000. 41(3), pp. 556-559. https://doi.org/10.1007/BF02465311
[52] Guz A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I. Introduction to acoustoelasticity. *Kiev: Naukova Dumka*; 1977. p. 148. (rus.)
[53] Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. Steel in Translation. 2016. 46, pp. 752–756. https://doi.org/10.3103/S0967091216100077
[54] Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Nonuniformity of acoustic anisotropy of thick-sheet steel. Steel in Translation. 2021. 51, pp. 335-341. https://doi.org/10.3103/S0967091221050120
[55] Instrument for measuring mechanical stress IN-5101A. Manual. INKO.468160.008. Nizhny Novgorod: INCOTES. 2022. p. 59. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.01:539.431
doi:10.18720/SPBPU/2/id-165

К.А. Бадиков[1], А.Н. Савкин[2], А.И. Лебедев[3], А.А. Седов[4]

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ В РАЗЛИЧНОМ СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ



[1]Кирилл Андреевич Бадиков
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: 8(8442)24-80-13, E-mail: badikov_kirill@mail.ru



[2]Алексей Николаевич Савкин
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: savkin@vstu.ru



[3]Али Исмоилович Лебедев
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: djalixsander@gmail.com



[4]Александр Александрович Седов
Волгоградский государственный технический университет
Россия, Волгоград
Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: sed0ff@yandex.ru

Аннотация

Исследована кинетика роста усталостной трещины в титановом сплаве ВТ6 (α+β структура) при внешнем нерегулярном (квазислучайном) циклическом нагружении. Показаны экспериментальные результаты роста усталостных трещин и кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) для разных структурных состояний сплава (глобулярной и пластинчатой микроструктуре) при циклическом нагружении компактных образцов типа С(Т) толщиной 5 мм. Предложена методика оценки характера нерегулярного нагружения с помощью коэффициента нерегулярности. Отмечено, что кинетика роста трещины во многом

зависит от вида последовательностей амплитуд переменного нагружения, а также от структуры сплава.

Ключевые слова: титановый сплав, усталостная трещина, спектральное нагружение, скорость роста трещины.

Введение

При эксплуатации сложных технических объектов, работающих при переменном внешним силовом воздействии возникает проблема оценки срока службы при накоплении в структуре металла конструктивных элементов усталостных повреждений, способствующих деградации его механических характеристик, зарождению и росту усталостных трещин. При обнаружении с помощью неразрушающего контроля в деталях такого рода дефекта встает вопрос о выбраковки такого элемента. Однако это не всегда целесообразно с экономической точки зрения. В ряде конструкций допускается ее эксплуатация с усталостной трещиной. Именно поэтому в практике введен принцип конструирования и эксплуатации отдельных деталей и конструкций в целом по безопасному повреждению [1,2]. Трещина должна быть своевременно выявлена до наступления предельного состояния, определяемого переходом к быстрому и неуправляемому разрушению. На первый план выходит представление о длительности последующего, после обнаружения, роста трещины в эксплуатации до критических размеров. Получить такую информацию можно на основании анализа скорости роста трещины в эксплуатации на основании подходов механики разрушения к определению предельного состояния тел с трещинами [1,2]. Это дает возможность установить более точные прогнозы долговечности материалов с трещинами, возможность снижения металлоемкости при проектировании конструкции и увеличивает достоверность принятия решения о сроках принятия решений о планировании промежуточных осмотров и продления ресурса технического объекта.

Целью работы является изучение кинетики роста усталостной трещины при квазислучайном нагружении, иммитирующем эксплуатационное нагружение титанового сплава ВТ6 в разном структурном состоянии и математическое моделирование продолжительности роста трещины по предлагаемой модели.

Материал, образцы, методика проводимых испытаний

Для испытания использовали титановый сплав ВТ6, имеющий полиморфную структуру, состоящую из смеси твердых растворов α-фазы с

ГПУ и β-фазы с ОЦК кристалическими решетками. Он может подвергаться термической обработке для получения различного структурного состояния с разными механическими свойствами. Химический состав исследуемого титанового сплава определен на основании ренгенофлуоресцентногоо анализа на энергодисперсионном спектрометре Shimadzu серии ЕДХ-8000 и показан в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемого титанового сплава ВТ6

Титановый сплав	Тип структуры	Химический состав в %				
		Ti	*AL*	*V*	*Si*	*Fe*
ВТ6	$\alpha+\beta$	91.25	5.16	2.71	0.78	0.1

Формирование структуры титанового сплава ВТ6. Для оценки влияния структурного состояния титанового сплава на кинетику роста усталостной трещины в условиях переменного нагружения, на основании рекомендаций [3, 4], была проведена термическая обработка образцов для формирования глобулярной и пластинчатой структуры сплава ВТ6. Виды термической обработки показаны в таблице 2, а полученная микроструктура на рис. 1.

Таблица 2. Механические свойства сплава ВТ6 в различном структурном состоянии

Сплав	Виды термообработки	Наименование структуры	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	E, ГПа
ВТ-6	исходный	глобулярная	985	974	6.7	121
ВТ-6	β отжиг 900º 1час+1025º1час,ОП	пластинчатая	804	764	1.75	115

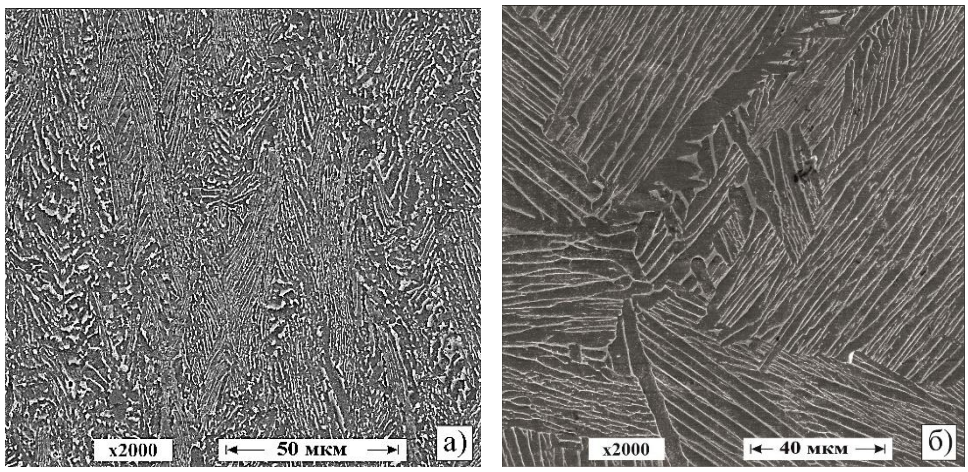


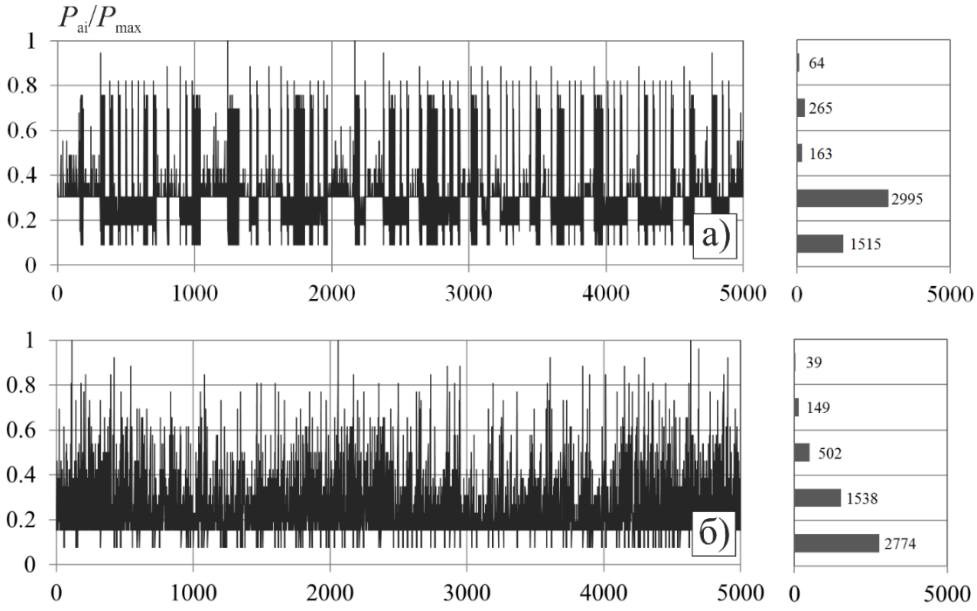
Рис. 1. Микроструктура титанового сплава ВТ6 в различном структурном состоянии: *а*) глобулярная, *б*) пластинчатая

Для испытаний на распространение трещины было использована сервогидравлическая машина Biss-Nano 25 kN с приложением VAFCP (Variable Amplitude Fatigue Crack Propagation), позволяющим проводить нагружение, согласно представленной в данной статье программе испытаний. Методика испытаний соответствовала требованиям ASTM E647-08 [5]. Использовались компактные образцы типа C(T). Они были изготовлены из листового проката толщиной 5 мм. Предварительное растрескивание для всех испытаний проводилось с параметрами: P_{max}=3 кН, R=0.1, a_0=14 мм.

Выбор программы испытания

Если материал испытываемого изделия испытывает стационарное нагружение с постоянными параметрами циклического нагружения, то продолжительность роста усталостной трещины можно определить на основании механики разрушения и построения кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Однако, если нагружение носит нерегулярной характер, полученный на основании случайных выборок эксплуатационной нагруженности, процесс оценки ресурса усложняется [6, 7,8].

В программное обеспечение испытательной машины были заложены блоки квазислучайного нагружения [9]: MTW (miniTWIST), соответствующий нагружению крыла транспортного самолета, MFS (miniFALSTAFF) – нагружение крыла боевого истребителя, Saenrans – нагружение подвески автомобиля. Продолжительность укороченной версии спектров составляла 5000 циклов, их вид представлен на рис. 2.



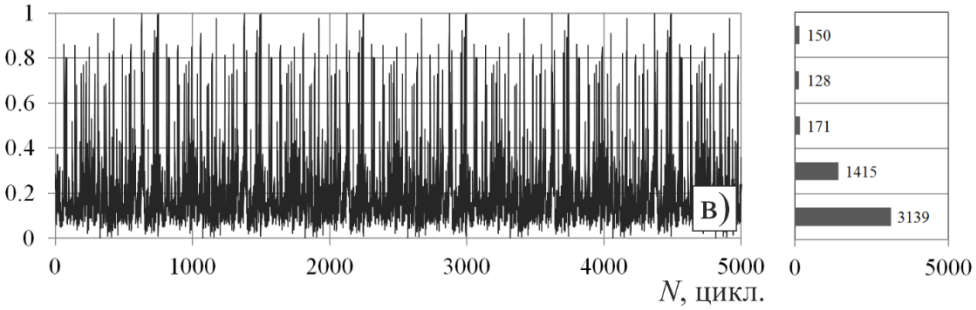


Рис. 2. Спектры нагружения: *а*) MTW; *б*) MFS; *в*) Saetrans

Различие спектров нагружения для программных испытаний оцениваются по ГОСТ 25.507-85 с помощью меры полноты спектра *V*, определяемой по формуле:

$$V = \left[\frac{1}{\nu_\delta} \left[\sum_{i=1}^{r} \left[\nu_{ai} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \right)^n \right] \right] \right]^{\frac{1}{n}}, \qquad (1)$$

где σ_a, σ_{amax} – параметры переменного напряжения, $\nu_б$,ν_{ai} - продолжительность блока нагружения и отдельных его амплитуд напряжений, *n* - коэффициент наклона кривой КДУР в координатах lg d*a*/d*N* – lgΔ*K* [8,10]. Оценив характер нерегулярного нагружения и рассмотрев КДУРы для разных материалов в блоках с переменной нагрузкой различного характера, можно отметить, что на расположение этих кривых в многом определяется величиной меры нерегулярности нагружения *V* [10,11,12]. Получены значения *V* для испытуемых спектров: MTW = 0.379, MFS = 0.348, Saetrans = 0.36.

Результаты и обсуждение

Результаты испытания титанового сплава ВТ6 представлены на рисунках 3 и 4 и в таблице 3. Во всех испытаниях в блоках нагружения $P_{мах}$ составляло 6 кН. Коэффициенты асимметрии для всех испытаний составили *R* = 0.01. Для оценки влияния асимметрии *R* для различных структурных состояний, кроме того, было проведено испытание с *R*=0.5 со спектром MFS. При испытаниях и прочих равных условиях с *R*= 0.01 наибольшим повреждающим воздействием для глобулярной структуры служит спектр MTW, с долговечностью *N* = 220000 циклов. Для пластинчатой структуры – спектр Saetrans, долговечность роста трещины с которым составила *N* = 527436 циклов. Следует заметить, что все используемые спектры при *R* = 0.01 показали меньшую долговечность для глобулярной структуры по сравнению с пластинчатой, что в первую очередь связано с большей прочностью глобулярной структуры по

сравнению с пластинчатой. Увеличение продолжительности роста трещины для спектра MFS для всех структурных состояний для R = 0.5 и постоянства P_{max}= 6 кН связано с уменьшением амплитуд случайного нагружения [13,14,15].

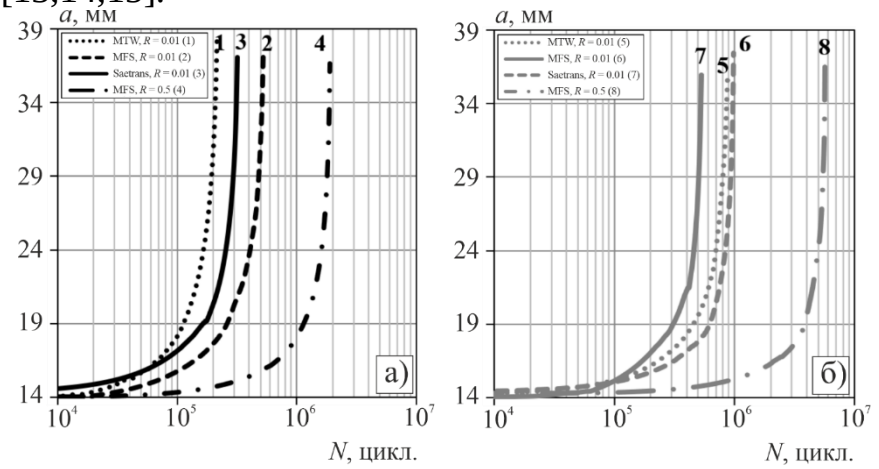


Рис. 3. Кривые роста трещины для испытаний при спектральном нагружении для титанового сплава ВТ6 с различной структурой: *а*) глобулярная, *б*) пластинчатая

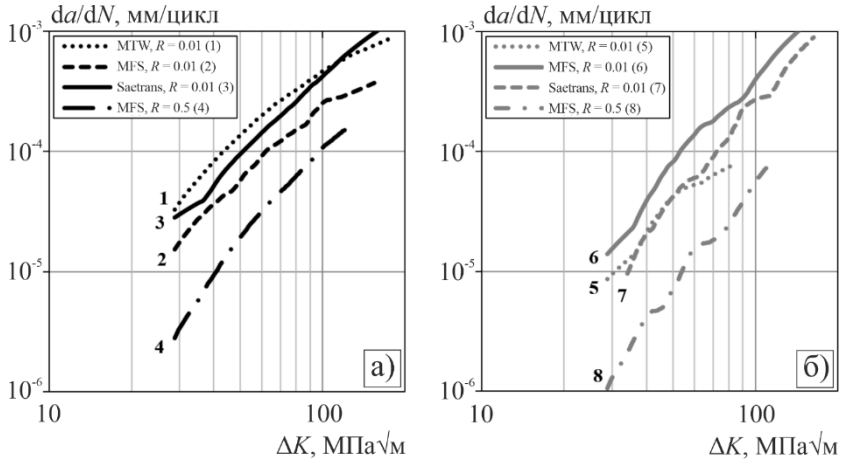


Рис. 4. КДУР для испытаний при спектральном нагружении для титанового сплава ВТ6 с различной структурой: *а*) глобулярная, *б*) пластинчатая

Исследование полученных КДУР (рис. 4); позволяет выделить следующее:

1 - КДУР для исследуемых спектров нагружения для разных структур эквидистантны.

2 - КДУР для кривых роста трещин с наибольшей продолжительность расположены ниже других кривых с большей интенсивностью роста.

Негладкий характер кривых КДУР объясняется характером снятия показаний кинетики роста трещины тензометром, что вызывает необходимость их сглаживания при обработке записи экспериментальных данных с помощью программных средств. Это никак не снижает достоверность получаемых результатов [16, 17, 18].

Таблица 3. Программа исследований титанового сплава ВТ6 с различной структурой при квазислучайном нагружении

№ п/п	Струк-ра	Нагружение (спектр)	P_{max},	R	$N_{эксп}$
1	Глобулярная	MTW	6	0,01	215439
2		MFS	6	0,01	524991
3		Saetrans	6	0,01	320605
4		MFS	6	0,5	1893800
5	Пластинчатая	MTW	6	0,01	877582
6		MFS	6	0,01	985387
7		Saetrans	6	0,01	527436
8		MFS	6	0,5	4519807

Заключение

Влияние последовательностей циклов при взаимодействии переменных нагрузок на кинетику роста усталостных трещин связано с прохождением трещины через пластическую зону вблизи ее устья и формирования в ней остаточных напряжений. Проведена термическая обработка титанового сплава ВТ-6 для получения глобулярного и пластинчатого структурного состояния. Построение КДУР при переменном нагружении сплава ВТ6 с разным структурном состоянием показала, что структурное состояние влияет в первую очередь на изменении коэффициента C кривых КДУР. Так для глобулярной структуры $C_1 = 4.1 \cdot 10^{-13}$, пластинчатой $C_2 = 1.6 \cdot 10^{-13}$. Угол наклона кривых КДУР можно принять равным $n = 3.35$. Влияние каждого спектра в распространение трещины предлагается оценивать мерой нерегулярности V.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект 23-79-01269.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Sunder R. Unraveling the Science or Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2011. Vol. 9, №1.
[2] Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 328 с.
[3] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
[4] Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
[5] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.

[6] Бойцов Б.В., Кравченко Г.Н., Петухов Ю.В., Кравченко К.Г. Кинетика развития трещин в поверхностно упрочненных деталях. Часть 2. Качество и жизнь. 2023. № 1(37). С. 35-38. DOI 10.34214/2312-5209-2023-37-1-35-38.
[7] Elber W., Smith C. W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures. ASTM STP 486. 1971. P. 230-242.
[8] Schijve J., Newman J. C., Elber W. Fatigue crack closure: Observations and technical significance. ASTM STP 982. 1988. P. 5-35.
[9] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. №1. 32 p.
[10] Савкин А.Н., Андроник А.В., Бадиков К.А., Седов А.А. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали. Деформация и разрушение материалов. 2017. № 7. С. 40-45.
[11] Туманов Н. В. Стадийность кинетики усталостных трещин: закономерности и особенности. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 1. С. 58-71. DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71.
[12] Prakash R. V. Fatigue crack growth at stress concentrators under spectrum loading. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2005. Vol. 40, No. 2. P. 117-127. DOI 10.1243/030932405X7764.
[13] Masoudi Nejad R., Berto F. Fatigue crack growth of a railway wheel steel and fatigue life prediction under spectrum loading conditions. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 157. P. 106722. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106722.
[14] Cheng Zh. Q., Tan W., Xiong Ju. J. Modelling fatigue behaviours and lifetimes of novel GLARE laminates under random loading. Composite Structures. 2023. Vol. 311. P. 116799. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.116799.
[15] Fu D., Li P., Sun J., Yao W. Fatigue Crack Propagation Life of Metallic Materials Under Random Loading: A Coupling Analysis Method in the Frequency Domain. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2024. Vol. 47, No. 12. P. 4650-4659. DOI 10.1111/ffe.14455/
[16] Савкин А.Н., Денисевич Д.С., Бадиков К.А., Седов А.А. A new semi-analytical approach for obtaining crack-tip stress distributions under variable-amplitude loading. Procedia Structural Integrity. Vol. 14: SICE 2018 (2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018). [Publisher: Elsevier], 2019. P. 684-687.
[17] Завойчинская Э. Б. Долговечность конструкционных материалов при переменном нагружении. Вестник Московского университета. Серия

1: Математика. Механика. 2025. № 1. С. 84-95. DOI 10.55959/MSU0579-9368-1-66-1-11.
[18] Агамиров Л. В. Вестяк В. А., Агамиров В. Л., Петров А. Н. Расчет долговечности при нерегулярном нагружении методом снижения предела выносливости. 2023. Т. 85, № 4. С. 510-521. DOI 10.32326/1814-9146-2023-85-4-510-521.

K.A. Badikov, A.N. Savkin, A.I. Lebedev, A.A. Sedov

INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK GROWTH IN TITANIUM ALLOY IN VARIOUS STRUCTURAL STATES UNDER IRREGULAR LOADING

Volgograd State Technical University, Russia

Abstract

The kinetics of fatigue crack growth in titanium alloy VT6 (α+β structure) under external irregular (quasi-random) cyclic loading is investigated. Experimental results of fatigue crack growth and kinetic diagrams of fatigue failure for different structural states of the alloy (globular and lamellar microstructure) under cyclic loading of compact samples of type C(T) with a thickness of 5 mm are shown. A method for assessing the nature of irregular loading using the irregularity coefficient is proposed. It is noted that the kinetics of crack growth largely depends on the type of sequences of amplitudes of variable loading, as well as on the structure of the alloy.

Key words: Ti-alloy, fatigue crack, spectral loading, crack growth rate.

REFERENCES

[1] Sunder R. Unraveling the Science or Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2011. Vol. 9, №1.
[2] Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow.: FIZMATLIT, 2006. 328 p.
[3] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Handbook. Moscow.: VILS-MATI, 2009. 520 p.
[4] Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. X-ray and electron-optical analysis. Moscow.: MISIS, 2002. 360 p.
[5] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.
[6] Boytsov B.V., Kravchenko G.N., Petukhov Yu.V., Kravchenko K.G. Kinetics of crack development in surface-hardened parts. Part 2. Quality

and Life. 2023. № 1(37). P. 35-38. DOI 10.34214/2312-5209-2023-37-1-35-38.
[7] Elber W., Smith C. W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures. ASTM STP 486. 1971, pp. 230-242.
[8] Schijve J., Newman J. C., Elber W. Fatigue crack closure: Observations and technical significance. ASTM STP 982. 1988, pp. 5-35.
[9] Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. Journal of ASTM International. 2012. Vol. 9. №1. 32 p.
[10] Savkin A.N., Andronik A.V., Badikov K.A., Sedov A.A. Evaluation of the influence of the nature of loading and force parameters of random external action on the growth of a fatigue crack in low-alloy steel. Deformaciya i razrushenie materialov. 2017. № 7, pp. 40-45.
[11] Tumanov N.V. Stages of fatigue crack kinetics: patterns and features. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2024. T. 90, № 1. Vol. 58-71. DOI 10.26896/1028-6861-2024-90-1-58-71.
[12] Prakash R. V. Fatigue crack growth at stress concentrators under spectrum loading. Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2005. Vol. 40, No. 2. P. 117-127. DOI 10.1243/030932405X7764.
[13] Masoudi Nejad R., Berto F. Fatigue crack growth of a railway wheel steel and fatigue life prediction under spectrum loading conditions. International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 157. P. 106722. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2022.106722.
[14] Cheng Zh. Q., Tan W., Xiong Ju. J. Modelling fatigue behaviours and lifetimes of novel GLARE laminates under random loading. Composite Structures. 2023. Vol. 311. P. 116799. DOI 10.1016/j.compstruct.2023.116799.
[15] Fu D., Li P., Sun J., Yao W. Fatigue Crack Propagation Life of Metallic Materials Under Random Loading: A Coupling Analysis Method in the Frequency Domain. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2024. Vol. 47, No. 12, pp. 4650-4659. DOI 10.1111/ffe.14455/
[16] Savkin A.N., Denisevich D.S., Badikov K.A., Sedov A.A. A new semi-analytical approach for obtaining crack-tip stress distributions under variable-amplitude loading. Procedia Structural Integrity. Vol. 14: SICE 2018 (2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018). [Publisher: Elsevier], 2019, pp. 684-687.
[17] Zavoichinskaya E. B. Durability of structural materials under variable loading. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mehanika. 2025. №1, pp.84-95. DOI 10.55959/MSU0579-9368-1-66-1-11.
[18] Agamirov L. V., Vestyak V. A., Agamirov V. L., Petrov A. N. Calculation of durability under irregular loading by the method of reducing the fatigue limit.. Problemy prochnosti i plastichnosti. 2023. Vol. 85, № 4, pp. 510-521. DOI 10.32326/1814-9146-2023-85-4-510-521.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621.793.74: 532.528
doi:10.18720/SPBPU/2/id-166

С.Ю. Жачкин[1], Г.И. Трифонов[2]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ ПЛАЗМЕННОГО КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ



[1]Сергей Юрьевич Жачкин,
Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Россия, Воронеж, Тел.: 8-908-149-96-32, E-mail: zhach@list.ru.



[2]Григорий Игоревич Трифонов,
Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Россия, Воронеж, Тел.: 8-915-548-82-41, E-mail: i@gtrifonov.ru.

Аннотация

В работе сравнивается кавитационная эрозия стальных образцов марки 30Х10Г10 и образцов с композитным покрытием. Размер образцов — 200×200×10 мм. Композитное покрытие наносилось плазменным методом из смеси двух компонентов: самофлюсующийся сплав на железной основе (фракция 20–63 мкм, 88,7%) и порошок карбида титана (фракция 43–44 мкм, 11,3%). Исследования показали, что частицы карбида титана (TiC) в покрытии действуют как скользящие дислокации, предотвращая образование и рост микротрещин, а также отслоение покрытия.

Ключевые слова: композитное покрытие, плазменное напыление, микротвердость, кавитационная эрозия, карбид титана.

Введение

Известно, что кавитационная эрозия что (далее – КЭ) способна привести к разрушению гидрооборудования и полной потере работоспособности гидрофицированных машин в течение короткого промежутка времени, иногда за 2-3 часа эксплуатации [1, 2].

Причина возникновения КЭ связана с высокой скоростью потока и изменениями внутреннего давления в жидкости. Колебания давления создают кавитационные пузырьки, которые взрываются при снижении локального давления до уровня насыщенного пара. Это приводит к повреждению поверхности материалов из-за ударной волны или микроструи.

Кавитационная стойкость, как и износостойкость и коррозионная стойкость, является поверхностным свойством и в большей степени зависит от характеристик поверхности материала, а не от его объемных свойств. Следовательно, технология модификации поверхности может стать эффективным способом решения вышеуказанных проблем.

При выборе матрицы для композитного материала покрытия было учтено, что металлические композиты с железной матрицей представляют собой одни из наиболее инновационных материалов, доступных на современном рынке [3, 4]. Эти материалы сочетают в себе исключительную прочность и лёгкость, что делает их уникальными и подходящими для широкого спектра применений [5, 6].

Металлические композиты с железной матрицей обладают высокой коррозионной стойкостью. Хотя чистое железо подвержено окислению и коррозии, добавление специальных наполнителей защищает матрицу от разрушения. Эти материалы долговечны и подходят для использования в самых разных и сложных условиях.

В качестве наполнителя в работе были использованы частицы карбида титана (TiC), которые, благодаря своим уникальным свойствам, таким как стабильность, высокая температура плавления (3100 °C) и исключительная твёрдость (~3000HV), вызвали значительный интерес в сфере повышения прочности и износостойкости композитных материалов [7-9].

Так, в работе [10] сравнивались комплексные характеристики покрытий из нержавеющей стали $12CrNi_2$, полученных с использованием технологии ионной плазменной наплавки с добавлением частиц TiC непосредственно на месте и порошка TiC, который добавлялся отдельно. Результаты показали, что композитное покрытие с 50 массовыми процентами частиц TiC обладает наилучшей износостойкостью. Однако большинство исследований были сосредоточены на упрочнении поверхности деталей машин. Толщина слоя покрытия в этих работах не

превышала 20 мкм, что делает их непригодными для восстановительных операций.

Подводя итоги анализа, установим, что для проведения исследований было выбрано композитное покрытие, изготовленное на основе порошка на железной основе- ПР-Х11Г4СР, В состав этого покрытия были добавлены частицы наполнителя TiC.

Таким образом цель работы заключается в проведении экспериментальных исследований, направленных на оценку сопротивления кавитационной эрозии стальной основы образца и композитного покрытия, созданного из специально разработанного материала.

Методы

В ходе эксперимента по плазменной наплавке применялась установка плазменного нанесения покрытий УПНС-3040.

В качестве основы был выбран порошок ПР-Х4ГСР с фракцией от 40 до 64 микрометров. В качестве наполнителя был использован TiC. Далее был проведён многофакторный эксперимент по центральному композиционному плану [11].

Были определены диапазоны изменения независимых переменных: размер наполнителя (Н) варьировался от 30 до 70 мкм, а его концентрация (С) – от 10 до 30%. В качестве функции отклика была выбрана прочность сцепления покрытия с основой. На основе этих данных было получено уравнение (1) [12], которое описывает зависимость прочности сцепления от размера наполнителя и его концентрации в композитном материале. Для верификации корректности выбранной модели был применён критерий Фишера [11, 13], который подтвердил её адекватность. Так, регрессионное уравнение приняло вид:

$$\sigma = 91,49 + 4,33H - 0,05H^2 + 2,04C - 0,09C^2, \quad (1)$$

Визуальное представление результатов анализа в виде графика (рисунок 1), отображающих контуры желательности, наглядно демонстрирует, как адгезионные свойства композитного покрытия зависят от исследуемых параметров.

Затем были определены оптимальные параметры, исходя из максимальной адгезии покрытия к основе. Размер частиц наполнителя составил 43,3 микрометра, а его концентрация – 11,3%. Технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия были выбраны на основании предыдущих исследований с целью обеспечения высокого качества покрытия.

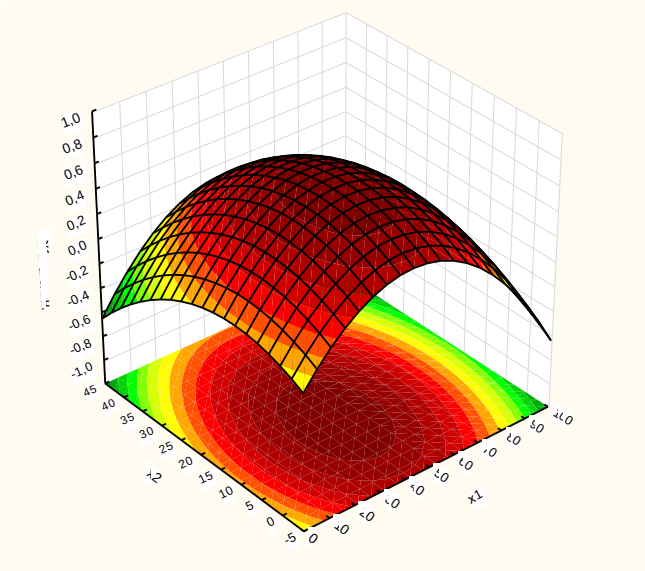


Рис. 1. Графическое отображение регрессионной модели в виде графика желательности

В качестве материала подложки была использована сталь 30Х10Г10 ГОСТ 5632-72, которая широко применяется в гидроприводах машин. Размер подложки составлял 200×200×10 мм. Перед экспериментом подложка была обработана наждачной бумагой для удаления загрязнений.

В рамках исследования были проведены эксперименты по изучению КЭ покрытия и подложки после процесса напыления с использованием ультразвукового кавитационного устройства УТ-4.3Т-22СМ. Частота колебаний составляла 20 кГц, а амплитуда варьировалась от пика к пику и достигала 60 мкм. Эксперименты проводились в 3,5-процентном растворе NaCl. Расстояние между поверхностью образца и кавитационным генератором устанавливается в размере 0,5 миллиметра. Температуру всего испытания контролируют на уровне 23±2°C путём охлаждения циркулирующей воды.

После каждого эксперимента раствор хлорида натрия и три параллельных образца покрытия заменяли, чтобы обеспечить точность данных. Потери массы образцов при исследовании взвешивали на прецизионных весах AND GH-252. Точность весов составляет 0,01 миллиграмма. Взвешивание проводят на разных этапах в течение 1-6 часов.

Затем с помощью 3D-профилометра и сканирующего электронного микроскопа (SEM) наблюдают за морфологией поверхности образцов после эрозии.

Результаты

На рисунке 2 представлена корреляция между кумулятивной потерей массы и временем выдержки в 3,5-процентном растворе хлорида натрия.

Результаты демонстрируют, что совокупная потеря массы подложки и композитного покрытия составила 4,15 и 1,64 миллиграмма соответственно.

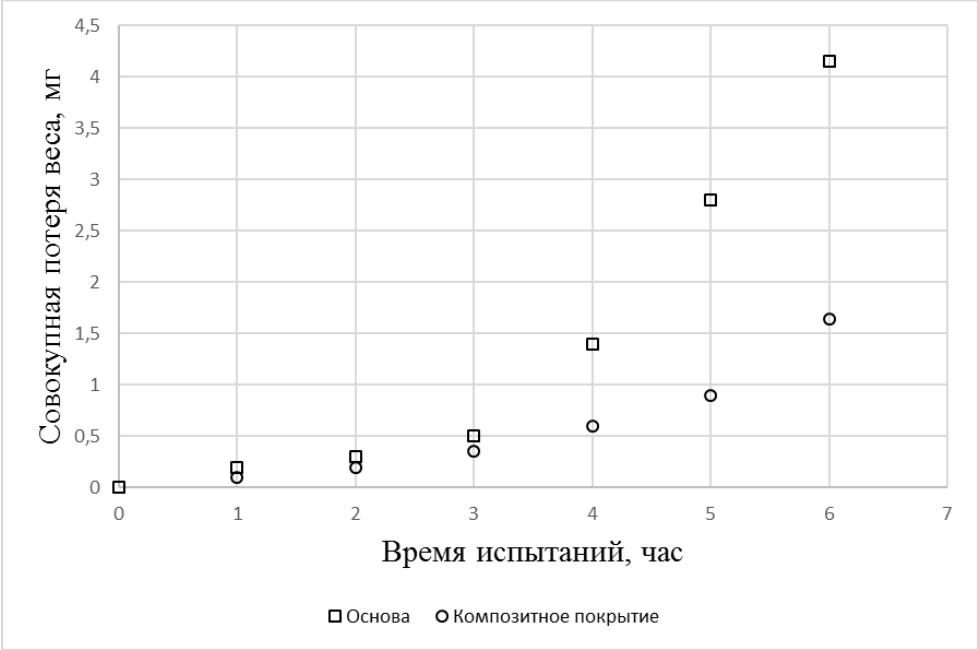


Рис. 2. Совокупная потеря веса подложки и композитного покрытия в зависимости от времени кавитационной эрозии в 3,5 мас.% растворе NaCl

Кроме того, очевидно, что на начальном этапе КЭ происходит инкубационный период материала. На этой стадии кумулятивная потеря массы изменяется медленно, а затем происходит резкое увеличение кумулятивной потери массы. Срок службы подложки в течение одного часа меньше, чем у покрытия в течение трёх часов, что указывает на быстрое разрушение подложки.

Обсуждение

Установлено, что плотности материала подложки 30Х10Г10 и композитного покрытия на основе железа, содержащего включения карбида титана, составляют 7,93 и 7,47 г/см³ соответственно.

Результаты вычислений средней скорости эрозии по глубине для подложки и покрытия составляют 8,72 и 3,66 мкм/ч соответственно. Это свидетельствует о том, что композитное покрытие обладает более высокой стойкостью к КЭ по сравнению с материалом подложки 30Х10Г10.

Наблюдается явление, заключающееся в том, что при повторном воздействии микроструи и высоких импульсов эрозия преимущественно распространяется в слабых частях, таких как микротрещины, коррозионные ямы и дислокации, что приводит к усталостному

разрушению материала. Эффект закрепления, возникающий в результате осаждения TiC вокруг границы зёрен, позволил избежать дальнейшего расширения разрушения. Кроме пластической деформации матрицы, вокруг некоторых карбидов наблюдаются некоторые углубления. Это связано с тем, что, когда жидкость, взаимодействующая с телом, является коррозионной, процесс КЭ сопровождается электрохимической коррозией. Из-за разницы потенциалов между карбидом и матрицей может возникнуть гальваническая коррозия, которая разъедает матрицу и приводит к образованию углублений. На этом этапе, соответственно, увеличивается и потеря веса композитного покрытия.

Следует подчеркнуть, что устойчивость покрытия и основы к КЭ находится в прямой зависимости от микротвёрдости. Многие исследователи пришли к выводу, что твёрдость является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость к КЭ [14, 15].

Заключение

Анализ поверхностей КЭ показывает, что кавитация воздействует на твёрдую фазу TiC, передавая напряжение на структуру матрицы с высокой ударной вязкостью. Это помогает рассеивать микроструи и силу удара, предотвращая образование и расширение трещин вокруг TiC, а также выкрашивание зёрен этого материала.

Частицы TiC действуют как проскальзывающие дислокации и блокируют трещины, значительно замедляя процессы агрегации и роста микротрещин, а также отслаивания материала покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пустошный А.В. Анализ современных исследований по кавитационной эрозии / А.В. Пустошный // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 1(395). – С. 13-34. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-13-34.

[2] Федорова В.С. Сопротивление материалов кавитационной эрозии / В. С. Федорова // Научный Лидер. 2022. № 46(91). – С. 58-61. – EDN JFHBLD.

[3] Рощин М.Н. Износостойкие металлокерамические покрытия, наплавленные лазером / М. Н. Рощин // Современные проблемы теории машин. 2022. № 14. – С. 7-10. – DOI 10.26160/2307-342X-2022-14-7-10.

[4] Гойхенберг Ю.Н. Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки

различного состава / Ю.Н. Гойхенберг, Д. С. Полухин // Черные металлы. 2022. № 4. – С. 46-49. – DOI 10.17580/chm.2022.04.08.
[5] Трифонов Г.И. Металломатричное композитное покрытие для восстановления и упрочнения поверхностей деталей плазменным напылением / Г.И. Трифонов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 5(221). – С. 225-230. – DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-5-225-230.
[6] Прибытков Г.А. Исследование железоматричных композитов с карбидным упрочнением, полученных спеканием механоактивированных смесей титанидов железа с углеродом / Г.А. Прибытков, А.В. Барановский, И.А. Фирсина [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2024. Т. 26, № 2. – С. 212-223. – DOI 10.17212/1994-6309-2024-26.2-212-223.
[7] Крутский Ю.Л. Карбиды некоторых переходных металлов. свойства, области применения и методы получения. Часть 1. Карбиды титана и ванадия (обзор) / Ю.Л. Крутский, Т С. Гудыма, И.Д. Кучумова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65, № 5. – С. 305-322. – DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-305-322.
[8] Новые материалы. Коллектив авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова, М.: «МИСИС», 2002. – 736 с.
[9] Шинкарев А.С. Алюмоматричные композиционные материалы системы Al-C, получаемые аддитивными методами / А. С. Шинкарев, М. А. Бурмистров, С. В. Чернышихин // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 11-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 29 октября 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 289-293. – EDN DHUGIO.
[10] Ding C, Cui X, Jiao J, Zhu P. Effects of Substrate Preheating Temperatures on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of 12CrNi2 Prepared by Laser Cladding Deposition Technique. Materials (Basel). 2018 Nov 28; 11(12):2401. – DOI 10.3390/ma11122401.
[11] Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. – 279 с.
[12] Жачкин С.Ю. Повышение износостойкости композиционного покрытия на основе железа при восстановлении специального оборудования / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, А.В. Пустоветов, П.В. Струнки́н // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 2(93). – С. 92-99. – DOI 10.53980/24131997_2024_2_92.
[13] Усманов Р.Р. Методика экспериментальных исследований в агрономии (с расчетами в программах Excel и Straz) / Р.Р. Усманов. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА

им. К.А. Тимирязева, 2022. – 81 с. – ISBN 978-5-9675-1889-8. – EDN HYMYES.
[14] Коваленко В.И. Исследование стойкости к эрозии поверхностных слоев сталей при воздействии кавитации / В.И. Коваленко, Л.И. Мартыненко, В.Г. Маринин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 5 (74). 2015. – С. 23-27. – DOI 10.15587/1729-4061.2015.40196.
[15] Алван Х. Л. А. Повышение кавитационной стойкости поверхностей деталей нанесением защитных покрытий: специальность 25.80.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алван Хуссам Лефта Алван, 2022. – 139 с. – EDN QVLNSQ.

S.Yu. Zhachkin, G.I. Trifonov

TESTING OF AN IRON-BASED COMPOSITE COATING FOR CAVITATION EROSION

Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

Abstract

The papercompares cavitation erosion of steel samples of the 30X10G10 grade and samples witha composite coating. The sample size is 200 × 200×10 mm. The composite coatingwas applied by the plasma method from a mixture of two components: a self-fluxingiron-based alloy (fraction 20-63 microns, 88.7%) and a titanium carbide powder (fraction43-44 microns, 11.3%). Studies have shown that titanium carbide(TiC) particles inthe coating act as sliding dislocations, preventing formation and growth microcracks, as well as peeling of the coating.

Key words: composite coating, plasma spraying, microhardness, cavitation erosion, titanium carbide.

REFERENCES

[1] Pustoshniy A.V. Analysis of current research on cavitation erosion. Proceedings of the Krylov State Scientific Center. 2021. № 1(395). – P. 13-34. – DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-13-34.
[2] Fedorova V.S. Resistance of materials to cavitation erosion. Scientific Leader. 2022. № 46(91). – P. 58-61. – EDN JFHBLD.
[3] Roshchin M.N. Laser-fused wear-resistant cermet coatings. Modern problems of machine theory. 2022. No. 14. – P. 7-10. – DOI 10.26160/2307-342X-2022-14-7-10.
[4] Goichenberg Yu.N., Polukhin D.S. Structure, properties and quality of a composite nickel-phosphorus coating applied to steel substrates of various compositions. Ferrous metals. 2022. № 4. – P. 46-49. – DOI 10.17580/chm.2022.04.08.

[5] Trifonov G.I. Metal matrix composite coating for restoring and strengthening the surfaces of parts by plasma spraying. Strengthening technologies and coatings. 2023. T. 19, № 5(221). – P. 225-230. – DOI 10.36652/1813-1336-2023-19-5-225-230.
[6] Pribytkov G.A., Baranovsky A.B., Firsina I.A [and others] Investigation of iron matrix composites with carbide hardening obtained by sintering mechanicallyactivated mixtures of iron titanides with carbon. Metal processing (technology, equipment, tools). 2024. T. 26, № 2. – P. 212-223. – DOI 10.17212/1994-6309-2024-26.2-212-223.
[7] Krutsky Yu.L., Gudyma T.S., Kuchumova I.D. Carbides of some transition metals.properties, fields of application, and methods for obtaining information. Part 1. Titanium andvanadium carbides (review) Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ferrous metallurgy. 2022. T. 65, № 5. – P. 305-322. – DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-305-322.
[8] New materials. A team of authors. Under the scientific editorship of Yu. S. Karabasova,Moscow: «MISIS», 2002. – 736 p.
[9] Shinkarev A.S., Burmistrov M.A., Chernyshikhin S.V. Aluminum matrix composite materials of the Al-C system obtained by additive methods. Perspective development of science, technology and technologies: collection of scientific articles of the 11th International Scientific and Practical Conference, Kursk, October 29, 2021. – Kursk: South-Western State University, 2021. – P. 289-293. – EDN DHUGIO.
[10] Ding C, Cui X, Jiao J, Zhu P. Effects of Substrate Preheating Temperatures on the Microstructure, Properties, and Residual Stress of 12CrNi2 Prepared by Laser Cladding Deposition Technique. Materials (Basel). 2018 Nov 28; 11(12):2401. – DOI 10.3390/ma11122401.
[11] Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. Planning an experiment while searchingfor optimal conditions. Second edition, revised and supplemented. Moscow: Nauka Publ., 1976. – 279 p.
[12] Zhachkin S.Y., Trifonov G.I., Pustovetov A.V., Strunkin A. V. Improving the wear resistanceof composite coatings based on iron during the restoration of specialequipment Vestnik VSGUTU. 2024. № 2(93). – P. 92-99. – DOI 10.53980/24131997_2024_2_92.
[13] Usmanov R.R. Methods of experimental research in agronomy (with calculations in Excel and Straz). Moscow: Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy. K. A. Timiryazev, 2022. – 81 p. – ISBN 978-5-9675-1889-8. – EDN HYMYES.
[14] Kovalenko V. I., Martynenko L. I., Marinin V. G. Investigation of the resistance to erosionof surface layers of steels under the influence of cavitation. East EuropeanJournal of Advanced Technologies, № 5 (74). 2015. – P. 23-27. – DOI 10.15587/1729-4061.2015.40196.
[15] Alvan X. L. A. Improving the cavitation resistance of the surfaces of parts by applying protective coatings: specialty 25 \ .80.00: dissertation for the degree of Candidate of technical Sciences 2022. – 139 p. – EDN QVLNSQ.

ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ИННОВАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 629.7.022 : 681.5.015.23
doi:10.18720/SPBPU/2/id-167

Г.Б. Крыжевич[1,2]

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ НЕСУЩИХ СВЯЗЕЙ БЛОК-МОДУЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ



Геннадий Брониславович Крыжевич,
[1]Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. Россия, Санкт-Петербург,
[2]Крыловский государственный научный центр. Россия, Санкт-Петербург.
Тел.: (812)415-4674, E-mail: kryzhevich_gb@voenmeh.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы численного моделирования напряжённо-деформированного состояния конструкций батареи топливных элементов (БТЭ) универсального функционального модуля (УФМ) водородной энергетической установки (электрохимического генератора) и оптимизации распределения материала в деталях конструкции с учётом нагрузок и закреплений. Расчёты НДС конструкций БТЭ выполнялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ), а топологическая оптимизация конструкций – с помощью метода SIMP. Результаты показали, что использование топологической оптимизации при конструировании позволяет снизить массу основных элементов БТЭ примерно на 27% (по сравнению с исходной батареей, спроектированной традиционными методами) и снизить в них уровень напряжений ориентировочно на 25%, обеспечив при этом существенное повышение надежности и эксплуатационной безопасности БТЭ. На основе полученных результатов сформулированы основные положения рациональной технологии сборки БТЭ.

Ключевые слова: электрохимический генератор, топливный элемент, силовые элементы батареи топливных элементов, способ конструирования, оптимизация конструкции, технология сборки топливный элементов.

Введение

В настоящее время активно развивается новая область водородной энергетики - электрохимические генераторы на основе батарей топливных элементов (БТЭ), работающих на водородном топливе (рис. 1) [1, 2]. Батарея состоит из топливных элементов (биполярных холодильных камер – БХК) и двух торцевых крышек (рис. 2) со шпильками, соединяющими всё в единую сборку.

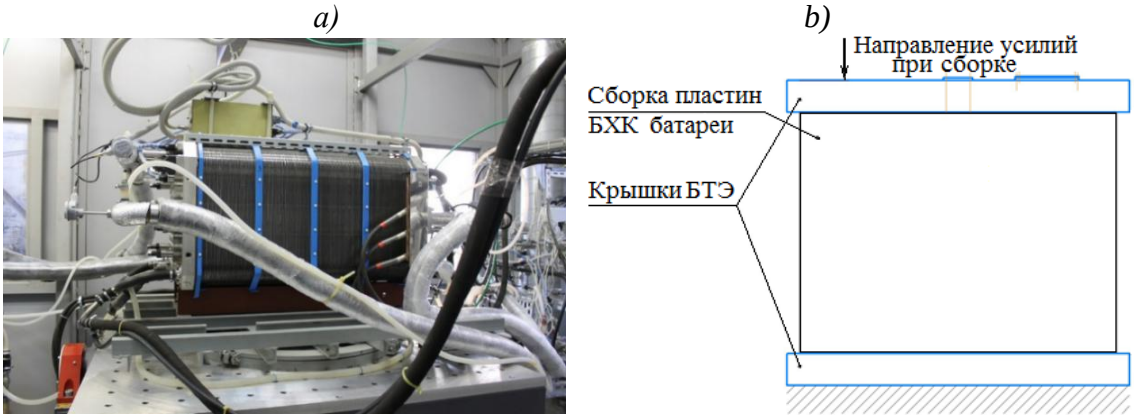


Рис. 1. БТЭ (*a*), разработанная в Крыловском государственном научном центре [1], и эскиз ее сборки (*b*)

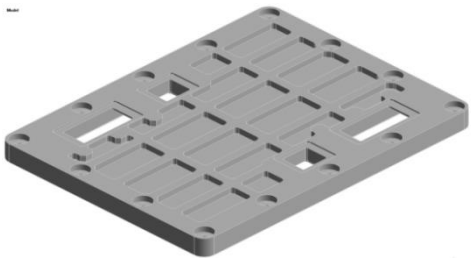


Рис. 2. Крышка БТЭ, спроектированная традиционным методом (без топологической оптимизации)

В процессе затяжки гаек на шпильках происходит, с одной стороны, обжатие уплотнительных резиновых (силиконовых) прокладок между топливными элементами, а с другой – изгиб крышек. При превышении допускаемого прогиба крышек возникает риск разгерметизации топливных элементов и выхода из строя батареи. В этой связи требуется, во-первых, определить моменты затяжки гаек на шпильках, обеспечивающие равномерное обжатие прокладок и БТЭ в целом и, во-вторых, выяснить, не превосходит ли при этом прогиб крышек допускаемого значения, гарантирующего надежность работы батареи.

Целью работы является численное моделировании напряжённо-деформированного состояния (НДС) соединенных между собой

металлических и резиновых конструкций и элементов БТЭ, а также выдача рекомендаций по оптимизации распределения материала в деталях конструкции с учётом нагрузок и закреплений и по рациональной схеме затяжки гаек при сборке батареи.

Для достижения поставленной цели выполнены:

- оценка нелинейных упругих характеристик уплотнительных силиконовых прокладок и их моделирование с использованием замены этих упругих элементов пружиной с нелинейной жесткостью;
- численное моделирование НДС крышки методом конечных элементов с учётом шпилек и уплотнительных прокладок, обладающих нелинейными упругими свойствами;
- топологическая оптимизация конструкции крышки с последующей адаптацией полученного решения под технологию её изготовления.

Методы

Расчеты напряженно-деформированного состояния и перемещений конструкций БТЭ, а также их топологическая оптимизация выполнены на основе конечно-элементного моделирования [3-17]. При рационализации конструкции с помощью метода SIMP [3-8] выполнена топологическая оптимизация (ТО) крышки, обеспечивающая снижение ее массы при условии обеспечения прочности и отсутствия недопустимых прогибов. После ТО выполнена адаптация ее результатов с целью создания возможности изготовления крышки на основе традиционных технологий машиностроения.

Упругость уплотнительных прокладок из резины моделировалась с помощью нелинейного пружинного элемента, соединённого с крышкой (рис. 3). Его характеристика была задана в соответствии с результатами испытаний уплотнительной прокладки (рис. 4).

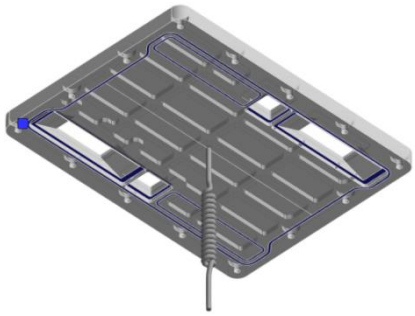


Рис. 3. Моделирование уплотнительных прокладок с помощью нелинейного пружинного элемента

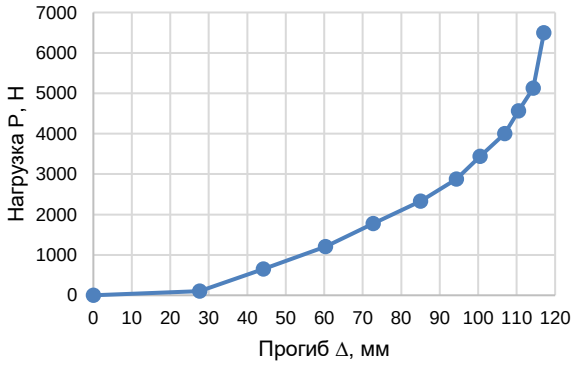


Рис. 4. Характеристика нелинейного пружинного элемента

Для моделирования шпилек использовались балочные элементы. Шпильки связывались с отпечатками шайб на крышке посредством жёсткого соединения (см. рис. 5). Нагружение сборки производилось кинематическим способом – путём задания свободным концам шпилек осевого перемещения, соответствующего полному равномерному сжатию всех уплотнительных прокладок БТЭ (см. рис. 6). При этом учитывалась центральная симметрия сборки – отсутствие у точки в центре внутренней поверхности крышки перемещений в плоскости крышки.

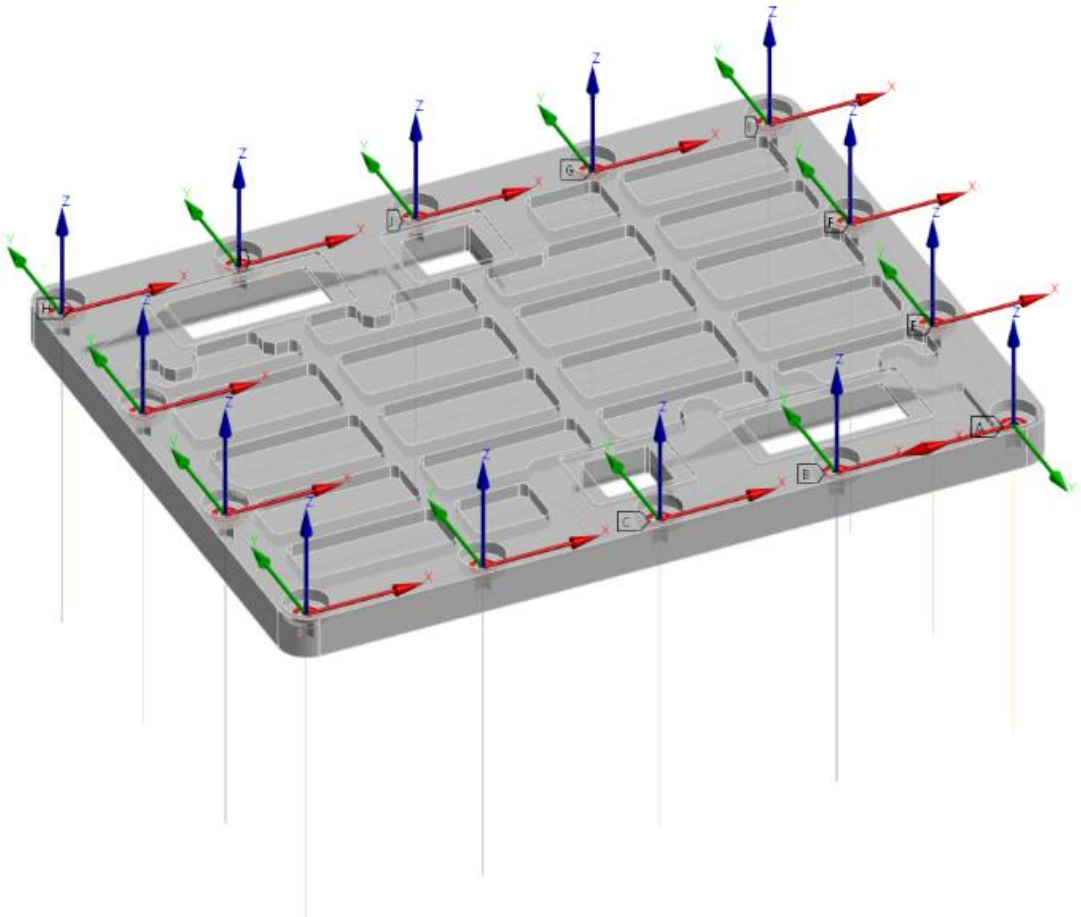


Рис. 5. Соединение торцов шпилек с отпечатками шайб на крышке

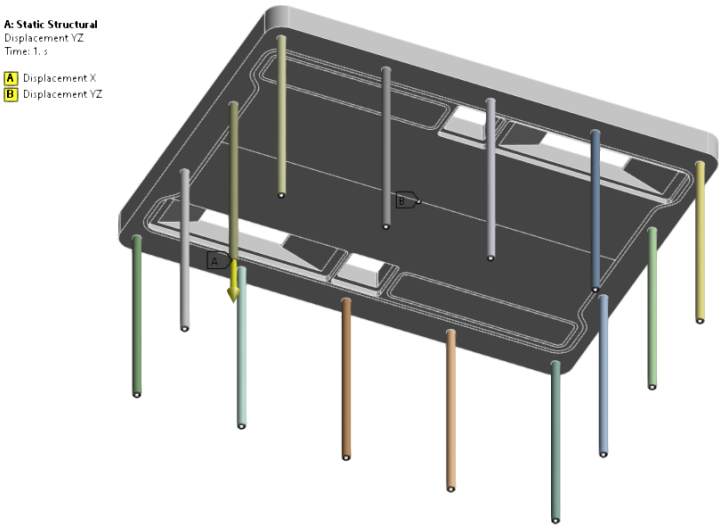


Рис. 6. Задание осевого перемещения свободным концам шпилек и учёт центральной симметрии сборки

Для снижения массы крышка выполнена из алюминиевого сплава, а шпильки – из высоколегированной стали. Свойства применяемых материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Модели и свойства материала

	Крышка	Шпильки
Материал	АМг6	12Х18Н10Т
Плотность ρ, кг/м³	2650	7850
Модель	Линейная упругая	
Модуль Юнга E, ГПа	71	214
Коэффициент Пуассона ν	0,33	0,3
Предел текучести σ_y, МПа	135	785

Результаты

На рис. 7 показаны распределения вертикальных перемещений (прогибов) и эквивалентных напряжений крышки. Максимальный перепад прогибов составляет 0,16 мм, что почти в 2 раза меньше допускаемой величины 0,30 мм. Максимальные напряжения составляют 36 МПа, что существенно ниже предела текучести сплава АМг6 (табл. 1).

На рис. 8 показаны распределения осевые усилий и суммарных напряжений по шпилькам. Как видно, перепад усилий составляет почти 10 раз. При равномерной затяжке всех шпилек крышка вследствие её неравномерной жёсткости получила бы большие прогибы, превосходящие

допускаемые значения. Максимальные же напряжения составляют 42 МПа, что более чем в 18 раз ниже предела текучести 12Х18Н10Т, поэтому оказалось возможным существенно уменьшить диаметр шпилек.

Полученные запасы по прогибам и напряжениям в крышке свидетельствуют о возможности оптимизации её конструкции. В этой связи для поиска более рациональной конструкции с помощью метода SIMP была выполнена топологическая оптимизация (ТО) крышки с последующей адаптацией результатов [3-8]. Начальные этапы решения ТО показана на рис. 9. В качестве области проектирования выбрана сплошная плита толщиной 30 мм за вычетом технологических отверстий (отмечены красным). Кинематическое нагружение и учёт центральной симметрии выполнены аналогично исходной крышке.

Результаты ТО и их адаптация под технологию изготовления крышки показаны на рис. 10.

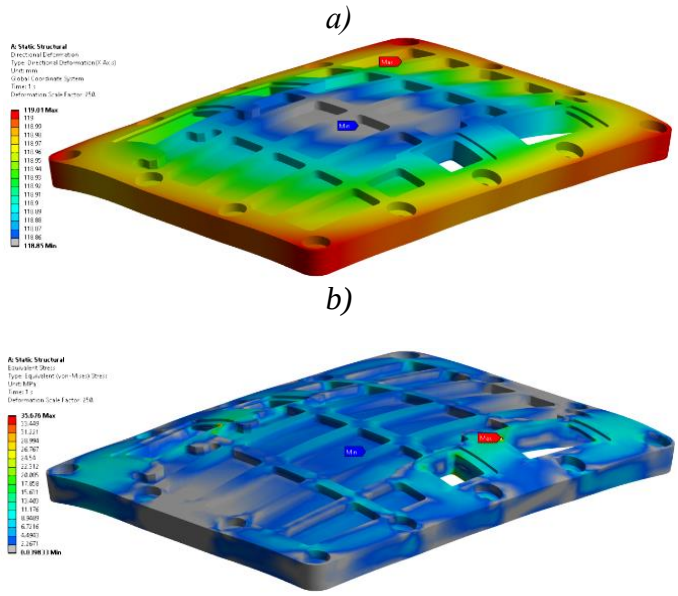


Рис. 7. НДС крышки БТЭ: *a*) вертикальные перемещения; *b*) эквивалентные напряжения

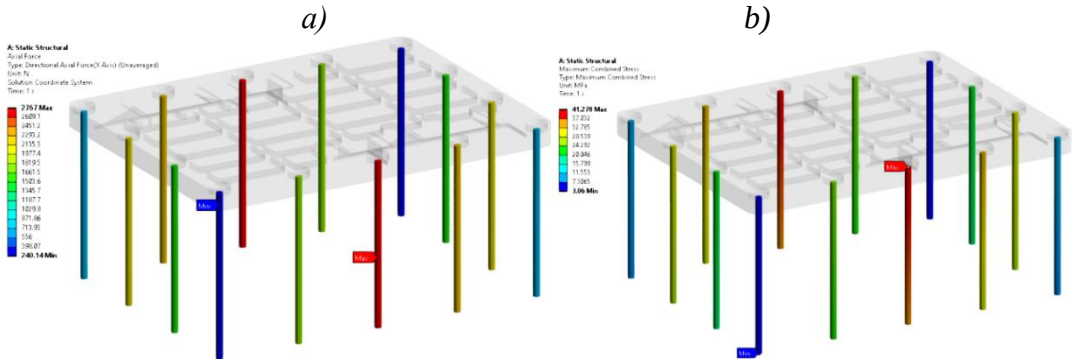


Рис. 8. Осевые усилия (*a*) и суммарные напряжения (*б*) в шпильках

а) *б)*

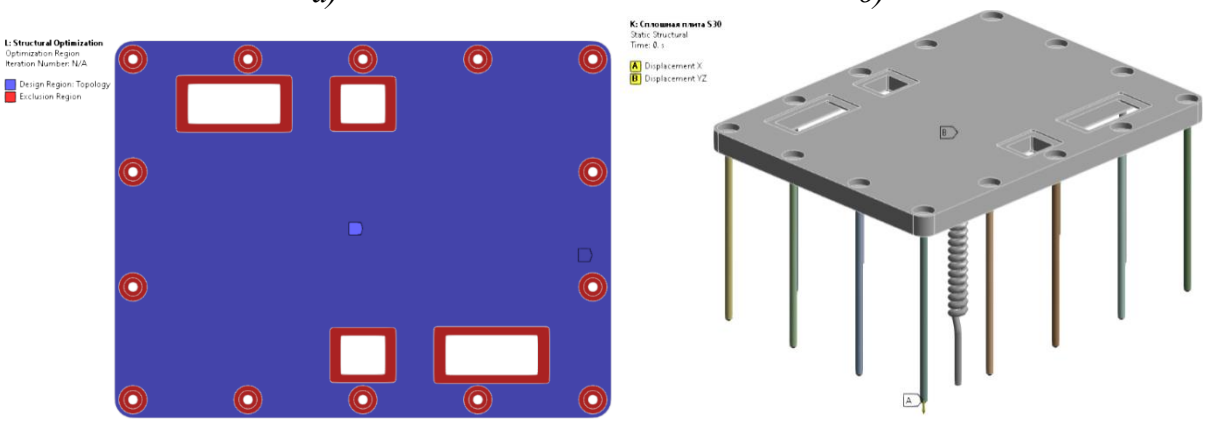


Рис. 9. Начальные стадии решения задачи ТО: *а*) выбор области проектирования; *б*) схема кинематического нагружения

а) *б)*

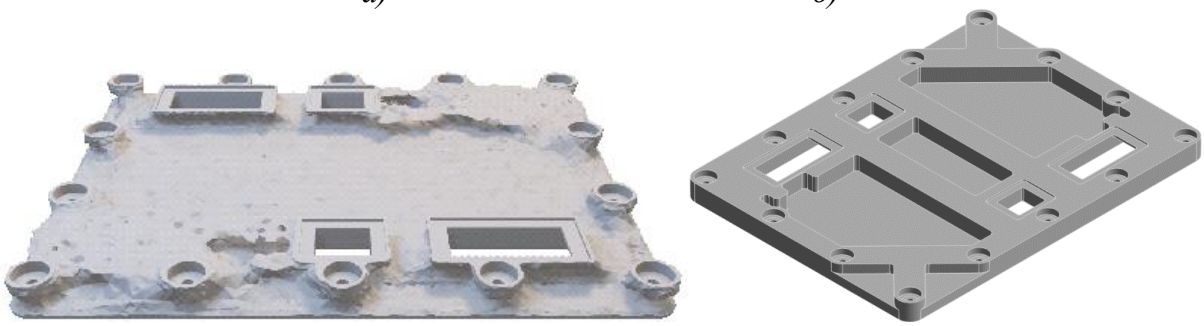


Рис. 10. Результаты ТО (*а*) и их адаптация под технологию изготовления крышки с учетом результатов расчета напряженно-деформированного состояния (*б*)

Для оптимизированной конструкции крышки был выполнен расчёт НДС аналогично исходной конструкции. Результаты расчёта и их сопоставление с исходной конструкцией приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление результатов расчётов конструкций крышек

	Исходная	Оптимизированная
Масса	100%	73%
Прогиб, мм	0,16	0,19
Напряжения, МПа	36	27
Максимальное осевое усилие в шпильках, Н	2767	2915
Минимальное осевое усилие в шпильках, Н	240	289

Как видно, оптимизированная крышка имеет чуть больший прогиб (по сравнению с прототипом), оставаясь при этом в пределах допускаемых значений. Также у оптимизированной крышки выросли значения осевых усилий в шпильках, а напряжения, наоборот, упали.

Обсуждение

Из таблицы 2 следует, что масса оптимизированной конструкции крышки получилась на 27% ниже массы исходной конструкции. Кроме того, эффективность проделанной работы подтверждается, в частности тем, что в оптимизированной конструкции крышки (по сравнению с исходной) ниже на 25% действующие напряжения. Благодаря этому обеспечено повышение уровней надежности и эксплуатационной безопасности БТЭ.

В итоге расчетных исследований значительно уменьшена масса крепежа БТЭ. К важным результатам относятся полученные в работе рациональные значения усилий в шпильках, расположенных по периметрам крышек, а также по размерам и жесткости пружин, расположенных на этих шпильках под гайками.

Заключение

В обеспечение создания принципиально нового объекта судовой водородной энергетики в работе предпринято численное моделирование напряжённо-деформированного состояния конструкции, содержащей металлические и резиновые элементы, а также БХК, генерирующие электроэнергию. Решена обратная задача механики твердого деформируемого тела – определены оптимальная конфигурация нелинейной упругой системы и усилия в соединительных элементах, обеспечивающие допустимые деформации системы в целом и в основных силовых элементах (крышках). Выданы рекомендации по оптимизации распределения материала в элементах нелинейной упругой системы с учётом нагрузок и закреплений, обеспечивающие минимизацию массы БТЭ. Расчёты НДС конструкций БТЭ выполнялись с помощью метода конечных элементов (МКЭ), а топологическая оптимизация конструкций – с помощью метода SIMP. В результате работы даны рекомендации по оптимальным усилиям сжатия, назначенным дифференцированно для различных шпилек, уплотняющих топливные элементы и обеспечивающих сборку БТЭ в целом. Рациональные моменты затяжки для разных гаек отличаются на порядок от использованных в прототипе. Выполнена проверка статической прочности крышки БТЭ с учетом нелинейной жесткости многослойных силиконовых элементов и определены диаметры шпилек и моменты затяжки гаек БТЭ.

В итоге накоплен большой опыт конечно-элементного моделирования и эффективной топологической оптимизации с помощью метода SIMP нелинейных упругих систем, представляющих собой инновационные

энергетические установки, и обеспечено создание электрохимического генератора для морского транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Крыловский центр провел государственные испытания батареи топливных элементов БТЭ-50К на стенде филиала «ЦНИИ СЭТ». ФГУП «Крыловский государственный научный центр». URL: https://krylov-centre.ru/press/news/199/ (дата обращения 01.11.2022).

[2] Юшков А.В., Дядик А.Н. Блок-модуль электрохимического генератора с твердополимерным электролитом. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2023. № 72/73. С. 108-114.

[3] Боровиков А.А., Тушев О.Н. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием модифицированного метода SIMP топологической оптимизации. Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 1 (145). С. 51-62.

[4] Сорокин Д.В., Бабкина Л.А., Бразговка О.В. Проектирование элементов конструкций различного назначения на основе топологической оптимизации. Космические аппараты и технологии, 2022. Том 6, № 2(40). С. 61-82.

[5] Косых П.А., Азаров А.В. Теория и анализ методов топологической оптимизации. Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 4 (136). С. 11-30.

[6] Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. 1(391): С. 95-108.

[7] Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Филатов А.Р. Принципы и современные методы оптимального проектирования крупногабаритных судовых перекрытий. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Специальный выпуск 2. С. 83-89.

[8] Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. Materials. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.

[9] Gandhi Y., Minak G. A Review on Topology Optimization Strategies for Additively Manufactured Continuous Fiber-Reinforced Composite Structures. Appl. Sci., 2022, vol. 12, pp. 239–249.

[10] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperealstic structures with large deformation-induced frictionless contact. Appl. Math. Model. 2024, 126, 67–84.

[11] Wang, L.; Yue, W.; Zhu, M. An Improved Evolutionary Structure Optimization Method for Smooth Topology Design of Structures. Int. J. Comput. Methods. 2023, 20, 2250061.
[12] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperealstic structures with large deformation-induced frictionless contact. Appl. Math. Model. 2024, 126, 67–84.
[13] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints. Struct Multidiscip Optim, 2023, 66 (1) , p. 9-25.
[14] Garaigordobil A., Ansola R., Canales J., Borinaga R. Addressing topology optimization with overhang constraints for structures subjected to self-weight loads. Struct Multidiscip Optim, 2022, 65 (12), p. p. 341-358.
[15] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. Isogeometric topology and shape optimization for composite structuresusing level- sets and adaptive Gauss quadrature. Composite Structures. 2022, vol. 285, 115263, p. p. 211-227.
[16] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V, Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure. Composite Structures. 2022, vol. 285, 115241, p. p. 68-81.
[17] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization. International Journal of Mechanical Sciences. 2021, vol. 211. 106793, pp. 83-92.

G.B. Kryzhevich [1,2]

DESIGN OF MAIN LOAD-BEARING CONNECTIONS OF BLOCK-MODULE OF ELECTROCHEMICAL GENERATOR BASED ON TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

[1]Baltic State Technical University "Voenmech" named after D.F. Ustinov, Russia;
[2]Krylov State Research Center, Russia

Abstract

The paper considers the issues of numerical modeling of the stress-strain state of fuel cell stack (FCS) structures of the universal functional module (UFM) of a hydrogen power plant (electrochemical generator) and optimization of material distribution in structural parts taking into account loads and

fastenings. Calculations of the stress-strain state of the FCS structures were performed using the finite element method (FEM), and topological optimization of the structures was performed using the SIMP method. The results showed that the use of topological optimization in design allows to reduce the weight of the main elements of the BFC by approximately 27% (compared to the original battery designed by traditional methods) and reduce the stress level in them by approximately 25%, while ensuring a significant increase in the reliability and operational safety of the BFC. Based on the obtained results, the main provisions of the rational technology of BFC assembly are formulated.

Key words: electrochemical generator, fuel cell, power elements of a fuel cell battery, design method, design optimization, fuel cell assembly technology.

REFERENCES

[1] Krylov Center conducted state tests of the BTE-50K fuel cell battery at the test bench of the TsNII SET branch. Krylov State Research Center. URL: https://krylov-centre.ru/press/news/199/ (accessed on November 1, 2022).
[2] Yushkov AV, Dyadik AN. Block module of an electrochemical generator with solid polymer electrolyte. Scientific and technical collection of the Russian Maritime Register of Shipping. 2023. No. 72/73. P. 108-114.
[3] Borovikov AA, Tushev ON. Methodology for determining the location of interpanel brackets of the spacecraft body using the modified SIMP method of topological optimization. Engineering journal: science and innovation. 2024. No. 1 (145). S. 51-62.
[4] Sorokin D.V., Babkina L.A., Brazgovka O.V. Design of structural elements for various purposes based on topological optimization. Spacecraft and Technologies, 2022. Vol. 6, No. 2(40). S. 61-82.
[5] Kosykh P.A., Azarov A.V. Theory and analysis of topological optimization methods. Engineering Journal: Science and Innovation. 2023. No. 4 (136). S. 11-30.
[6] Kryzhevich G.B., Filatov A.R. An integrated approach to topological and parametric optimization of ship structures. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2020. 1(391): S. 95-108.
[7] Kryzhevich G.B., Norkov E.S., Filatov A.R. Principles and modern methods of optimal design of large-sized ship floors. Proceedings of the Krylov State Research Center. 2020. Special issue 2. P. 83-89. Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. Materials. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.
[8] Tang, T.; Wang, L.; Zhu, M.; Zhang, H.; Dong, J.; Yue, W.; Xia, H. Topology Optimization: A Review for Structural Designs Under Statics Problems. Materials. 2024. 17, 5970, pp. 21-45.

[9] Gandhi Y., Minak G. A Review on Topology Optimization Strategies for Additively Manufactured Continuous Fiber-Reinforced Composite Structures. Appl. Sci., 2022, vol. 12, pp. 239–249.
[10] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperealstic structures with large deformation-induced frictionless contact. Appl. Math. Model. 2024, 126, 67–84.
[11] Wang, L.; Yue, W.; Zhu, M. An Improved Evolutionary Structure Optimization Method for Smooth Topology Design of Structures. Int. J. Comput. Methods. 2023, 20, 2250061.
[12] Huang, J.; Liu, J.K. Strength constrained topology optimization of hyperealstic structures with large deformation-induced frictionless contact. Appl. Math. Model. 2024, 126, 67–84.
[13] Li S., Zhang Y., Liu S., Wu S. Topology optimization of thermoelastic structures under transient thermal loads limited to stress constraints. Struct Multidiscip Optim, 2023, 66 (1) , p. 9-25.
[14] Garaigordobil A., Ansola R., Canales J., Borinaga R. Addressing topology optimization with overhang constraints for structures subjected to self-weight loads. Struct Multidiscip Optim, 2022, 65 (12), p. p. 341-358.
[15] Gao J., Xiao M., Zhou M., Gao L. Isogeometric topology and shape optimization for composite structuresusing level- sets and adaptive Gauss quadrature. Composite Structures. 2022, vol. 285, 115263, p. p. 211-227.
[16] Huang Y., Tian X., Zheng Z., Li D., Malakhov A. V, Polilov A. N. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure. Composite Structures. 2022, vol. 285, 115241, p. p. 68-81.
[17] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T. Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimization. International Journal of Mechanical Sciences. 2021, vol. 211. 106793, pp. 83-92.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 67.02:658.512:006.015.7:62-192
doi:10.18720/SPBPU/2/id-168

С.П. Ермаков[1], К.П. Помпеев[2]

ПОСТРОЕНИЕ ЭСКИЗА ДЕТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАКРОСОВ И УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА ТП



[1]Сергей Павлович Ермаков,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79219779727, E-mail Ermak1999@live.ru.



[2]Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru

Аннотация

В данной работе рассматривается необходимость разработки модуля построения эскизов детали для автоматизации проведения размерного анализа при проектировании многооперационных ТП гарантированно обеспечивающего параметры заданной конструктором точности размеров и требований взаимного расположения обработанных поверхностей без брака.

Ключевые слова: размерные схемы, надежность ТП, размерный анализ, параметры точности, алгоритм, методика.

Введение

Механообрабатывающие технологические процессы являются ключевыми частями процесса производства изделий различного назначения в приборостроении. Они определяют качество изготовленных деталей, в частности, по точности их параметров.

Точность параметров деталей зависит от многих факторов, включая

качество материалов, инструментов, оборудования и сам ТП, при внедрении которого возможны случаи возникновения брака [1-3]. Поэтому в рамках данных технологий важно уделять особое внимание не только производительности и качеству изделий, в том числе за счет оптимизации параметров резания, о чем говорится в [4-14], но и надежности технологических процессов [1, 15, 16], поскольку от этого зависит их эффективность и рентабельность.

Согласно [1], под надежностью ТП механической обработки заготовок понимается свойство обеспечивать заданные чертежом точность и качество деталей на разных этапах изготовления, при условии сохранения на этих этапах требуемых технических параметров в установленных пределах, с учетом обработки заготовок в определенной последовательности, на выбранном оборудовании, в требуемой технологической оснастке, необходимым инструментом, при заданных режимах обработки. При этом надежность ТП можно выразить показателем запаса точности ($\psi = IT_{Xi}/\omega_{Xi}$), характеризующим отношение допустимой величины изменения (IT_{Xi}) точностного параметра (Xi) к погрешности (ω_{Xi}), ожидаемой при реализации ТП. Иными словами, надежность ТП, согласно [3], можно связать с надежностью обеспечения требуемой точности обработки заготовок. При условии $1{,}0 < \psi \leq 1{,}2$ (а тем более — $\psi > 1{,}2$) надежность ТП по обеспечению точности будет гарантирована. Чем этот показатель больше, тем выше ожидае мая надежность ТП (она будет зависеть только от настройки оборудования и технологической оснастки и их технического состояния при реализации ТП в производственных условиях). Оценить ожидаемую погрешность точностных параметров ω_{Xi} можно с использованием размерно-точностного анализа ТП, при котором расчет технологических размеров и их до пусков осуществляется методом максимума-минимума при обеспечении точности методом полной взаимозаменяемости [1, 3]. Метод обеспечения точностной надежности ТП позволяет полностью исключить появление брака изготавливаемых деталей по вине технолога и создает условия для того, чтобы можно было вести обработку заготовок в автоматическом режиме, без предварительной выверки [1, 15-17].

Таким образом, одним из важнейших аспектов обеспечения точности механообрабатывающих техпроцессов является их надежность по гарантированному достижению параметров заданной конструктором точности размеров и требований взаимного расположения обработанных поверхностей без брака, которую можно оценить по результатам их размерно-точностного анализа. Но зачастую, инженеры технологи пренебрегают в своей работе применением методики размерно-точностного анализа, ввиду высокой трудоемкости и ограниченности по времени на разработку ТП. А также, возможны ошибки при проведении размерного анализа на этапе неправильного составления размерных схем и

последующих ошибочных расчетов.

Цель работы: создать модуль внутри CAD-системы для автоматизации процесса построения размерных схем для последующего расчета, при проведении размерного анализа, разрабатываемого ТП.

Методы

В основе работы модуля предполагается использование аннотированных 3D-моделей (Model-based definition). MBD — это цифровое представление изделия на основе его 3D-модели, которое отражает всю необходимую информацию для изготовления и проверки изделия, получаемую в ходе автоматизированного проектирования, и которую затруднительно взять в автоматизированном режиме с распечатанного чертежа (2D-модели) изделия. Аннотированная 3D-модель, фрагмент которой представлен на рисунке №1, содержит всю актуальную информацию о параметрах изделия. Для корректной работы модуля необходимо наличие 3D моделей готовой детали, первичной заготовки и промежуточных заготовок по операциям разрабатываемого ТП.

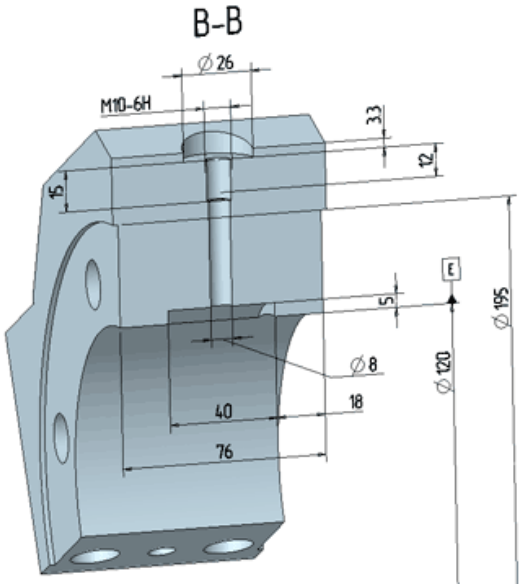


Рис. 1. Пример фрагмента представления аннотированной 3D-модели детали

В отличии от существующих методов автоматизации размерного анализа, где получение данных для построения размерных схем происходит с чертежа, в работе будут использоваться именно аннотированные 3D модели [18, 19]. Этому есть ряд причин.

3D-аннотации в модели являются семантическими, ассоциативно связанными с геометрией детали. Их может понимать совершенно разное программное обеспечение, что упрощает разработку модуля и дает возможность работы с существующей программой расчета размерных схем, работающей на базе MS-Excel. Так же, такой формат удобнее и

перспективнее для производства в целом. Вместо того, чтобы пересылать чертежи в формате PDF или печатать их для всех участников конструкторско-технологической цепочки подготовки производства, в совместное пользование всем заинтересованным сторонам предоставляется исходная аннотированная 3D-модель или нейтральный к CAD-системе файл в нейтральном формате STEP. Когда эти файлы открывают в CAM-системе для автоматизированной разработки операций, выполняемых на станках с ЧПУ или в системе программирования координатно-измерительной машины (СММ) для автоматизированной разработки программ измерений, каждой из этих систем распознает 3D-аннотации и ссылки на геометрию. Это позволяет отказаться от ручного ввода информации с чертежей в программное обеспечение, используемое на последующих этапах. В результате вся цепочка работает быстро и без ошибок. Особое значение это приобретает при проведении изменений.

Получать информацию с аннотированной 3D-модели детали, разработанной в CAD-системе планируется с помощью макросов.

Результаты

Так, макросы в КОМПАС-3D — это программные модули, в которых записывается последовательность действий пользователя. Доступ к созданию макроса следующий: Приложения > КОМПАС-Макро > Макросы (смотри рисунок 2).

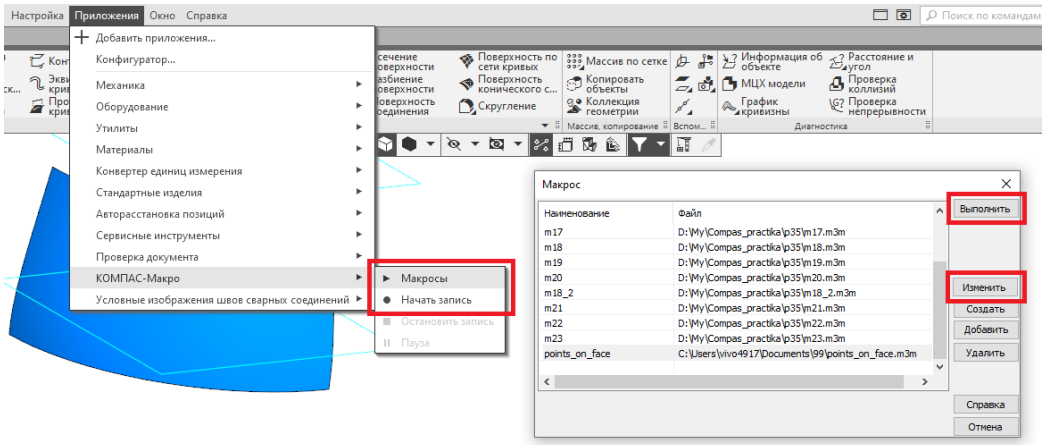


Рис. 2. Расположения вкладки «Макросы» для КОМПАС-3D

Работа с ними строится по классической схеме: последовательность действий пользователя записывается в виде программных модулей, список которых позволяет любой из них вызвать на выполнение, то есть осуществить записанные операции, и при необходимости отредактировать [18]. Таким образом, записав построение одного линейного размера под эскизом детали, мы получим базовый макрос, функционал которого

расширим для формирования целой размерной схемы в выбранной плоскости сечения 3D-модели.

Для корректного формирования конечной схемы линейных размеров следует создать скрипт в Python-коде модифицированного макроса для корректного переноса данных с 3D-моделей готовой детали, заготовки и межоперационных заготовок [16] (рисунок 3).

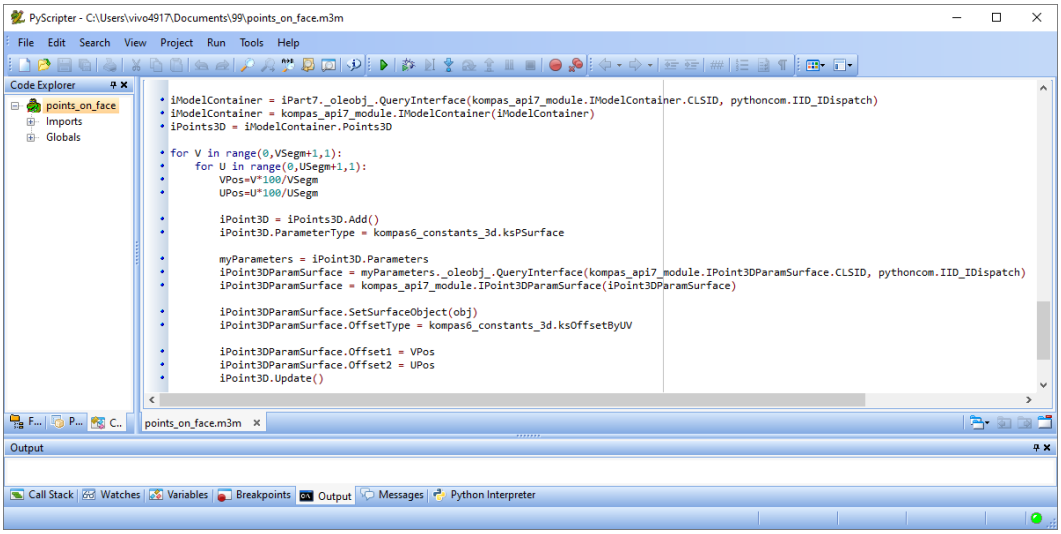


Рис. 3. Фрагмент результата модификации макроса нахождения начальной и конечной точек линейного размера, полученного с помощью скрипта на языке «Python»

В поставку КОМПАС-3D помимо механизма записи кода в макросы входит также комплект справочной документации для разработчиков, содержащий описание элементов объектной модели системы (папка SDK в каталоге установки системы), которые необходимы для создания скрипта в среде CAD-системы.

Обсуждение

Результаты данной работы будут важны для предприятий, занимающихся производством деталей различного типа, что определяет их практическую значимость. Разрабатываемый модуль позволит повысить качество проведения размерного анализа и сократить риск возникновения ошибок при проведении расчетов размерных цепей. Это в свою очередь, улучшит качество и надежность конечного продукта, а также увеличит конкурентоспособность предприятия на рынке. Описанный выше модуль позволит инженерам-технологам, знакомым с методикой размерного анализа, но не владеющим ею на высоком уровне, проводить расчеты размерных цепей при разработке ТП. При этом значительно снизится риск возникновения неточностей в расчетах в следствие сокращения ошибок человека при выполнении этих расчетов. В целом проведение размерного

анализа за счет его автоматизации становится достаточно быстро решаемой задачей и менее трудозатратным этапом проектирования новых ТП [20-22].

Заключение

Таким образом, благодаря автоматизированному созданию размерных схем, моделированию и анализу, инженеры-технологи смогут быстрее создавать и проверять различные концепции и варианты маршрута обработки заготовок, способов их закрепления и базирования в приспособлениях и на станках. Также такой модуль в совокупности с уже автоматизированными расчетами позволит выявить потенциальные проблемы и ошибки, возникающие на операциях ТП, еще на ранних стадиях проектирования, что позволит снизить количество дорогостоящих исправлений, вносимых в технологию, на более поздних этапах производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Валетов В.А. Технология приборостроения: учеб. пособ. / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 234 с.

[2] Наумова А.Н Причины возникновения брака продукции на машиностроительном предприятии и пути его сокращения // САФУ имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия – 2020. – Т. 12. – №. 1.

[3] Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник для вузов / А. А. Маталин. – 2-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.

[4] Timofeev D.Y., Kosheleva E.V. Improving the quality of manufacturing parts from titanium alloys using the method of preliminary local plastic deformation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2017, Vol. 87, Iss. 8, 082048.

[5] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, Key Engineering Materials, 2017, Vol. 736, pp. 86-90.

[6] Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Stepanov Y.S., Khizhnyak N.A. Improving Cutter Performance in Turning Complex Profiles, Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, Iss. 12, pp. 1003-1008.

[7] Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process, 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327(4) 042069.

[8] Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365-389.

[9] Yuan M., Wang, M. A feature selection method based on an improved fruit fly optimization algorithm in the process of numerical control milling, Advances in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 10, Iss. 5.
[10] Кранаренков Ю.Б. Повышение точности и производительности многорезцовой токарной обработки / Ю.Б. Кранаренков, С.А. Атаманов, Е.А. Шаев// Станки и инструменты.- № 8, 1974.- Сс. 28-30
[11] Астахов С.А., Сидоркин А.В., Маликов А.А. Экспериментальное определение жесткости технологической системы и ее влияние на точность обработки/ Известия ТулГУ, Серия «Технические науки», 2011, 4 вып., с. 302-306.
[12] Ребрин Ю.И. Управление качеством [Текст]: учеб. пособ. / Ю.И. Ребрин − М.: Изд-во ТРТУ, 2004.− 174 с.
[13] Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. – 2015.
[14] Шаш Н.Н. Управление качеством на предприятии; под редакцией А.В. Касьянова (малый бизнес) [Текст]:/ Н.Н. Шаш, А.В. Касьянов// М.: ГроссМедиа, 2014. − Сс. 80-85.
[15] Ермаков С. П., Помпеев К. П. Методика исследования возможности автоматического обеспечения точности технологических процессов изготовления деталей // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 2. сс. 176–183. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183.
[16] Ермаков С.П., Помпеев К.П. Оценка надежности внедряемых в производство технологий по параметрам точности // Современное машиностроение: наука и образование 2024: материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024, сс. 582-595. DOI:10.18720/SPBPU/2/id24-123.
[17] Иващенко, И. А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации / И. А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с
[18] Камнев А. Интерфейс прикладного программирования геометрического ядра C3D. Его применение и главное отличие от API системы КОМПАС-3D // САПР и графика. 2016. № 5.
[19] Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. N 194(2). P. 022005.
[20] Масягин В.Б. Автоматизация технологических размерных расчётов деталей типа тел вращения с применением программы «NORMAL» / Современные наукоемкие технологии, № 10, 2015., с. 52-57.
[21] Масягин В.Б. Автоматизация размерного анализа технологических процессов механической обработки дета лей типа тел вращения // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». – 2008. – № 3(70). – С. 40-44.

[22] Борботько В.А., Помпеев К.П., Плешков А.А. Интерактивный синтез технологических размерных схем // Современное машиностроение. Наука и образование: матер. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 1049-1058. DOI: 10.1872/MMF-2020-28.

S.P. Ermakov, K.P. Pompeev

CONSTRUCTION OF A SKETCH OF A PART USING MACROS AND TAKING INTO ACCOUNT THE TECHNOLOGY OF ITS MANUFACTURING TO CONDUCT A DIMENSIONAL ANALYSIS OF THE TP

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract

This paper discusses the need to develop a module for constructing sketches of a part to automate dimensional analysis when designing multi-operation TPs that are guaranteed to provide the parameters of the designer-specified dimensional accuracy and requirements for the relative position of machined surfaces without defects.

Key words dimensional diagrams, TP reliability, dimensional analysis, accuracy parameters, algorithm, methodology.

REFERENCES

[1] ValetovV.A. Technology of instrument making: studyguide / V.A.Valetov, K.P.Pompeev. – SPb.: NRU ITMO, 2013. – 234 p. (rus.)
[2] Naumova A.N. Causes of product defects at a mechanical engineering enterprise and ways to reduce them // NArFU named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia – 2020. – Vol. 12. – No. 1. (rus.)
[3] Matalin, A. A. Mechanical engineering technology: textbook for universities / A. A. Matalin. – 2nd ed. – SPb: Lan, 2010. – 512. (rus.)
[4] Timofeev D.Y., Kosheleva E.V. Improving the quality of manufacturing parts from titanium alloys using the method of preliminary local plastic deformation, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2017, Vol. 87, Iss. 8, 082048.
[5] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, Key Engineering Materials, 2017, Vol. 736, pp. 86-90.

[6] Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Stepanov Y.S., Khizhnyak N.A. Improving Cutter Performance in Turning Complex Profiles, Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, Iss. 12, pp. 1003-1008.
[7] Mavliutov A.R., Zlotnikov E.G. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process, 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327(4) 042069.
[8] Yang Y. Machining parameters optimization of multi-pass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365-389.
[9] Yuan M., Wang, M. A feature selection method based on an improved fruit fly optimization algorithm in the process of numerical control milling, Advances in Mechanical Engineering, 2018, Vol. 10, Iss. 5.
[10] Kranarenkov Yu.B. Improving the accuracy and productivity of multi-cutter turning / Yu.B. Kranarenkov, S.A. Atamanov, E.A. Shaev // Machine tools and instruments. – No. 8, 1974. – Pp. 28-30. (rus.)
[11] Astakhov S.A., Sidorkin A.V., Malikov A.A. Experimental determination of the rigidity of the technological system and its influence on the accuracy of processing / Bulletin of Tula State University, Series "Technical Sciences", 2011, 4th issue, pp. 302-306.
[12] Rebrin Yu.I. Quality management [Text]: textbook. manual / Yu.I. Rebrin - M.: Publishing house of TRTU, 2004. – 174 p. (rus.)
[13] Balla O. M. Processing of parts on CNC machines. Equipment. Tooling. Technology. – 2015. (rus.)
[14] Shash N. N. Quality management at the enterprise; edited by A. V. Kasyanov (small business) [Text]: / N. N. Shash, A. V. Kasyanov // M.: GrossMedia, 2014. – Pp. 80-85. (rus.)
[15] Emakov S. P., Pompeev K. P. Methodology for studying the possibility of automatic accuracy of manufacturing processes of parts // News of universities. Instrument-making. 2025. Vol. 68, No. 2, pp. 176-183. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-2-176-183. (rus.)
[16] Ermakov S.P., Pompeev K.P. Evaluation of the reliability of technologies introduced into production by accuracy parameters // Modern mechanical engineering: science and education 2024: proceedings of the 13th International Scientific Conference, Russia, June 20 / Ed. by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. – SPb.: POLITECH-PRESS, 2024, pp. 582-595. DOI:10.18720/SPBPU/2/id24-123. (rus.)
[17] Ivashchenko I.A. Technological dimensional calculations and methods for their automation. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 222 p. (rus.)
[18] Kamnev A. Application programming interface of the C3D geometric kernel. Its application and main difference from the KOMPAS-3D system API // CAD and graphics. 2016. No. 5. (rus.)

[19] Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. N 194(2). P. 022005.
[20] Masyagin VB Automation of technological dimensional calculations of parts such as bodies of revolution using the program "NORMAL" / Modern science-intensive technologies, No. 10, 2015., pp. 52-57. (rus.)
[21] Masyagin VB Automation of dimensional analysis of technological processes of mechanical processing of parts such as bodies of revolution // Omsk Scientific Bulletin. Series "Devices, Machines and Technologies". – 2008. – No. 3 (70). – P. 40-44. (rus.)
[22] Borbotko V. A., Pompeev K.P., Pleshkov A. A. Interactive synthesis of technological dimensional schemes // Modern mechanical engineering. Science and education: materials. 9th Int. scientific-practical. conf. / Ed. by A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. – SPb.: POLITECH-PRESS, 2020. pp. 1049-1058. DOI: 10.1872/MMF-2020-28. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 621:658.512.4:004.9:004.418
doi:10.18720/SPBPU/2/id-169

К.П. Помпеев[1], М.К. Тимофеев[2]

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗМЕРНО-ТОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА ТП ПО ЭЛЕМЕНТАМ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕТАЛИ ИЗ ПРОКАТА



[1]Кирилл Павлович Помпеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79110108265, E-mail: kir-pom@mail.ru



[2]Михаил Кириллович Тимофеев,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +79313481842, E-mail: timofeev.mixail.0@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы автоматизации построения схем биений в рамках технологической подготовки производства деталей типа тел вращения. Описан разработанный программный комплекс, реализующий интерактивный синтез схем с учётом операций, установов и требований взаимного расположения поверхностей. Программный комплекс был апробирован на примере конкретной детали. Внедрение предлагаемого подхода позволяет не только сократить временные затраты на проектирование, но и повысить точность технологических решений благодаря снижению влияния человеческого фактора [1-3], что непосредственно сказывается на точности изготовления деталей [3-5]. Применение графовых моделей и алгоритмических расчётов подтверждено как в отечественной, так и в зарубежной литературе [3, 6-9].

Ключевые слова: биение, цифровое производство, припуски, требования взаимного расположения, автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства.

Введение

Современная цифровизация производственных процессов и развитие концепции Индустрии 4.0 ставят задачу повышения точности проектирования технологических процессов в центр внимания [9, 10], обеспечивающих такие параметры качества, как производительность [11-13], точность размеров [1, 3, 5, 6], шероховатость поверхностей [14-16] и требования их взаимного расположения [1, 6, 17, 18]. Одним из критически важных этапов в разработке технологических маршрутов является построение схем биений, что существенно влияет на итоговую точность изготовления осесимметричных деталей. Традиционные методы построения размерных схем, как правило, требуют высокой квалификации технолога и сопряжены с риском ошибок, что приводит к завышенным припускам и дополнительным затратам [3, 5].

Несколько исследований, в том числе работы [1, 17, 18], подтверждают необходимость автоматизации процессов при проведении размерно-точностного анализа и синтеза биений. Внедрение компьютеризированных методов, таких как использование графовых моделей для анализа технических параметров, позволяет эффективно решать задачи оптимизации технологической подготовки [13, 20]. Цель данной работы связана с разработкой программного комплекса, реализующего интерактивный синтез схем биений, с целью ускорения проектирования и повышения точности технологических решений. Для решения указанных задач, связанных с автоматизацией построения и расчёта схем биений с учётом операций, установов, типов поверхностей и параметров припусков были сформированы следующие основные требования к системе:

- Обеспечить интерактивный ввод технологической информации: загрузка эскиза детали и поэтапное добавление данных об операциях и поверхностях.
- Реализовать автоматизированную визуализацию схемы биений и УНП по мере ввода данных.
- Выполнить расчёт удвоенных неравномерностей припусков (УНП) для учёта остаточных биений на переходах [3, 17].
- Автоматически формировать требования взаимного расположения поверхностей (ТВР) в соответствии с данными чертежа.
- Интегрировать расчет биений на каждом установе и выдачу числовых результатов для последующего анализа.

Методы

В качестве теоретической основы использовалась методика размерно-точностного анализа ТП по деталям типа тела вращения, разработанная в СЗТУ [3], сущность которой заключается в том, что специальным образом подготовленный эскиз детали с учетом припусков на обработку ее поверхностей используется для построения схемы биений поверхностей заготовки, возникающих в ходе выполнения ТП ее обработки. Векторы биений, возникающих на каждой операции (каждом установе) ТП строятся в определенной последовательности.

При наличие исходной штампованной или литой заготовки на схеме указывают векторы биений ее поверхностей. Далее для каждой механообрабатывающей операции (установа) строят вектор биения базовой поверхности, а за ним векторы биений наружных и внутренних поверхностей заготовки до и после их обработки с указанием удвоенной неравномерности припуска (УНП). В конце схемы указывают векторы заданных конструктором требований взаимного расположения (ТВР) поверхностей, выполнение которых следует проверить.

После формирования схемы биений проводят их расчет в зависимости от их функций по формулам, указанным в [3, 17], и с использованием справочных данных, приведенных в [3, 6, 17, 19], а также осуществляют проверку возможности обеспечения ТВР.

Если ТВР не могут быть выполнены, то проводят корректировку параметров, влияющих на величины рассчитываемых биений. Такими параметрами являются: точность базовой поверхности; класс точности приспособления и/или его тип [2]. Либо корректируют структуру самого ТП – структуру операций и последовательность их выполнения. Корректировку проводят до тех пор, пока не будет получен удовлетворительный результат, либо будет установлено, что по рассматриваемому ТП ТВР не могут быть обеспечены автоматически, то есть для их обеспечения нужна выверка заготовки на операциях ТП.

Если ТВР могут быть обеспечены автоматически без выверки заготовки (или с использованием ее выверки) проводится расчет УНП, величины которых используются при расчете промежуточных диаметральных размеров поверхностей табличным методом, представленным в [3, 17].

Результаты

Разработанный программный комплекс был протестирован на примере осесимметричной детали — «Крышка под клапан», эскиз которой представлен на рисунке 1.

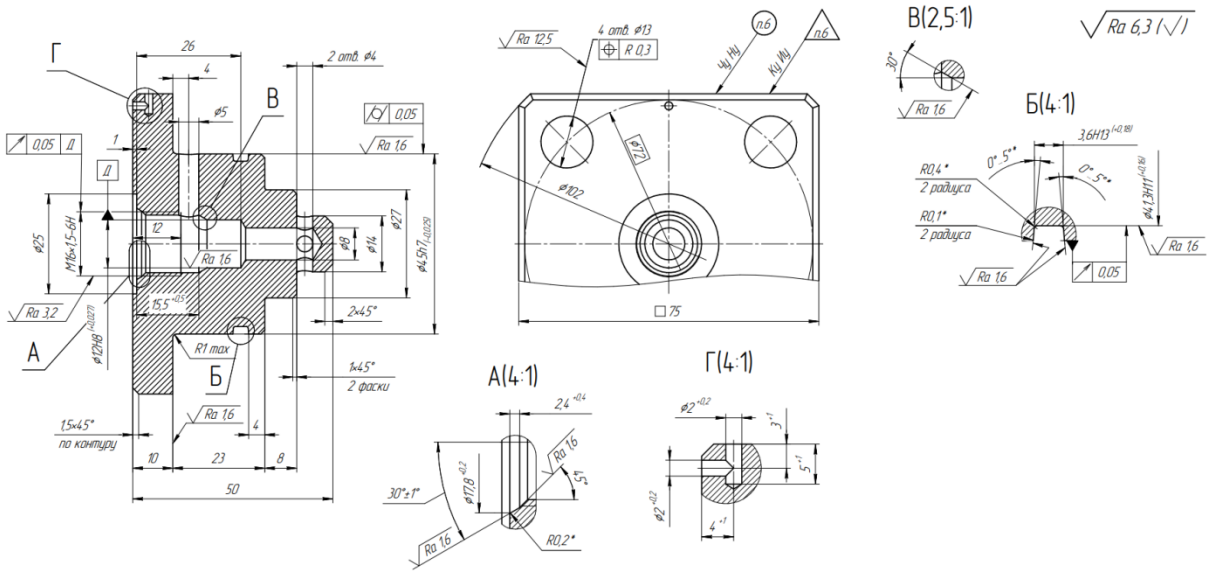


Рис. 1. Эскиз детали «Крышка под клапан»

Система позволяет поэтапно построить схему биений и провести расчет биений и припусков, начиная от исходной заготовки до финального состояния поверхности, требуемого по чертежу. Тестирование комплекса показало его эффективность по сравнению с традиционными методами – как по точности, так и по скорости выполнения операций.

Функциональность комплекса базируется на реализованном алгоритме, представленном на рисунке 2, обеспечивающем автоматизацию построения схем биений и последовательное выполнение всех этапов ТП. Алгоритм включает следующие ключевые этапы:

1. **Загрузка эскиза.** На первом этапе пользователь загружает заранее подготовленный эскиз детали. Как правило, это JSON-файл, содержащий информацию о геометрии осесимметричной детали. После загрузки программа автоматически масштабирует изображение: сжимает его по оси X и растягивает по оси Y. Это делается для того, чтобы условные горизонтальные линии, соответствующие разным поверхностям, не перекрывали друг друга на финальной схеме биений, облегчая визуальное восприятие и анализ.

2. **Задание номеров поверхностям.** После отображения эскиза пользователь последовательно указывает номера поверхностей. Нумерация необходима для корректного связывания поверхностей с технологическими операциями, установами, а также для построения требований взаимного расположения (ТВР) и расчета биений.

3. **Добавление операций.** Каждая операция представляет собой отдельный этап обработки заготовки (например, токарная, сверлильная и др.). Пользователь добавляет новую операцию, указывает её номер, вид,

тип приспособления и его класс точности. На этом этапе создаётся логическая структура будущей схемы биений.

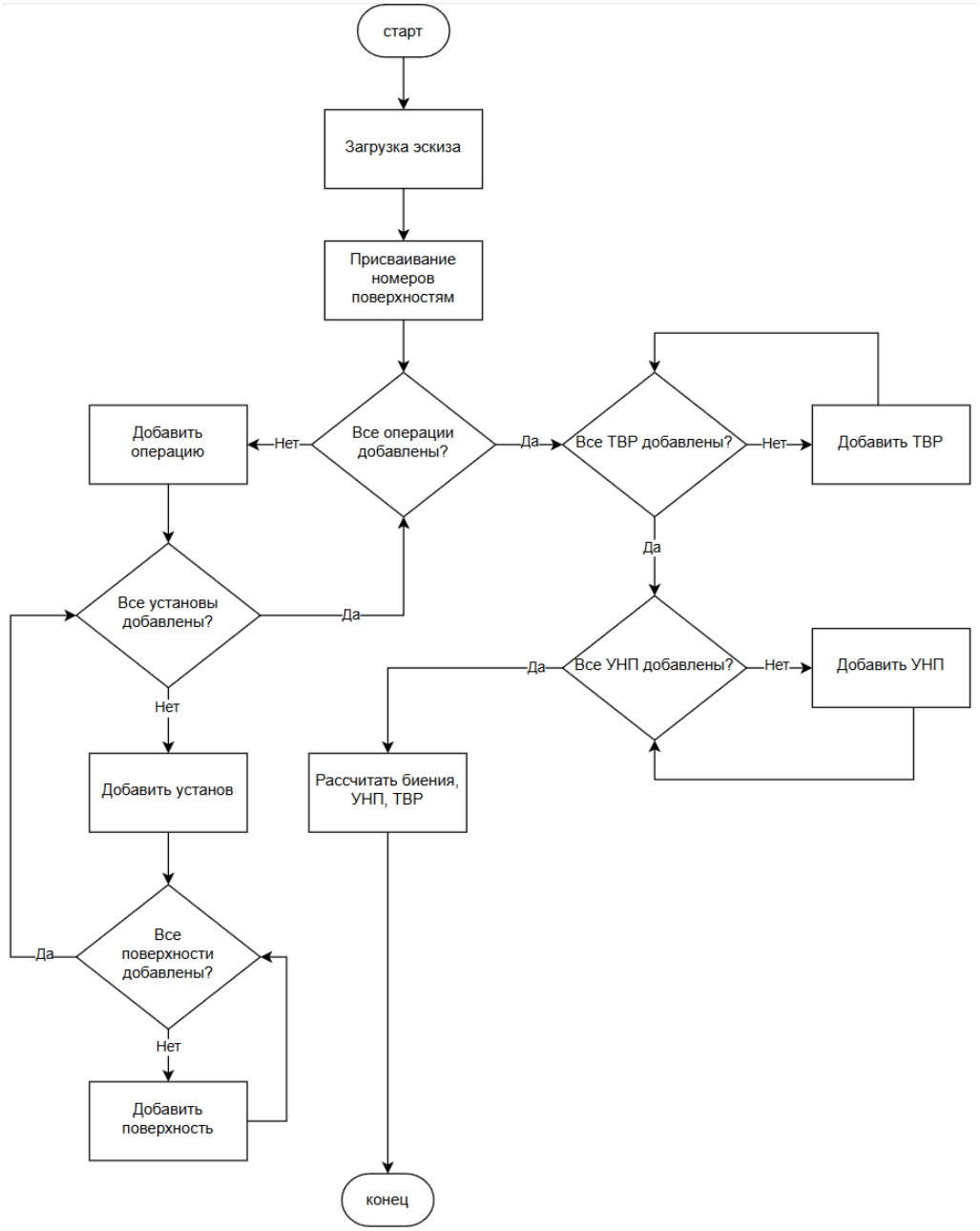


Рис. 2. Алгоритм построения схемы биений

4. **Добавление установов**. Добавление информации об установе необходимо для дальнейшего определения способа закрепления заготовки на нем.

5. **Добавление поверхностей**. Следующим шагом является привязка конкретных поверхностей к каждой операции: указываются базовые, обрабатываемые и обработанные элементы. Программа требует от пользователя указать функцию поверхности (база, обрабатываемая, обработанная) и её тип (вал, отверстие), а для базовой поверхности

указываем дополнительно предполагаемый номинальный размер, верхнее и нижнее отклонения, длину участка, неиспользуемого для базирования заготовки на операции.

6. **Добавление ТВР**. После задания всех поверхностей пользователь переходит к построению требований взаимного расположения. Это связи между базовыми и зависимыми поверхностями, которые задаются либо конструкторской документацией, либо при необходимости технологом вручную. Программа автоматически отрисовывает связи, фиксируя условные обозначения, направление и допуски.

7. **Добавление УНП.** На данном этапе формируются связи между обрабатываемыми и обработанными поверхностями, учитывая остаточные биения. Для каждой пары система рассчитывает удвоенную неравномерность припуска (УНП). Эти значения учитываются при расчёте припусков для определения промежуточных диаметральных размеров.

8. **Расчет биений.** На завершающем этапе осуществляется автоматический расчёт биений для всех операций и установов. Пользователь выбирает вид заготовки (прокат, литьё, штамповка) и указывает её длину. Все расчёты выполняются по эмпирическим формулам и алгоритмам. Результаты автоматически экспортируются в Excel-файл, а схема визуализируется в интерактивной графической форме.

Таким образом, представленный алгоритм охватывает все этапы подготовки схемы биений: от загрузки эскиза до расчета биений. Реализация алгоритма была выполнена в виде программного комплекса, обладающего графическим интерфейсом, адаптированным под работу технолога. Интерфейс разработан с приоритетом на пошаговую логику и визуальную понятность. Пользователь проходит в интерактивном режиме каждый этап построения схемы биений, видя промежуточные результаты на экране.

Каждое действие сопровождается визуализацией: при нумерации поверхностей – номера автоматически отображаются на эскизе, при добавлении операций – появляются линии обработки и подписи кодов, при построении ТВР – отображаются направленные связи с допусками.

На рисунке 3 представлена схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в программе.

Для оценки эффективности комплекса было выполнено сравнение с традиционным подходом – построение схемы биений и последующий её расчет вручную с использованием Компас 3D. Как результат, построение заняло от 40 до 60 минут, требовало постоянной перекомпоновки схемы при любых изменениях и требовало расчета биений, ТВР и УНП вручную, что существенно увеличило вероятность допуска ошибок в расчетах.

Схема биений, построенная в CAD-системе КОМПАС-3D, представлена на рисунке 4.

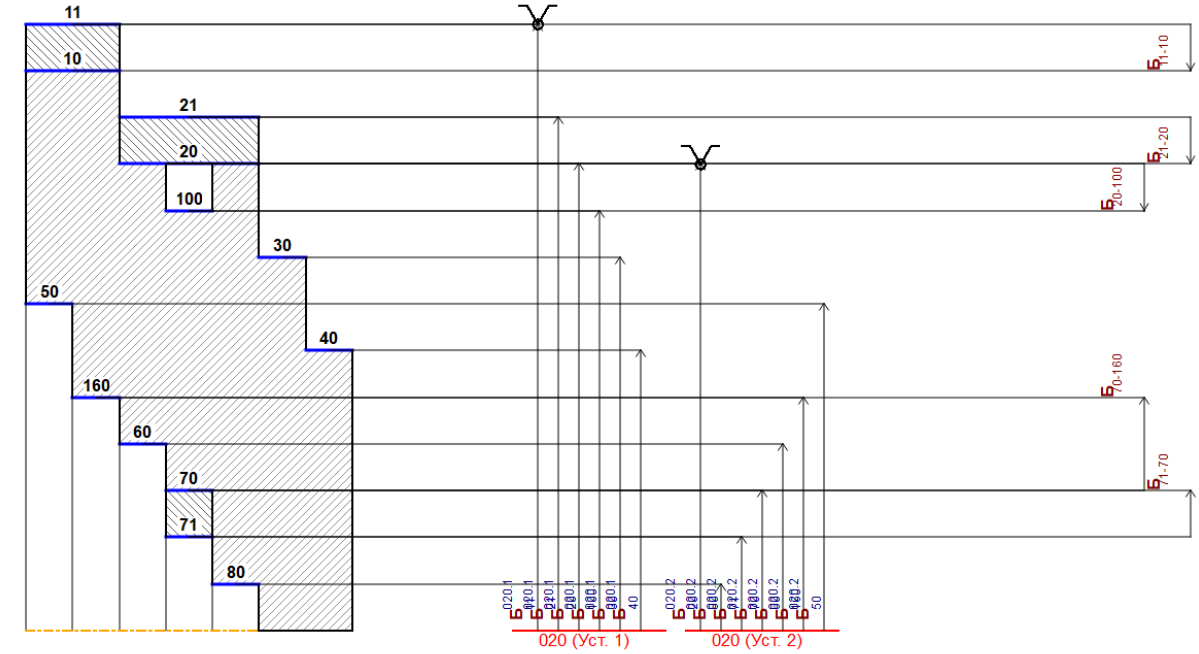


Рис. 3. Схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в предлагаемом программном комплексе

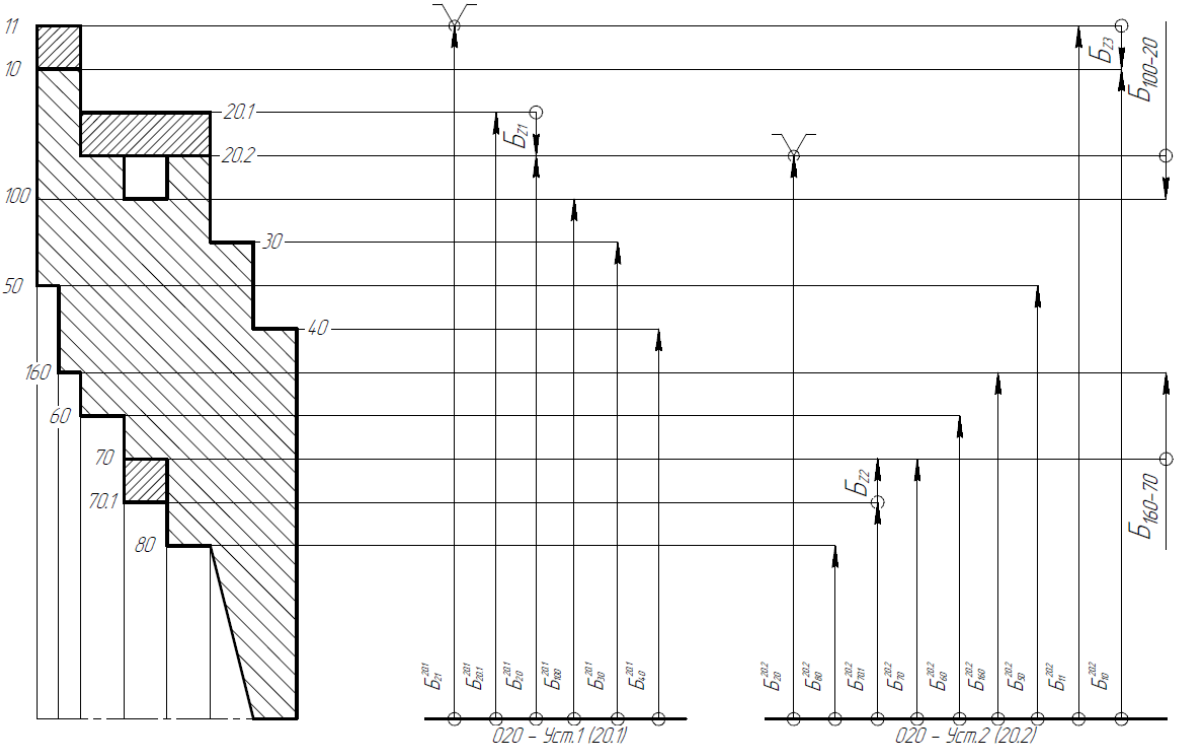


Рис. 4. Схема биений детали «Крышка под клапан», построенная в CAD-системе КОМПАС-3D

Обсуждение

Сравнение ручного и автоматизированного метода построения схемы биений представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение ручного и автоматизированного способов построения схем биений

Критерий	Ручной метод	Программный комплекс
Время построения схемы	60 минут	10 минут
Гибкость при изменениях	Низкая (вся схема перестраивается)	Высока (автоперестройка)
Автоматический расчет УНП	Нет	Да
Автоматический расчет ТВР	Нет	Да
Автоматический расчет биений	Нет	Да
Проверка корректности связей	Только визуально	Автоматическая
Визуализация результата	Частично (статичная схема)	Интерактивная
Обновляемость схемы	Только вручную	Автоматическая

Результаты экспериментов свидетельствуют о значительном сокращении времени подготовки технологических схем и повышении точности анализа биений благодаря использованию автоматизированного подхода. Сравнение с ручным методом, реализованным в системе КОМПАС-3D, показало, что ручной расчёт требует постоянной перекомпоновки схемы, что ведёт к появлению ошибок и значительным временным затратам. Кроме того, исключение человеческого фактора при расчётах ТВР и УНП существенно повышает достоверность итогового технологического процесса. Применение графовых моделей для анализа взаиморасположения поверхностей уже подтверждено в ряде исследований [3, 6, 17, 20], что делает предложенный подход актуальным для различных отраслей машиностроения, приборостроения и даже микромеханики. Выявленные преимущества методики позволяют рекомендовать её для интеграции с цифровыми производственными платформами и системой контроля качества.

Расширенная функциональность комплекса и возможность оперативного обновления схемы открывают перспективы для дальнейшего развития, включая реализацию модуля расчёта линейных размерных цепей [3, 17]. Данная интеграция позволит не только улучшить контроль технологических процессов, но и повысить конкурентоспособность производства на мировом рынке.

Заключение

Разработанный программный комплекс демонстрирует перспективность подхода автоматизированного построения схем биений. Система позволяет:

- ускорить процесс проектирования ТП;
- повысить точность и надёжность решений;
- обеспечить интеграцию с цифровыми производственными платформами.

Перспективой дальнейшего развития является расширение базы шаблонов для типовых операций, а также внедрение модуля расчёта линейных размерных цепей. Практическая значимость разработанного подхода подтверждается как отечественными, так и зарубежными исследованиями, что открывает широкие перспективы для его применения в различных отраслях машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Помпеев К.П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надёжных технологий // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013. – С. 600–609.

[2] Помпеев К.П., Одинцова Л.В. Выбор приспособлений при автоматизированном проектировании надёжных технологий // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 187–192.

[3] Вороненко А.Е. и др. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2010.

[4] Халимоненко А.Д., Вьюшин Р.В. Точность обработки при точении заготовок режущим инструментом, оснащённым сменными керамическими пластинами // Записки горного института, 2014. Т. 209, С. 99–103.

[5] Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. – 3-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010.

[6] Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

[7] Asiltürk I., Çunkaş M. Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method, 2011, Expert Systems with Applications.

[8] Asiltürk I., Çelik L., Canli E., Önal G. Regression modeling of surface roughness in grinding, 2011, Advanced Materials Research.

[9] Asiltürk I. Application of artificial intelligence to predict surface roughness, 2014, Experimental Techniques.
[10] Bezyazychny V.F., Sutyagin A.N., Bolotein A.N. Modeling a 3D surface roughness of mating parts produced with lathe turning, 2018, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 194(2), 022005.
[11] Maksarov V., Khalimonenko A. Forecasting performance of ceramic cutting tool, 2017, Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 86–90.
[12] Maksarov V., Khalimonenko A. Quality assurance during milling of precision elements of machine components with ceramic cutting tools, 2018, International Review of Mechanical Engineering, Vol. 12, Iss. 5, pp. 437–441.
[13] Yang Y. Machining parameters optimization of multipass face milling using a chaotic imperialist competitive algorithm with an efficient constraint-handling mechanism, 2018, CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol. 116, Iss. 3, pp. 365–389.
[14] Asiltürk I., Akkuş H. Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method, 2011, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation.
[15] Das S.R., Panda A., Dhupal D. Analysis of surface roughness in hard turning with coated ceramic inserts: Cutting parameters effects, prediction model, cutting conditions optimization and cost analysis, 2017, Ciencia e Tecnica Vitivinicola, Vol. 32, pp. 127–154.
[16] Andreev Y.S., Isaev R.M., Lubiviy A.V. Improvement of piezoelectric vibration sensors' performance characteristics via optimization of details' functional surfaces roughness, 2018, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1015, 052010.
[17] Валетов В.А. Технология приборостроения. Учеб. пособие / В.А. Валетов, К.П. Помпеев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
[18] Pompeev K.P., Lazarev E.E., Pinaev D.S. Interactive synthesis and calculation of runout // Proceedings of the Tenth Session of the International Scientific School "Fundamental and Applied Problems of Reliability and Diagnostics of Machines and Mechanisms," dedicated to the memory of V.P. Bulatov, VPB–11. St. Petersburg: IPMash RAS, 2011. – pp. 334–340.
[19] Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003.
[20] Клевцов В.А. О роли методологии в развитии технических знаний и обучении // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: Наука и образование». – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2013.

K.P. Pompeev, M.K. Timofeev

AUTOMATION OF DIMENSIONAL AND ACCURACY ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PREPARATION BASED ON ROTATIONAL ELEMENTS IN THE MANUFACTURING OF AN AXISYMMETRICAL PART FROM ROLLED STOCK

ITMO University, Russia

Abstract

The paper addresses the automation of constructing runout schemes as part of the technological preparation for manufacturing parts of revolution. A software package has been developed that implements an interactive synthesis of schemes, taking into account the requirements for mutual positioning of surfaces. The software was tested on a specific part example. Implementation of the proposed approach not only reduces the time spent on design, but also increases the accuracy of technological decisions by minimizing the influence of the human factor [1-3], which directly affects the manufacturing precision of parts [3-5]. The use of graph models and algorithmic calculations is supported by both domestic and international literature sources [3, 6-9].

Keywords: runout, digital manufacturing, allowances, mutual positioning requirements, design automation, manufacturing process planning

REFERENCES

[1] Pompeev, K.P. Dimensional and Accuracy Analysis in the Automated Design of Reliable Technologies. Proc. 3rd Int. Sci.-Pract. Conf. “Modern Mechanical Engineering: Science and Education”, St. Petersburg: Polytechnic Univ. Press, 2013, pp. 600–609. (rus.)

[2] Pompeev, K.P., Odintsova, L.V. Selection of Fixtures in the Automated Design of Reliable Technologies. Instrumentation and Technologies, 2004, No. 17–18, pp. 187–192. (rus.)

[3] Voronenko, A.E. et al. Fundamentals of Mechanical Engineering Technology: A Textbook. St. Petersburg: SZTU, 2010. (rus.)

[4] Khalimonenko, A.D., Vyushin, R.V. Accuracy of Machining in the Turning of Workpieces with Cutting Tools Equipped with Replaceable Ceramic Inserts. Proceedings of the Mining Institute, 2014, Vol. 209, pp. 99–103. (rus.)

[5] Matalin, A.A. Technology of Mechanical Engineering: A Textbook for Universities. 3rd ed., St. Petersburg: Lan, 2010. (rus.)

[6] Ivashchenko I.A. Technological dimensional calculations and methods for their automation. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – 222 p. (rus.)

[7] Asiltürk, I., Çunkaş, M. Modeling and Prediction of Surface Roughness in Turning Operations Using Artificial Neural Network and Multiple Regression Method. Expert Systems with Applications, 2011.
[8] Asiltürk, I., Çelik, L., Canli, E., Önal, G. Regression Modeling of Surface Roughness in Grinding. Advanced Materials Research, 2011.
[9] Asiltürk, I. Application of Artificial Intelligence to Predict Surface Roughness. Experimental Techniques, 2014.
[10] Bezyazychny, V.F., Sutyagin, A.N., Bolotein, A.N. Modeling a 3D Surface Roughness of Mating Parts Produced with Lathe Turning. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, Vol. 194(2), 022005.
[11] Maksarov, V., Khalimonenko, A. Forecasting Performance of Ceramic Cutting Tools. Key Engineering Materials, 2017, Vol. 736, pp. 86–90.
[12] Maksarov, V., Khalimonenko, A. Quality Assurance During Milling of Precision Elements of Machine Components with Ceramic Tools. Int. Rev. of Mechanical Engineering, 2018, Vol. 12, No. 5, pp. 437–441.
[13] Yang, Y. Machining Parameters Optimization of Multi-pass Face Milling Using a Chaotic Imperialist Competitive Algorithm. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2018, Vol. 116, No. 3, pp. 365–389.
[14] Asiltürk, I., Akkuş, H. Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method. Measurement, 2011.
[15] Das, S.R., Panda, A., Dhupal, D. Analysis of Surface Roughness in Hard Turning with Coated Ceramic Inserts. Ciencia e Tecnica Vitivinicola, 2017, Vol. 32, pp. 127–154.
[16] Andreev, Y.S., Isaev, R.M., Lubiviy, A.V. Improving Performance of Piezoelectric Vibration Sensors by Optimizing Functional Surface Roughness. Journal of Physics: Conference Series, 2018, Vol. 1015, 052010.
[17] Valetov V.A. Technology of instrument making: study guide / V.A. Valetov, K.P. Pompeev. – SPb.: NRU ITMO, 2013. – 234 p. (rus.)
[18] Pompeev, K.P., Lazarev, E.E., Pinaev, D.S. Interactive Synthesis and Calculation of Runout. Proc. 10th Int. School “Reliability and Diagnostics of Machines and Mechanisms” (VPB-11), St. Petersburg: IPMash RAS, 2011, pp. 334–340.
[19] Reference technologist-machine builder. In 2 vols. V.1 / Ed. A.M. Dalsky, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov. – 5th ed., Revised. – M.: Mechanical Engineering-1, 2003. (rus.)
[20] Klevtsov, V.A. On the Role of Methodology in the Development of Technical Knowledge and Education. Proc. 3rd Int. Sci.-Pract. Conf. “Modern Mechanical Engineering: Science and Education”, St. Petersburg: Polytechnic Univ. Press, 2013. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 539.3
doi:10.18720/SPBPU/2/id-170

А.И. Веремейчик

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛЕЙ



Андрей Иванович Веремейчик,
Брестский государственный технический университет
Беларусь, Брест
Тел.: (162)32-1742, E-mail: vai_mrtm@bstu.by.

Аннотация

В работе проведено компьютерное моделирование лазерной закалки стальных образцов с использованием вычислительного комплекса *ANSYS Workbench*. Выполнен расчет температурного поля, индуцированного лазерным излучением. Исследовано влияние основных технологических параметров процесса обработки (радиус лазерного пятна, скорость движения пятна) на распределение полей температур в зоне термического влияния.

Ключевые слова: лазер, закалка, температурное поле, пятно, скорость.

Введение

Перспективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей машин и механизмов является лазерная закалка, при которой источником нагрева является лазерное излучение. Лазерная закалка характеризуется локальным нагревом участка поверхности под воздействием излучения и последующим быстрым охлаждением этого поверхностного участка в результате отвода теплоты во внутренние слои металла. Сущность лазерной закалки заключается в превращении при быстром охлаждении гранецентрированной кристаллической решетки аустенита в объемно-центрированную кристаллическую решетку мартенсита [1, 2]. При этом важным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит от уровня и скорости нагрева и следующего

за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение [1–17].

Методы

Образцы из стали 40Х13 были подвергнуты обработке высокоэнергетической струей лазера в лаборатории плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета, в процессе которой производилась их закалка. Обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия *ЛК-1000* фирмы *IPG* (тип YLR-1) (рис. 1) [8–10]. В процессе обработки образцов мощность лазера составляла 1 *кВт*, радиус лазерного пятна составлял 0.35…3 *мм*, скорость его движения вдоль дорожки варьировалась от 100 до 20000 *мм/мин*.

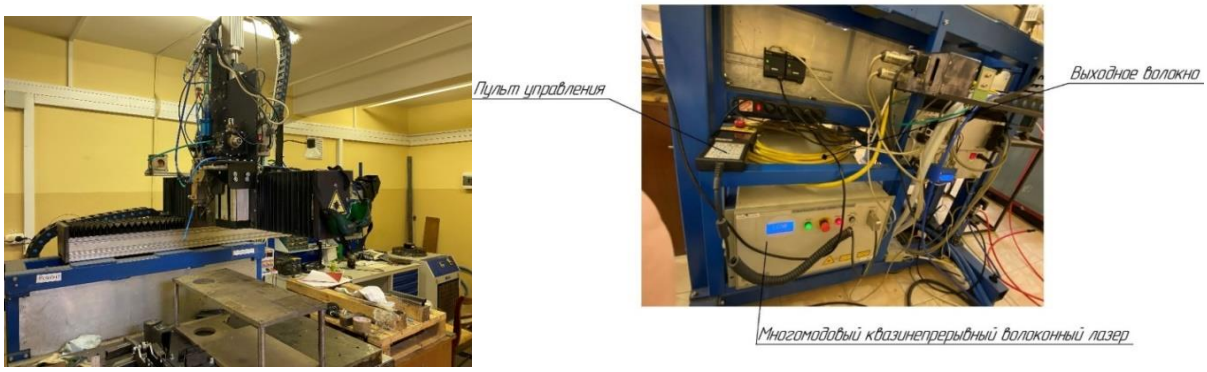


Рис. 1. Волоконный иттербиевый лазер непрерывного действия ЛК-1000 фирмы IPG



Рис. 2. Схема обработки

Распределение температурных полей в образце при лазерном излучении определяется из уравнения Фурье:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - div\left(\lambda grad T\right) = q_v,$$

где $C_v = C_P \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, $\frac{Дж}{м^3 \cdot °C}$; C_P – удельная теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot °C}$; ρ – плотность материала, *кг/м*^{3}; λ – коэффициент

теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot °C}$; q_v – объемная плотность теплового потока источника тепла, $\frac{Вт}{м^3}$.

Рассмотрим задачу нагрева движущимся тепловым источником (лазерным пучком) мощностью P радиуса r. Учитывая, что в общем случае теплофизические характеристики материала являются функциями температуры, координат и времени, дифференциальное уравнение теплопроводности (1) примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_P T\right) + v\rho C_P \, gradT - div\left(\lambda gradT\right) = q_v, \tag{2}$$

Граничные условия задаются конвекцией с воздухом и тепловым излучением, описывающимся законом Стефана–Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha\left(T_0 - T\right) + \varepsilon\sigma\left(T_0^4 - T^4\right), \tag{3}$$

где v – скорость движения источника тепла, $\frac{м}{с}$; T_0 – температура окружающей среды, $°C$; ε – излучательная способность поверхности; α – коэффициент конвекции, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot K^4}$ – постоянная Стефана−Больцмана.

Для моделирования распространения температуры вглубь детали при лазерной закалке создан макрос для *ANSYS Mechanical* на языке программирования *APDL*, в котором задаются характеристики температурной нагрузки, скорость движения источника нагрева, координаты его начального положения, время движения и др. В соответствии со скоростью движения лазера к узлам конечно-элементной модели вдоль режущего лезвия пошагово прикладывалась температурная нагрузка. В *APDL*-макросе для учета тепловой нагрузки использовалась зависимость:

$$q = Aq_H \exp\left[-\frac{\left(x - x_0\right)^2 + \left(y - y_0 - vt\right)^2}{r_H^2}\right], \tag{4}$$

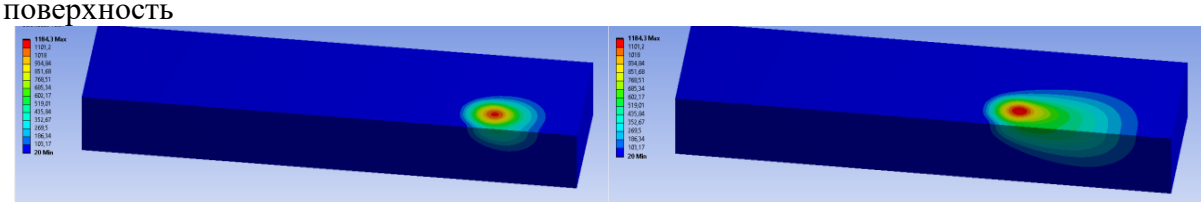
где $q_H = \frac{P}{\pi r_H^2}$ – плотность теплового потока на поверхности, $\frac{Вт}{м^2}$; r_H – радиус пятна нагрева, *м*; x, y – координаты центра пятна нагрева, *м*; x_0, y_0 – начальные координаты центра пятна нагрева, *м*; v – скорость движения источника тепла, *м/с*; A – поглощательная способность материала, зависящая от свойств материала, состояния поверхности, температуры и длины волны. Начальная температура принималась равной 20 $°C$, эффективная мощность лазера P = 1 *кВт*.

На поверхностях модели задавалась конвекция с различными коэффициентами α= (5–30) $\frac{Bm}{м^2 \cdot °C}$. Численный эксперимент проводился при радиусах пятна нагрева 0,35–15 *мм* и скоростях движения источника нагрева *v*=600–20000 *мм/мин*. Теплофизические характеристики материала задавались зависящими от температуры в соответствии с [2].

Результаты

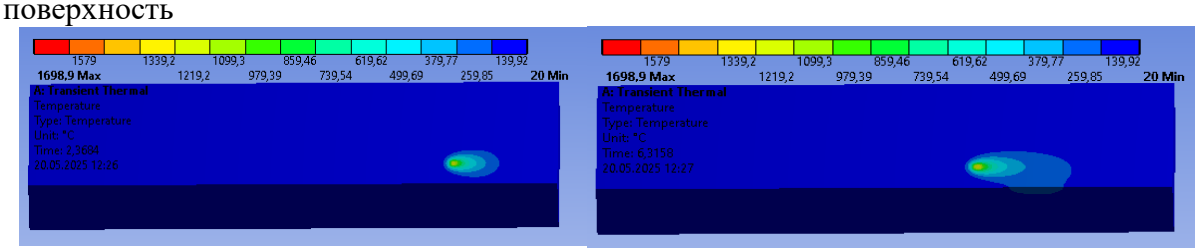
В результате теоретических исследований модели в широком диапазоне параметров было получено решение задачи нестационарной теплопроводности. Некоторые результаты численного расчета температур приведены на рис. 3–6.

поверхность

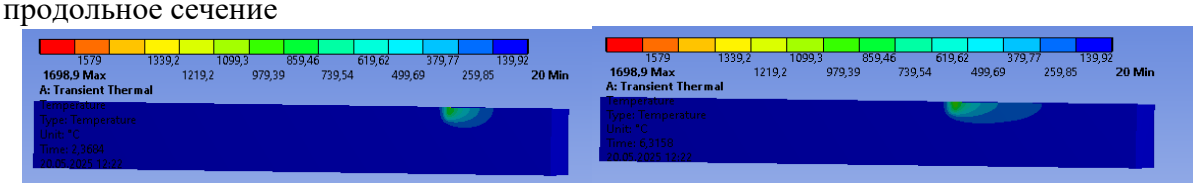


а) t=2,37 с б) t=6,32 с

поверхность



продольное сечение



в) t=2,37 с г) t=6,32 с

Рис.3. Характерное распределение температурного поля (°*C*) на поверхности модели и в продольном сечении вдоль ось движения пятна в различные моменты времени при *v*=600 *мм/мин*; а, б – r_H = 2 *мм,* в, г – r_H =1 *мм*

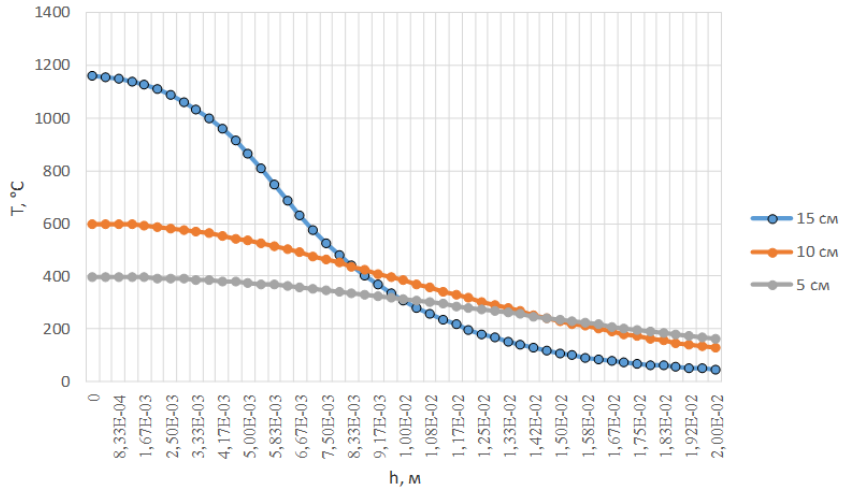


Рис. 4. Зависимость температуры от глубины в точках с различными координатами в момент времени t=15 с, *v*=600 *мм/мин*, r_H = 2 *мм*

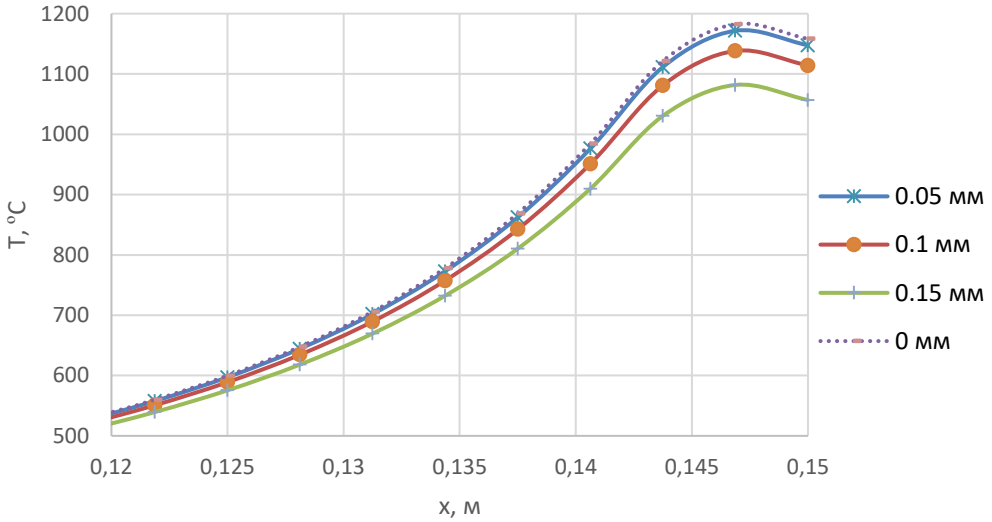


Рис. 5. Зависимость температуры от координаты вдоль траектории движения центра пятна нагрева на различных расстояниях от поверхности обработки, *v*=600 *мм/мин*, r_H = 2 *мм*

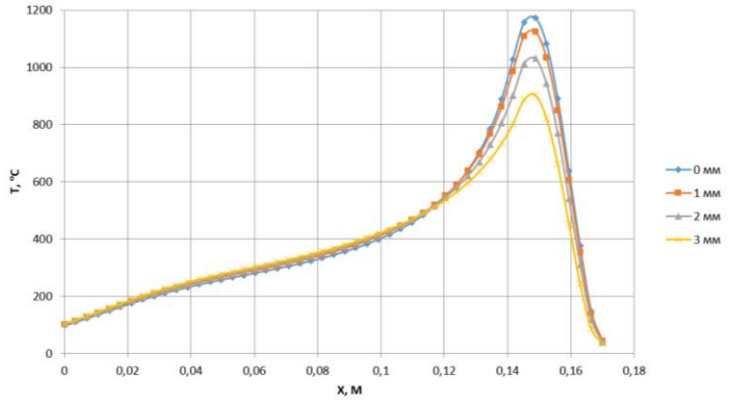


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры на поверхности от координаты для различных линий, параллельных траектории движения центра пятна при t=15 с, *v*=600 *мм/мин*, r_H = 2 *мм*

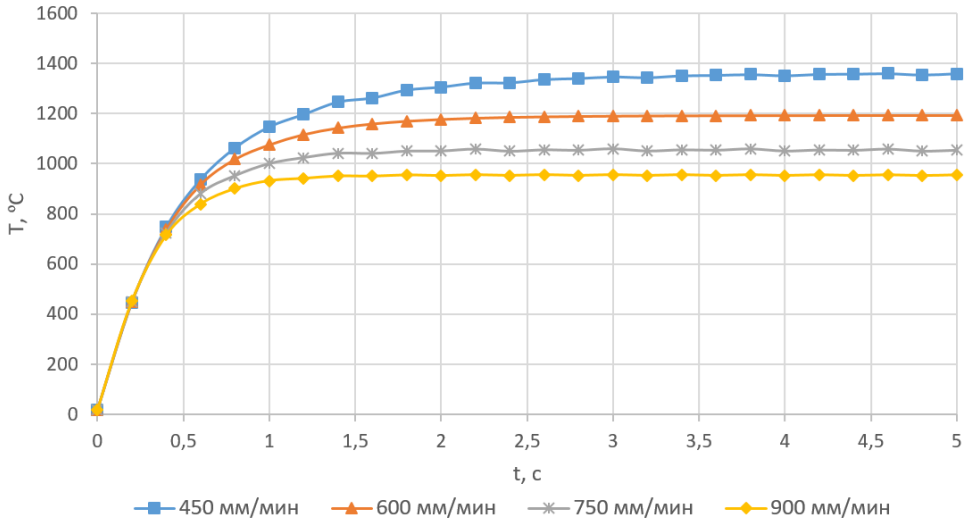


Рис. 7. Зависимость максимальной температуры на поверхности от времени для различных скоростей движения пятна нагрева, r_H = 2 *мм*

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, а также с использованием разработанной программы на языке *FORTRAN*, позволяющей исследовать температурное поле в зоне термического влияния при действии движущегося нормально-кругового источника тепла. При составлении программы принято, что изменение структуры материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, поэтому в качестве объекта теплового нагружения рассматривается полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи теплопроводности и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла. Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами x_0, y_0, z_0, температурное поле в любой точке тела в заданный момент времени описывается выражением

$$T(r,t)=\frac{Q}{8\lambda\sqrt{a}(\pi t)^{3/2}}\exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \qquad (5)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, *Дж*; $a = \lambda/(C_P\,\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $м^2/с$; ρ – плотность материала, $кг/м^3$; t – время, *с*; $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки с координатами *x*, *y*, *z*, *м*. В формуле (5) T представляет собой приращение температуры над ее исходным уровнем [15].

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (5) в пределах этой поверхности *S*:

$$T_S(r,t) = \int \left(\int T(r,t)\, ds \right) d\xi, \tag{6}$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения ξ = 0.

В случае движения с постоянной скоростью *v* вдоль оси *Ox* источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока выражение (2) примет вид [15]:

$$T(x,y,z,t) = \left[2P \exp\left(-\frac{vx}{a} \right) \left(c\gamma (4\pi a)^{3/2} \right) \right] \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0+\xi)} \times$$
$$\times \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0+\xi)} - \frac{V^2(t_0+\xi)}{4a} \right] d\xi. \tag{7}$$

Для экспериментального определения температурного поля на поверхности материала в зоне действия лазерного луча применялся компьютеризированный высокотемпературный трехзональный тепловизор ИТ-3СМ.

На рис. 8 приведен типичный график теоретических и экспериментальных значений температур на поверхности образца.

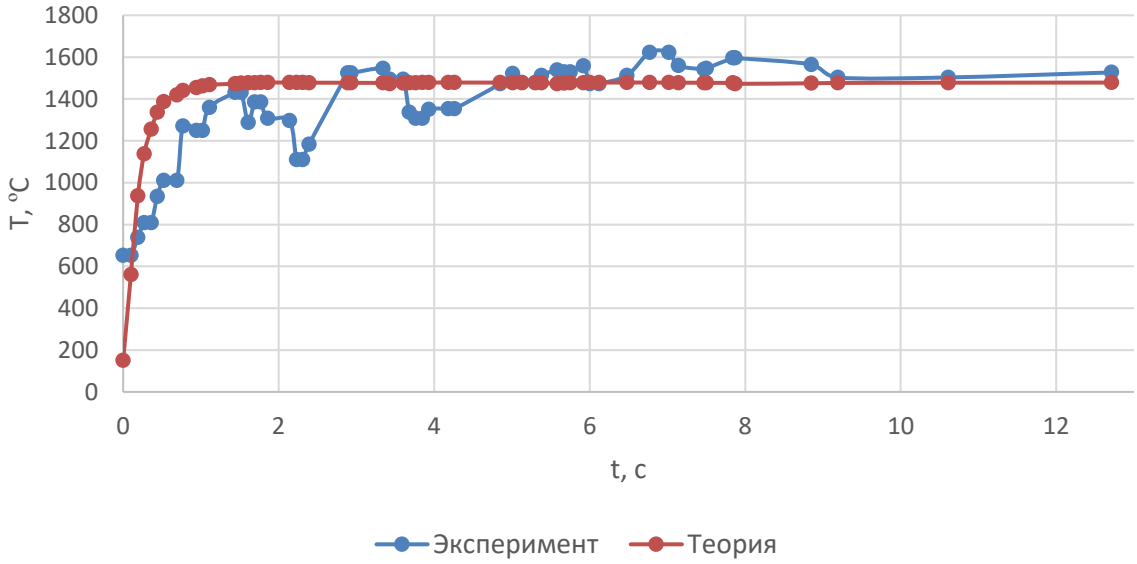


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры от времени на поверхности образца, *v*=600 *мм/мин*, r_H = 1,5 *мм*

Обсуждение

Проведено компьютерное моделирование лазерной закалки стальных образцов. Выполнен расчет индуцированного лазерным излучением температурного поля в зоне термического влияния. Исследовано влияние основных технологических параметров процесса обработки на

распределение полей температур в зоне теплового воздействия лазерного луча.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение.

Заключение

Следует отметить, что число зон теплового нагружения можно увеличить, что позволит рассматривать температурные поля, соответствующие одновременной работе нескольких источников энергии. Не представляет принципиальной сложности задать в расчетах какую-либо криволинейную или прерывистую траекторию движения пятна нагрева. Подобные задачи могут оказаться полезными с практической точки зрения.

С использованием результатов исследований на основе данных по техническим характеристикам лазера, теплофизическим и механическим свойствам обрабатываемого материала и их прогнозируемым после теплового воздействия структурным параметрам могут быть назначены конкретные режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов. Результаты теплового анализа могут использоваться при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки. Кроме того, полученные результаты нестационарного температурного анализа могут быть использованы для определения оптимальных режимов работы и лазера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

[2] Веремейчик, А.И., Нерода, М.В. Моделирование процесса лазерной закалки в ANSYS Workbench // Актуальные вопросы машиноведения. – 2021. – Вып. 10. – С. 22–26.

[3] Rezayat, M.; Karamimoghadam, M.; Moradi, M.; Casalino, G.; Roa Rovira, J.J.; Mateo, A. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. Metals 2023, 13, 1268. https://doi.org/10.3390/met13071268.

[4] Веремейчик, А.И., Холодарь, Б.Г. Исследование температурного поля при лазерном упрочнении сталей // Механики XXI веку. – № 24. – 2025. – С. 301–309.

[5] Морозов, Е.А. Исследование влияния параметров лазерной термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей :

диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.06 / Морозов Евгений Александрович; [Место защиты: ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет]. – Пермь, 2019. – 110 с. : ил.
[6] Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Solomonov K.N., Snitko S.A., Chicheneva O.N. Investigation of changes in temperature of pressing tool during laser processing. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024;67(2):155–160. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-16
[7] Evgrafov, A., Khisamov, A., Egorova, O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg state polytechnical university. Mechanisms and Machine Science, 2014, 19, pp. 239–247.
[8] Девойно, О.Г. Жарский В.В., Пилипчук А.П. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443.
[9] Orazi L. et al. // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256 (6). P.1913−1919. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.10.037
[10] Закалка крупногабаритных деталей с использованием сканирующего излучения оптоволоконного лазера с программным изменением мощности / О. Г. Девойно [и др.] // Фотоника. – Т. 13. – № 6. – 2019. – С. 524-530. DOI: 10.22184/1993-7296.
[11] Elena Naprimerova, Igor Yachikov, Yuliya Latfulina, Marina Samodurova, Evgeny Trofimov, Sergey Lezhnev, Sergey Efremov, Evgeniy Panin. Mathematical Modelling of Non-stationary Thermal State of the Processed Metal During Its Laser Hardening // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 60, 1, 2025, 121–129.
[12] Моделирование температурных полей в стали DP1000 при лазерной обработке с использованием дифракционных оптических элементов / Р. Биелак, С. П. Мурзин, Г. Лидль, А. Отто, Н. Л. Казанский // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020) : сб. тр. по материалам VI Междунар. конф. и молодеж. шк. (г. Самара, 26-29 мая) : в 4 т. - Тек / М-во науки и образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т), Ин-т систем обраб. изобр. РАН - фил. ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН. – 2020. – Т. 1. – С. 385-392.
[13] Ishkinyaev, E.D., Khriptovich, E.V., Voronov, V.D. et al. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser Processing. Phys. Atom. Nuclei 85, 2092–2098 (2022). https://doi.org/10.1134/S1063778822100210
[14] Ишкиняев Э.Д., Хриптович Е.В., Воронов В.Д., Петровский В.Н., Шиганов И.Н. Определение размеров зоны упрочнения по

температурным полям в процессе лазерной обработки. Ядерная физика и инжиниринг. 2023;14(3):289-295. https://doi.org/10.56304/S2079562922050190.
[15] Веремейчик, А.И., Холодарь, Б.Г. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330. https://doi.org/10.29 235/1561- 8358-2023-68-4-318-330.
[16] Bailey N.S., Tan W., Shin Y.C. // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 203 (14). P. 2003−2012. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039.

A.I.Verameichyk

SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD DURING LASER HARDENING OF STEELS

Brest State Technical University, Belarus

Abstract

The paper presents a computer simulation of laser hardening of steel samples using the *ANSYS Workbench* computing system. The calculation of the temperature field induced by laser radiation is performed. The influence of the main technological parameters of the processing process (radiation power, laser spot radius, spot speed) on the distribution of temperature fields in the zone of thermal influence is investigated.

Key words: laser, quenching, temperature field, spot, velocity.

REFERENCES

[1] Grigor'yanc, A.G., SHiganov, I.N., Misyurov, A.I. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki. – M. : MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 664 s. (rus.)
[2] Veremejchik, A.I., Neroda, M.V. Modelirovanie processa lazernoj zakalki v ANSYS Workbench // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – 2021. – Vyp. 10. – S. 22–26. (rus.)
[3] Rezayat, M.; Karamimoghadam, M.; Moradi, M.; Casalino, G.; Roa Rovira, J.J.; Mateo, A. Overview of Surface Modification Strategies for Improving the Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. Metals 2023, 13, 1268. https://doi.org/10.3390/met13071268.

[4] Veremejchik, A.I., Holodar', B.G. Issledovanie temperaturnogo polya pri lazernom uprochnenii stalej // Mekhaniki XXI veku. – № 24. – 2025. – S. 301–309. (rus.)
[5] Morozov, E.A. Issledovanie vliyaniya parametrov lazernoj termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva poroshkovyh stalej : dissertaciya ... kandidata tekhnicheskih nauk : 05.16.06 / Morozov Evgenij Aleksandrovich; [Mesto zashchity: FGBOU VO Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politekhnicheskij universitet]. – Perm', 2019. – 110 s. : il. (rus.)
[6] Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Solomonov K.N., Snitko S.A., Chicheneva O.N. Investigation of changes in temperature of pressing tool during laser processing. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024;67(2):155–160. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-155-16
[7] Evgrafov, A., Khisamov, A., Egorova, O. Experience of modernization of the curriculum TMM in St. Petersburg state polytechnical university. Mechanisms and Machine Science, 2014, 19, pp. 239–247.
[8] Devojno, O.G. ZHarskij V.V., Pilipchuk A.P. Modelirovanie poverhnostnoj zakalki s ispol'zovaniem skaniruyushchego optovolokonnogo lazera // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2018. – T. 63, № 4. – S. 435–443. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443. (rus.)
[9] Orazi L. et al. // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256 (6). P.1913−1919. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.10.037
[10] Zakalka krupnogabaritnyh detalej s ispol'zovaniem skaniruyushchego izlucheniya optovolokonnogo lazera s programmnym izmeneniem moshchnosti / O. G. Devojno [i dr.] // Fotonika. – T. 13. – № 6. – 2019. – S. 524-530. DOI: 10.22184/1993-7296. (rus.)
[11] Elena Naprimerova, Igor Yachikov, Yuliya Latfulina, Marina Samodurova, Evgeny Trofimov, Sergey Lezhnev, Sergey Efremov, Evgeniy Panin. Mathematical Modelling of Non-stationary Thermal State of the Processed Metal During Its Laser Hardening // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 60, 1, 2025, 121–129.
[12] Modelirovanie temperaturnyh polej v stali DP1000 pri lazernoj obrabotke s ispol'zovaniem difrakcionnyh opticheskih elementov / R. Bielak, S. P. Murzin, G. Lidl', A. Otto, N. L. Kazanskij // Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2020) : sb. tr. po materialam VI Mezhdunar. konf. i molodezh. shk. (g. Samara, 26-29 maya) : v 4 t. - Tek / M-vo nauki i obrazovaniya Ros. Federacii, Samar. nac. issled. un-t im. S. P. Koroleva (Samar. un-t), In-t sistem obrab. izobr. RAN - fil. FNIC "Kristallografiya i fotonika" RAN. – 2020. – T. 1. – S. 385-392. (rus.)
[13] Ishkinyaev, E.D., Khriptovich, E.V., Voronov, V.D. et al. Determining the Size of the Hardening Zone by Temperature Fields during Laser

Processing. Phys. Atom. Nuclei 85, 2092–2098 (2022). https://doi.org/10.1134/S1063778822100210
[14] Ishkinyaev E.D., Hriptovich E.V., Voronov V.D., Petrovskij V.N., SHiganov I.N. Opredelenie razmerov zony uprochneniya po temperaturnym polyam v processe lazernoj obrabotki. YAdernaya fizika i inzhiniring. 2023;14(3):289-295. https://doi.org/10.56304/S2079562922050190. (rus.)
[15] Veremejchik, A.I. Holodar', B.G. Modelirovanie teplovyh processov v poluprostranstve pri nagreve dvizhushchimsya istochnikom s ravnomerno-raspredelennym teplovym potokom // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2023. – T. 68, № 4. – S. 318–330. https://doi.org/10.29 235/1561- 8358-2023-68-4-318-330.
[16] Bailey N.S., Tan W., Shin Y.C. // Surf. Coat. Technol. 2009. V. 203 (14). P. 2003−2012. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.039.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А
Абрамчук М.В., 141
Аксенов Л.Б., 809
Аль-Аражи Х.М., 403
Альвардт М.Я., 403
Ананьевский М.С., 3, 141
Андриенко П.А., 18
Арсентьева К.С., 940
Ассад А., 414

Б
Бадиков К.А., 978
Баласанян В.В., 315
Башкарев А.Я., 355, 824
Белова С.Б., 847
Бельский С.Е., 897
Беляев А.К., 127
Блинковский А.М., 33
Бордюгов Д.В., 422
Брискин Е.С., 422
Брянский А.А., 552
Буляница А.Л., 836

В
Васильев О.С., 751, 780
Веремейчик А.И., 1033
Волков А.Н., 517, 537, 552
Волосова М.А., 372

Г
Галяутдинова А.Р., 127
Гасюк Д.П., 697
Грачев А.А., 614
Григоров А.М., 163, 174
Григорьева Е.Д., 661
Гринек А.В., 704
Гусейнов К.М., 552

Д
Давыденко Л.В., 847
Дамаскинская Е.Е., 882
Деева Е.Г., 697
Демидов Н.Н., 327, 341
Добрецов Р.Ю., 327, 341
Дударенко Н.А., 163, 174

Е
Евграфов А.Н., 18, 55, 290
Евсиков А.А., 432
Евстрапов А.А., 836
Егоров Е.Н., 847
Егорова Ю.Б., 847
Ежова Н.В., 45
Ермаков С.П., 1011
Ерофеев М.А., 447
Есикова Н.А., 836

Ж
Жачкин С.Ю., 988
Жога В.В., 460

З
Закатов В.В., 471
Зиновьева Т.В., 127

И
Иванов И.О., 141
Иванова Г.В., 389
Иванова Л.А., 45
Исполов Е.М., 280

К
Калапышина И.И., 605
Каразин В.И., 290
Керпелева С.Ю., 141
Киселев Р.М., 151
Клиновицкий А.Д., 3
Ковалев А.А., 770
Ковалев П.В., 18, 115
Козликин Д.П., 18
Коковин В.А., 432
Красильников А.А., 327, 341
Крыжевич Г.Б., 999
Куатхина Д.Б., 955
Кудрявцев В.Н., 719
Кузнецов А.О., 447

Кузнецов П.А., 911
Кузнецова Е.В., 872
Кузьмичев И.С., 922
Кункин С.Н., 809
Куома Е.О., 389
Курмышева А.Ю., 872
Кутьин А.Ю., 859

Л
Лагунова М.В., 45
Лазарев Ю.Г., 824
Ларюшкин П.А., 280
Лебедев А.И., 978
Лебедева В.Ю., 355, 824
Леонов А.П., 432
Лепетан К.В., 911
Лопатов М.Г., 737
Люминарский И.Е., 315
Люминарский С.Е., 315
Лян Юаньцзе, 796

М
Мамутов В.С., 940
Манжула К.П., 675
Маркова Т.В., 33
Мелешкин Я.Р., 372, 872
Мельников В.Г., 163, 174
Митрофанов А.П., 372
Михайлов С.В., 796
Мишарев Д.С., 389
Мохова Н.А., 115
Мусалимов В.М., 447, 859

Н
Насонов М.Ю., 174
Наумкин Н.И., 71
Нелюбова А.В., 460
Нефедьев Е.Ю., 882
Никитин С.В., 575

П
Падалка М.А., 591
Парамонова В.А., 719
Перечесова А.Д., 605
Петров Г.Н., 55
Пищов, М.Н., 897
Платонова А.С., 809
Полищук М.Н., 471, 485
Поляков Н.А., 189
Помпеев К.П., 751, 780, 1011, 1021
Попов А.Н., 471, 485
Просторова А.О., 911, 940
Пьяе П.А., 751

Р
Радкевич М.М., 922
Рамос-Веласкес А., 780
Резепова И.В., 71
Решетов Д.В., 471, 485
Рогов Н.В., 770
Рудской А.И., 355

С
Савкин А.Н., 978
Седакова Е.Б., 447
Седов А.А., 978
Семенов А.Г., 327, 341
Сергушин П.А., 605
Сериков С.А., 414
Серов К.Н., 341
Ситкин Д С., 85
Скотникова М.А., 389
Скрябнев А.Ю., 33, 85
Смирнов А.С., 206, 221
Смольников Б.А., 206
Снетков Д.А., 221
Соколов С.А., 614
Солодилова Н.А., 33
Стариков А.Н., 234
Стояновский Л.О., 882
Струневич Д.В., 872
Сульдин С.П., 71
Суханов А.А., 247
Сытин А.Н., 432

Т
Теплухин В.Г., 94, 911
Терешин В.А., 290
Тимофеев М.К., 1021
Тимофеев С.П., 704
Тимофеева О.С., 737
Ткаченко М.Н., 780

Третьяков В.М., 628, 645
Третьяков В.П., 911, 940
Третьяков Д.А., 955
Трифонов Г.И., 988

У
Ушаков В.А., 661

Ф
Федоров С.В., 372
Филиппенко Г.В., 267
Фролов Д.И., 882

Х
Хисамов А.В., 302
Хлебосолов И.О., 290, 302
Хрестина А.А., 280

Ц
Цветкова Г.В., 389

Ч
Чеканин А.В., 502
Чеканин В.А., 502
Чжан Цзиннянь, 517, 537
Чулкин С.Г., 189

Ш
Шабалин Д.Н., 796
Шабанов Д.В., 552
Шаронов Н.Г., 422
Ши Шуанюань, 537, 796
Шлепетинский А.Ю., 675

Щ
Щеглов Д.К., 591
Щербакова Л.В., 859

Я
Янь Чуаньчао, 517, 537, 796
Ярошенко И.С., 108

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ 2025

Материалы 14-й Международной научной конференции

18 июня 2025 года

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 30.05.2025. Формат 60×90/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 66,5. Тираж 100. Заказ 2656.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного научными редакторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.