ISSN 2223-0807

Научные редакторы
А. Евграфов, А. Попович

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ

МАТЕРИАЛЫ
11-й МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ 2022

Материалы 11-й Международной
научной конференции

23 июня 2022 года

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2022

УДК 378.1:621.01

Современное машиностроение: наука и образование 2022 : материалы 11-й Международной научной конференции, 23 июня 2022 г. / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 526 с.

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

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

© Евграфов А. Н., Попович А. А., научное редактирование, 2022
© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022

ISSN 2223-0807
doi:10.18720/SPBPU/2/id22-39

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

PETER THE GREAT
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

MODERN MECHANICAL ENGINEERING: SCIENCE AND EDUCATION 2022

Proceedings of an 11th International Scientific Conference

Russia, June 23, 2022

POLYTECH-PRESS
Peter the Great
St.Petersburg Polytechnic
University

Saint Petersburg
2022

Modern Mechanical Engineering: Science and Education 2022 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference, Russia, June 23, 2022 / edited by A. N. Evgrafov and A. A. Popovich. – St. Petersburg : POLYTECH-PRESS, 2022. – 526 p.

The collection contains materials reflecting the experience of different universities in training bachelors, specialists and masters in mechanical engineering. Particular attention is paid to the reflection in curricula and programs of academic disciplines of the requirements imposed by modern mechanical engineering to the level of training of university graduates. 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, 2022
© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2022

ISSN 2223-0807
doi:10.18720/SPBPU/2/id22-39

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. А.А. Попович, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия (председатель);
- Проф. А.Н. Евграфов, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия (сопредседатель);
- Проф. Д.П. Гасюк, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
- Проф. В. Д. Златанов, Университет Хранительных Технологий, г. Пловдив, Болгария;
- Проф. Н. Казаков – к.н., доцент, Технически Университет, Машиностроителен факултет, София, Болгария;
- Проф. В.И. Каразин, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. М.С. Кокорин, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. С.А. Любомудров, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. К.П. Манжула, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. О.Н. Мацко, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. М.М. Радкевич, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. Я. Райчик – 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. М.А. Скотникова, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия;
- Проф. В.Е. Старжинский, Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь.

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.

Тематика конференции:

1. Технологии преподавания;
2. Механика машин;
3. Детали машин. Проектирование, моделирование и надежность трибосистем;
4. Мехатроника и робототехника;
5. Транспортные и технологические системы;
6. Технология машиностроения;
7. Технология конструкционных материалов и материаловедение.

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

Арсентьева К. С.
Компетентностно-деятельностный подход в преподавании специальных дисциплин технической направленности..... 3

Гасюк Д.П., Косова В.А.
Проведение занятий в активной форме при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений..... 18

Добрецов Р.Ю.
Гибридные технологии обучения в магистратуре: проектирование мобильных энергетических платформ …… 29

МЕХАНИКА МАШИН. ……. 41

Андриенко П. А., Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Семенов Ю.А., Семенова Н.С.
Использование элементов теории графов для структурного анализа механизмов 43

Андриенко П.А., Каразин В.И., Козликин Д.П., Терешин В.А., Хисамов А.В., Хлебосолов И.О.
Исследование и моделирование стенда знакопеременных линейных ускорений ……. 59

Куц Е. Н., Пожбелко В.И.
Новый метод структурного синтеза многоконтурных рычажных механизмов со сложными шарнирами ……. 71

Евграфов А.Н., Петров Г.Н., Терешин В.А.
Использование дополнительных входов рычажных механизмов при приближении к особым положениям ……..... 82

Пожбелко В.И.
Универсальный алгоритм синтеза структурных схем сложных одноподвижных и многоподвижных рычажных механизмов …… 91

Семенов Ю.А., Семенова Н.С.
Определение динамических ошибок рычажного механизма с упругими звеньями …… 101

Смирнов А.С., Смольников Б.А.
Колебания двойного математического маятника с внутренним трением 113

Евграфов А.Н., Козликин Д.П., Петров Г.Н., Терешин В.А., Андриенко П.А.
Движение сверхманевренного самолета в плоском штопоре ……. 126

Третьяков В.М.
Матричный метод структурного анализа и синтеза механизмов 137

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ……..... 151

Егоров И.М.
Моделирование влияния погрешностей процесса зубофрезерования на точность нарезаемого зубчатого колеса 153

Елисеев К. В., Махнов В.Ю.
Анализ вероятности аварии, вызванной разрушением рабочей лопатки паровой турбины ……. 162

Нефедьев Е. Ю., Стояновский Л. О.
Применение машинного обучения для выявления дефектов методом акустической эмиссии при сварке конструкций ответственного назначения …… 173

Платовских М.Ю., Чернышева Н. В.
Исследование фрикционных автоколебаний в двухмассовой системе … 185

Сюндюков И.С., Рябикин А.Ю., Иванова Г.В., Скотникова М.А.
Повышение износостойкости коленчатых валов методом плазменного напыления 196

Филиппенко Г.В., Зиновьева Т.В.
Неосесимметричные колебания газопровода, ослабленного водородной коррозией, на основе модели неоднородной оболочки 210

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА 223

Гусев В. В.
Использование нерасплавленного порошка в LPBF 225

Попов А.Н., Полищук М.Н., Решетов Д.В.
Пневматический ускоритель мехатронного ударного стенда 232

Чеканин В.А., Чеканин А.В.
Исследование методов формирования ортогональных многогранников для компоновки объектов сложной формы 248

ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ 261

Манжула К.П., Шлепетинский А.Ю.
Расчетные зависимости для определения теоретических коэффициентов концентрации напряжений в тавровом сварном соединении 263

Мансырев Э.И., Емельянов А.В., Зотов О.Г.
Исследование усталостной чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору отожженной меди М3Р 281

Мельникова Н.Б., Кудряшов Е.В.
Спектральный анализ и фильтрация контактного нажатия при взаимодействии пантографа и контактной подвески высокоскоростной железнодорожной магистрали 294

Никитин С.В. Бортяков Д.Е., Грачев А.А.
Метод оптимизации конструкции ножничного подъемника 310

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ …… 329

Васильев А.А.
Влияние конструктивного исполнения вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на технологические параметры токарной обработки крупногабаритных валов …….. 331

Гасюк Д.П., Косова В.А.
Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях ….. 341

Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Былов Б.Б., Белова С.Б.
Прогнозирование и сопоставление механических свойств и обрабатываемости резанием титанового сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой структурами 355

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ …….. 369

Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Потапов Н.М.
Торцевая раскатка тонкостенных внутренних фланцев с использованием фиксированной и подвижной матриц 371

Арслан Х., Коротких М.Т.
Методика оптимизации зажимных устройств на основе материалов с памятью формы …… 385

Арышенский Е.В., Арышенский В.Ю., Рагазин А.А.
Исследование влияние режимов термомеханической обработки на механизмы зародышеобразования и формировании текстуры в сплаве 1565ч ……... 397

Кутьин А. Ю.
Динамика взаимодействия элементов системы управления плотностью композитной намотки …… 415

Арсентьева К.С., Калатозишвили И.В., Мамутов В.С.
Влияние податливости заготовки на давление в разрядной камере при электрогидроимпульсной штамповке …… 429

Мохоров Д.Д., Денисова Ю.Ю., Ищук Д.Л., Фогель А.А.,
Новомлинский М.О., Кочемировская С.В., Кочемировский В.А.
Лазерный синтез наноматериалов на стеклообразных и стеклокристаллических подложках …… 441

Попов А. И., Строшков Д.А., Строшков К.А., Пилькевич Д.Н., Фомин Д.С.,
Яковицкая М.В., Радкевич М.М.
Особенности обработки медицинских инструментов, полученных методом селективного лазерного сплавления …….. 461

Радкевич М.М.
Влияние ПМТО на деформационную способность, склонность к хрупкому разрушению и устойчивость структуры изделий ……... 478

Теплухин В.Г., Попов А.И., Фомин Д.С., Радкевич М.М.
Особенности исследования сталей с метастабильной аустенитной структурой …… 489

Кузнецов П.А., Кузнецов Р.В., Просторова А.О., Третьяков В.П.
Технология формования биметаллических изделий со спеченными вкладышами ……. 501

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ …… 512

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕПОДАВАНИЯ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 378.147

К. С. Арсентьева

КОМПЕТЕНТНОСТНО-ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД В ПРЕПОДАВАНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН ТЕХНИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Ксения Сергеевна Арсентьева,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: xenia.ars@gmail.com

Аннотация

Данная статья посвящена исследованию эффективности применения элементов интерактивного обучения и компетентностно-деятельностного подхода для развития профессиональных компетенций бакалавров по направлению обучения «Машиностроение» в группах с многонациональным составом. Результаты показали значительный прирост в эффективности усвоения теоретического материала и способности применять знания на практике. Применение предлагаемых методик способствовало формированию сплоченного и активного коллектива за счет увеличения практико-ориентированной совместной работы.

Ключевые слова: интерактивное обучение, специальные дисциплины, компетентностный подход, деятельностный подход, профессиональные компетенции.

Введение

В современной образовательной среде наблюдаются тенденции к падению активности обучающихся на занятиях, что в свою очередь ведет к снижению усвоения нового материала и ухудшению способности применять полученные знания на практике. Особенно подобная тенденция к снижению прослеживается при использовании дистанционных форм обучения.

Для того, чтобы повысить профессиональную компетентность обучающихся, в частности продуктивность выполнения профессиональных задач, а также стимулировать инженерное творчество, предлагается в образовательном процессе использовать элементы интерактивных методов обучения и компетентностно-деятельностного подхода, в том числе при переходе на дистанционную форму обучения. Подобный подход исследовался рядом отечественных [1-5] и зарубежных ученых [6-12]. Рядом преподавателей успешно применяются элементы интерактивного обучения и для изучения технических наук [13-15].

Коллективом МППУ [16] была предложена следующая модель профессиональной компетенции, которая включает 5 связанных компетентностей:

1. Когнитивная компетентность (формальные знания, знания, основанные на личном опыте и понимании (знают – почему));
2. Функциональная компетентность (технологические навыки, что человек, работающий в данной области должен быть в состоянии сделать и способен продемонстрировать);
3. Личностная компетентность (набор относительно устойчивых характеристик личности, связанных с эффективным выполнением работы);
4. Социокультурная компетентность (формирование личного мнения, социальных и профессиональных ценностей, а также способность принимать основанные на них решения в конкретных рабочих ситуациях);
5. Метакомпетентность (интегральное свойство социального поведения, к которой относятся способности общения, способности справляться с неуверенностью, с критикой и т.д.).

Для взращивания в образовательном учреждении профессионала, способного к эффективной трудовой деятельности, с развитыми организаторскими и ситуационными навыками, а также необходимым уровнем социализации для слаженной работы в коллективе, все компетенции необходимо развивать комплексно. Использование традиционных форм обучения для этих целей недостаточно, а потому необходимо применить деятельностный подход с соблюдением следующих дидактических принципов:

1. Принцип деятельности предполагает отказ от передачи обучающимся всех знаний в готовом виде, что способствует самостоятельной работе, поиску и применению информации.
2. Принцип психологической комфортности подразумевает создание доброжелательной атмосферы обучения и развитие коммуникативной компетентности.
3. Принцип вариативности предполагает, что у поставленных перед обучающимся задач нет единственно верного решения, и способствует поиску оптимальных решений.

4. Принцип творчества означает, что для решения поставленной задачи можно использовать как существующие методики, так и предложить собственные с соответствующим обоснованием.

Целью данного исследования стало изучение эффективности использования в образовательном процессе элементов интерактивного обучения и компетентностно-деятельностного подхода при изучении дисциплины «Технология листовой штамповки».

Задачи:

1. Провести исследование уровня развития профессиональных компетенций в группах бакалавров с многонациональным составом.
2. Провести формирующий эксперимент по развитию профессиональных, в том числе коммуникативных компетенций обучающихся на занятиях по дисциплине «Технология листовой штамповки» с применением элементов интерактивного обучения и компетентностно-деятельностного подхода.
3. Провести сравнительную диагностику уровня развития профессиональных компетенций двух групп обучающихся, экспериментальной и контрольной, после проведения формирующего эксперимента.

Методы

Методы исследования: теоретические – анализ психолого-педагогической литературы; эмпирические – наблюдение, тестирование, анализ результатов деятельности; методы обработки результатов - качественный и количественный анализ.

Применяемые методики:

1. Методика диагностики межличностных отношений Т. Лири (метакомпетентность и личностная компетентность).
2. Пакет тестовых заданий, контрольных вопросов для определения уровня усвоения теоретического материала (когнитивная компетентность).
3. Пакет задач для определения уровня понимания и способности применения полученных знаний на практике (функциональная и социокультурная компетентности).

Исследование проводилось в рамках преподавания дисциплины «Технология листовой штамповки» для бакалавров по направлению подготовки 15.03.01 «Машиностроение». Для эксперимента было отобрано две группы бакалавров 4 года обучения.

Первая группа бакалавров – контрольная – состояла из 17 человек, включая иностранцев (2 человека). Обучение происходило в осеннем

семестре 2020–2021 года, сначала в очном формате (сентябрь – октябрь), затем в дистанционном формате (ноябрь – декабрь).

На этапе формирующего эксперимента занятия в группе проводились в традиционной форме, с четким разделением на лекционные и практические часы. В конце каждого лекционного занятия проводилась оценка усвоенного материала с помощью контрольных вопросов. На практических занятиях при помощи тематических задач разного уровня сложности оценивалась способность применять полученные знания.

Вторая группа бакалавров – экспериментальная – состояла из 21 человека, включая иностранцев (4 человека). Обучение происходило в осеннем семестре 2021–2022 года, сначала в очном формате (сентябрь – октябрь), затем в дистанционном формате (ноябрь – декабрь).

На этапе формирующего эксперимента занятия в группе проводились с элементами интерактивных форм обучения, без жестокого разделения на лекционные и практические часы (комплексные занятия). После прохождения определенного объема теоретического материала обучающимся сразу же предлагалось решить несколько тематических задач разного уровня сложности для оценки способности применения полученных знаний. Оценка усвоенного теоретического материала с помощью контрольных вопросов проводилась в конце комплексного занятия.

Для обеих групп проводилась диагностика межличностных отношений в начале и в конце семестра, а также итоговое тестирование по пройденному материалу.

Результаты

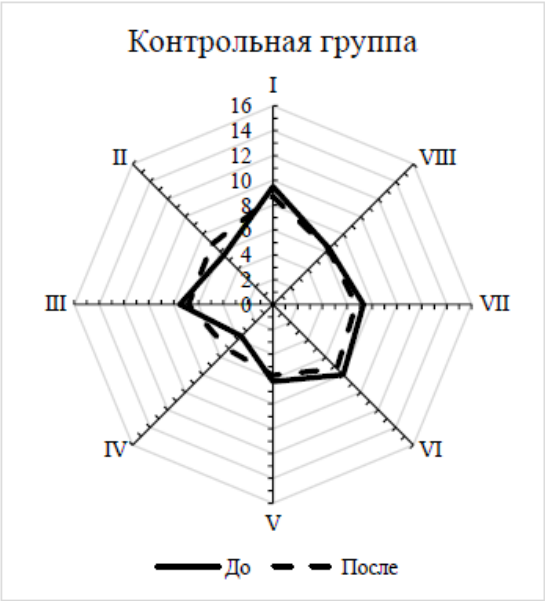
А. Диагностика межличностных отношений (Т. Лири)

Методика диагностики межличностных отношений Т. Лири предназначена для исследования представлений самого человека о себе и его взаимоотношений в малой группе. Из полученных результатов тестирования можно сделать выводы о выраженности типа, о степени адаптированности поведения человека в группе. Обучающимся предлагалось заполнить опросник, состоящий из 128 оценочных суждений, из которых в каждом из 8 типов отношений образуются 16 пунктов, упорядоченных по восходящей интенсивности.

Полученные результаты обрабатывались с целью получения индексов 8 основных характерологических тенденций: авторитарность (I), самодостаточность (II), агрессивность (III), подозрительность (IV), подчиненность (V), зависимость (VI), дружелюбие (VII) и альтруистичность (VIII). Максимальная оценка уровня тенденции – 16. Степень выраженности разделяется на 4 уровня: 0–4 балла – низкий, 5–8

баллов – умеренный (адаптивное поведение), 9–12 баллов – высокий (экстремальное поведение), 13–16 баллов – экстремальный (паталогические отклонения в поведении).

Сравнительные диаграммы изменения характерологических тенденций в контрольной группе (рис. 1) и экспериментальной группе (рис. 2) приведены ниже.



	До	После
(I) Авторитарность	9,5	8,7
(II) Самодостаточность	5,4	6,9
(III) Агрессивность	7,5	6,8
(IV) Подозрительность	3,6	5,1
(V) Подчиненность	6,2	5,7
(VI) Зависимость	8	7,3
(VII) Дружелюбие	7,3	6,7
(VIII) Альтруистичность	6,4	6,3

Рис. 1. Диаграмма изменения средних показателей основных характерологических тенденций в контрольной группе до и после проведения формирующего эксперимента

Как видно из диаграммы на рис. 1, до начала формирующего эксперимента среди бакалавров контрольной группы большинство тенденций находились в зоне умеренных значений. На общем фоне значительно выделялся показатель «Авторитарность» (9,5 баллов). Это свидетельствует о наличии в группе обучающихся с гипертрофированными лидерскими качествами, что без должного развития метакомпетентности и личностной компетентности могло приводить к конфликтным ситуациям. В связи с этим также следует отметить показатель «Агрессивность» (7,5 баллов) который находился у верхней границы умеренного диапазона значений и мог выйти за пределы адаптивного поведения.

Также следует отметить высокий показатель «Зависимости» (8 баллов) и показатель «Самодостаточности», размещавшийся на нижней границе умеренного диапазона (5,4 балла). Подобные значения характеристик в комплексе свидетельствуют о разделении обучающихся группы на «сильных» и «слабых». При обучении данной группы в течение семестра нередко отмечались ситуации, когда «сильные» студенты подавляли «слабых», их варианты решений и способности. Творческий потенциал и способности применять знания на практике «слабых» студентов снижался, и зачастую складывалась ситуация, когда большая

часть группы на занятии оставались пассивными и ждали решения от 2–3 «сильных» студентов.

В конце семестра проводилась повторная диагностика. Следует отметить, что большинство показателей незначительно снизились, и все тенденции остались в диапазоне умеренных показателей. К концу семестра повысились показатели «Подозрительность» и «Самодостаточность» с 3,6 до 5,1 балла и с 5,4 до 6,9 балла соответственно. Можно сказать, что среди участников контрольной группы за время обучения больше выработалось стремление к соперничеству, чем к сотрудничеству. Следовательно, обучение по традиционной схеме малоэффективно для того, чтобы создать оптимальную среду обучения, комфортную для учащихся, и способствовать гармоничному развитию межличностных отношений в коллективе.

	До	После
(I) Авторитарность	7,9	5,4
(II) Самодостаточность	4,9	3,4
(III) Агрессивность	7,1	2,7
(IV) Подозрительность	5,5	2,7
(V) Подчиненность	6,2	2,1
(VI) Зависимость	5,1	2,8
(VII) Дружелюбие	6,2	5,2
(VIII) Альтруистичность	6,8	5,2

Рис. 2. Диаграмма изменения средних показателей основных характерологических тенденций в экспериментальной группе до и после проведения формирующего эксперимента

На рис. 2 представлены результаты диагностики межличностных отношений экспериментальной группы. При первичной диагностике все характерологические тенденции находились в зоне умеренных значений. На фоне других характеристик, так же, как и у контрольной группы, наибольшее количество баллов отмечалось у показателей «Авторитарности» (7,9 балла) и «Агрессивности» (7,1 балла), которые находились на верхней границе диапазона умеренных значений с риском выхода из зоны адаптивного поведения.

После проведения формирующего эксперимента все значения тенденций снизились, оказавшись в зонах умеренной и низкой выраженности. Наибольшее снижение (более чем в два раза) наблюдается у показателя «Агрессивность» (снизился с 7,1 до 2,7 балла). Также

существенно снизились показатели «Подозрительности» (2,7 балла), «Подчиненности» (2,1 балла) и «Зависимости» (2,8 балла). Обучающиеся демонстрировали стабильную и активную работу на занятиях, как самостоятельную, так и в командах.

Показатели «Авторитарность» (5,7 балла), «Дружелюбие» (5,2 балла), и «Альтруистичность» (4,8 балла) по-прежнему имеют наибольшую выраженность на фоне других, но находятся в рамках адаптивного поведения, что свидетельствует об энергичности, склонности к сотрудничеству, отзывчивому отношению к одногруппникам.

В. Диагностика уровня усвоения теоретического материала

Уровень усвоения теоретического материала оценивался при помощи контрольных вопросов по каждой лекции. Всего было проведено 16 промежуточных проверок при помощи контрольных вопросов, 8 из которых пришлось на очный формат обучения и 8 на дистанционный. Кроме того, проводился итоговый тест по всему пройденному материалу в конце семестра.

Была выбрана следующая система оценивания: 100–90% верных ответов – оценка «отлично», 89–70% – оценка «хорошо», 69–50% – оценка «удовлетворительно», менее 50% – оценка «неудовлетворительно». По результатам ответов на контрольные вопросы в конце семестра высчитывалась средняя оценка.

Результаты диагностики уровня усвоения теоретического материала представлены на рис. 3 и 4.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
КВ	2,93	3,94	3,94	3,13	3,06	3,18	3,43	3,88	3,50	3,06	3,56	3,56	3,75	3,88	3,93	3,43	3,38
И	3	5	5	3	3	3	4	5	3	3	3	4	4	4	4	4	3

Рис. 3. Уровень усвоения теоретического материала контрольной группой обучающихся: КВ – средняя оценка по результатам ответов на контрольные вопросы; И – оценка за итоговое тестирование

Как видно из диаграммы на рис. 3 средний уровень усвоения лекционного материала не превышал 89%. Большинству удавалось верно ответить на 50–75% контрольных вопросов. Во время очных занятий показатель держался в пределах 67–85%. При переходе на дистанционный

формат обучения процент верных ответов на контрольные вопросы снизился до 45–60%. Иными словами, ни один из обучающихся в течение семестра не смог ответить на все контрольные вопросы хотя бы по одной теме, а переход на дистанционных формат обучения значительно снизил процент усвоения материала и активность работы студентов. Особенно данная тенденция была выражена у иностранных студентов (номера 1 и 10 на рис. 3). Номера 2, 3 и 8 соответствуют «сильным» студентам, проявлявшим наибольшую активность на практических занятиях. Таким образом им удалось закрепить полученные знания и повысить итоговую оценку на итоговом тестировании.

Результаты итогового тестирования показали снижение усвоенных знаний по дисциплине у подавляющего числа обучающихся.

Также следует отметить, что подавляющее большинство обучающихся не вели конспектов лекций, что вызывало затруднения как при ответах на контрольные вопросы, так и при решении задач на практических занятиях.

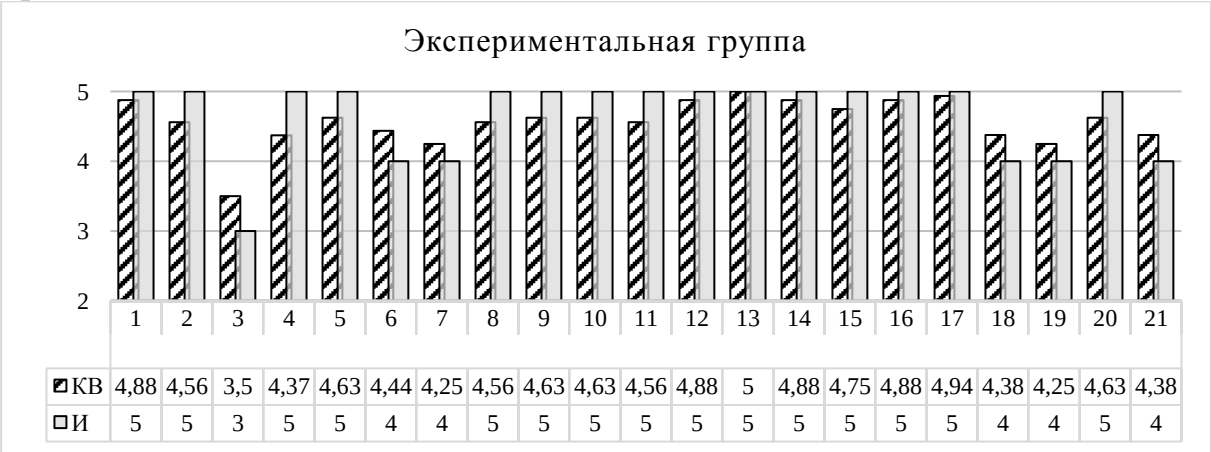


Рис. 4. Уровень усвоения теоретического материала экспериментальной группой обучающихся: КВ – средняя оценка по результатам ответов на контрольные вопросы; И – оценка за финальное экзаменационное тестирование

Экспериментальная группа отвечала на контрольные вопросы после проведения комплексных занятий, т.е. уже после применения теоретических материалов на практике. Такой подход, во-первых, позволял удерживать внимание обучающихся длительное время, поскольку из процесса обучения исключалась монотонность. Во-вторых, стимулировал обучающихся к ведению конспектов, так как пройденный теоретический материал сразу же использовался при решении задач. В-третьих, предоставлял разгрузку для преподавателя, так как не было необходимости долго и много говорить, благодаря перерывам на практику.

Как видно из диаграммы подавляющее большинство обучающихся без каких-либо проблем справились с усвоением теоретического материала. Стоит отметить, что подобный результат не является краткосрочным,

знания остаются со студентами на длительное время, благодаря чему они успешно сдали итоговое тестирование. Исключение составил студент под номером 3, который нерегулярно посещал занятия.

С. Диагностика способности применения полученных знаний на практике

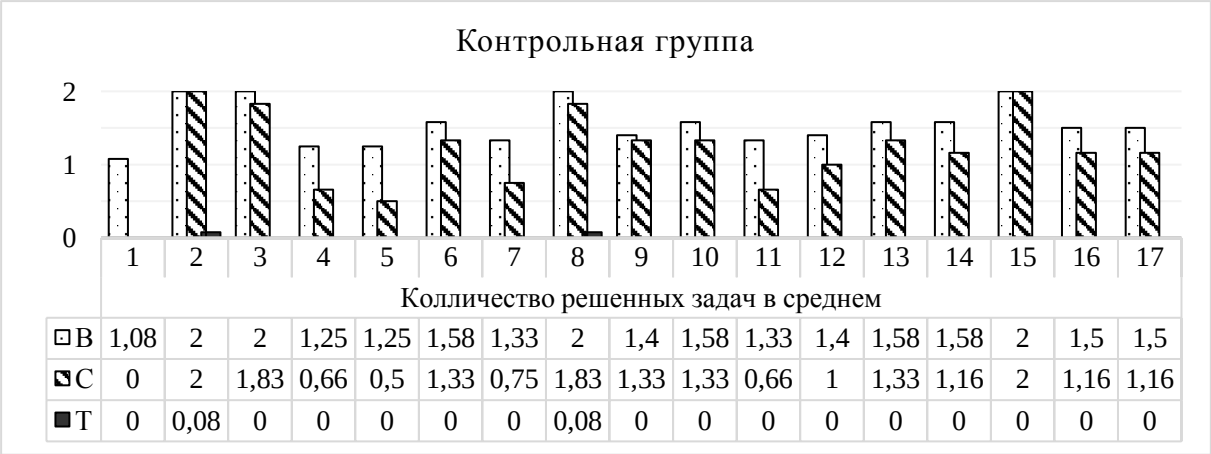
Способность применять полученные знания на практике оценивалась с помощью комплекта задач различного уровня сложности, условно разделенных на базовые, сложные и творческие.

Базовые задачи – такие, которые не требуют поиска дополнительной информации и основываются исключительно на теоретическом материале, полученном на лекционном занятии. Например, нахождение размеров заготовки и полуфабрикатов для детали простой формы, получаемой с помощью одного типа формоизменяющих операций. Для решения таких задач используются выведенные формулы и простейшие методики, подробно описанные на лекциях. Условия базовых задач сопровождались полным комплектом необходимой для решения информации. Всего в рамках курса было подготовлено 32 базовых задачи (по 2 задачи на каждую тему).

Сложные задачи – такие задачи, которые требуют поиска дополнительной информации в ГОСТах или справочниках, применения комбинации простых методик решения. Например, нахождение размеров заготовки и полуфабрикатов для детали сложной формы, получаемой с помощью одного типа формоизменяющих операций. Для решения таких задач может не быть простых выведенных формул. Условия сложных задач сопровождались неполной информацией, необходимой для решения, и требовали работы со вспомогательной литературой. Всего в рамках курса было подготовлено 32 сложных задачи (по 2 задачи на каждую тему).

Творческие задачи – такие, которые требуют дополнительного поиска информации, использования сложных методик решения и/или их комбинации. Например, нахождение размеров заготовки и полуфабрикатов для деталей сложной формы, получаемых с помощью нескольких типов формоизменяющих операций, или деталей, которые можно получить кардинально отличающимися технологиями. Для таких задач существует несколько принципиально различных методик решения, поиск и применение которых требует владения материалом на высоком уровне. Для творческих задач предоставлялось только условие, а всю информацию для решения обучающиеся могли восполнить из задач более простого уровня и дополнительной литературы. Всего в рамках курса было подготовлено 16 творческих задач.

Результаты диагностики применения полученных знаний на практике приведены на рис. 5 и 6.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
B	1,08	2	2	1,25	1,25	1,58	1,33	2	1,4	1,58	1,33	1,4	1,58	1,58	2	1,5	1,5
C	0	2	1,83	0,66	0,5	1,33	0,75	1,83	1,33	1,33	0,66	1	1,33	1,16	2	1,16	1,16
T	0	0,08	0	0	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 5. Успешность решения задач в контрольной группе: Б – базовые задачи; С – сложные задачи; Т – творческие задачи

Обучающиеся контрольной группы в среднем могли справиться с задачами только базового уровня. Зачастую на практических занятиях приходилось заново объяснять только что пройденный на лекции материал, что в свою очередь отнимало время на практике, и на решение и разбор задач более сложного уровня не хватало времени. Из диаграммы видно, что только четверо обучающихся справились со всеми подготовленными базовыми задачами (номера 2, 3, 8 и 15).

Сложные задачи уже вызывали у обучающихся значительные затруднения, так как информация для базового уровня задач усваивалась ими не в полном объеме. На творческие задачи у контрольный группы либо не оставалось времени для решения, либо обучающиеся в принципе не могли представить, как решать подобного рода задачи. За весь семестр только двое обучающихся смогли решить одну творческую задачу.

При переходе на дистанционный формат обучения ситуация только ухудшилась. Более-менее активность сохраняли 4–5 обучающихся, которых условно можно было отнести к категории «сильных» студентов. Остальные присутствовали на дистанционном собрании лишь формально.

Для бакалавров экспериментальной группы (рис. 6) решение базовых задач не вызывало затруднений. Обучающиеся работали быстро и активно, зачастую делясь на команды и одновременно решая сразу пару задач. Такой энтузиазм объяснялся тем, что обучающиеся стремились перейти к задачам более сложного уровня, так как они представляли для них больший интерес. Исключение составлял обучающийся под номером 3, который нерегулярно посещал занятия.

Сложные задачи для обучающихся экспериментальной группы также не вызывали сложностей. Для решения таких задач уже вводился элемент интерактивности, когда обучающимся предлагалось работать в группах сменного состава и искать решение различными методами. В тех случаях,

когда итоговое решение разных групп отличалось, проводился разбор методов, когда обучающиеся доказывали обоснованность именно их метода решения. Конфликтных ситуаций при этом не возникало, обстановка всегда была рабочая и комфортная для всех участников процесса.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Б	2	2	1,8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
С	2	1,8	0	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	2	2	2	1,9	2	2	1,8	1,8	1,9	1,8
Т	1	0,7	0	0,5	0,8	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,5	0,8	1	0,8	0,8	1	1	0,5	0,5	1	0,5

Рис. 6. Успешность решения задач в экспериментальной группе: Б – базовые задачи; С – сложные задачи; Т – творческие задачи

Наибольший интерес контрольной группы вызывали творческие задачи. В тех случаях, когда на решение задачи не хватало времени на занятии, обучающиеся заканчивали работу над ней в рамках домашнего задания, а результаты обсуждали на следующем занятии.

При переходе на дистанционный формат обучения ситуация несколько ухудшилась, в основном из-за того, что подобный формат не предоставлял нужного инструментария для работы в малых группах. Однако большинству обучающихся удалось решить не меньше половины подготовленных творческих задач. Исключение составлял обучающийся под номером 3, который в принципе не посещал занятия после перехода на дистанционный формат обучения.

Обсуждение

Внедрение элементов интерактивного обучения и компетентностно-деятельностный подход в преподавании дисциплины «Технология листовой штамповки» позволил повысить уровни развития когнитивной, функциональной, личностной, социальной и метакомпетентности бакалавров в ситуациях усвоения и применения знаний на практике. Уже через несколько занятий, проведенных с внедрением интерактивных методов и частым дроблением отведенных часов на лекции и практику, экспериментальная группа бакалавров справлялась с материалами и

задачами быстрее и активнее контрольной группы, чье обучение шло в традиционной форме, что свидетельствует об эффективности методики.

Также отмечается улучшение межличностных отношений обучающихся экспериментальной группы, создание более благоприятной психологической атмосферы в коллективе. Обучающиеся демонстрировали взаимное уважение друг к другу и учились научно обосновывать свою точку зрения, что поможет им в будущем успешно функционировать внутри трудового коллектива на промышленных предприятиях.

Наблюдение за работой иностранных обучающихся показало, что в экспериментальной группе они были более включены как в процесс обучения, так и в процесс работы с одногруппниками, лучше справлялись с поставленными задачами, чаще задавали вопросы и предлагали собственное решение. В контрольной группе иностранцы чаще предпочитали работать самостоятельно и обособленно от остальных обучающихся, хуже и реже справлялись с задачами.

Заключение

Применение элементов интерактивного обучения и компетентностно-деятельностного подхода при преподавании дисциплины «Технология листовой штамповки» для бакалавров 4 курса направления 15.03.01 «Машиностроение» способствовало развитию профессиональных компетенций обучающихся, улучшению межличностных отношений, созданию благоприятной психологической атмосферы в коллективе, в том числе для иностранных студентов, и выработке опыта креативной самоактуализации. В таких условиях, благодаря использованной методике обучения получилось создать сплоченный, инициативный и дружественный коллектив со значительным прогрессом в усвоении материалов дисциплины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Arsentyeva X.S., Gulk E.B., Kasyanik P.M. Applying a Collaborative Learning Technique in PhD Student Groups with Multinational Structure During Foreign Language Studying in Technical University. 2017. Interactive Collaborative Learning. ICL 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 544. pp. 31-44.

[2] Rostovtseva M.V., Mashanov A.A. Methods of Conflict Study in the System of Education. 2020. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences. Vol. 13(2), pp. 208-218.

[3] Купавцев А. В. Интенсивно-деятельностное обучение как основа компетентностного подхода к профессиональному образованию в техническом университете. 2012. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Естественные науки», №2, с. 113-119.
[4] Серёжникова Р.К. Компетентностно-деятельностный подход в профессионально-педагогическом образовании. 2015. Высшее образование в России. №3. с. - 127-133.
[5] Ялалов Ф. Деятельностно-компетентностный подход к практико-ориентированному образованию. 2008. Высшее образование в России. №1. С. 89-93.
[6] Deepti Prit Kaura et al. Enhancing Student Motivation with use of Augmented Reality for Interactive Learning in Engineering Education. 2020. Procedia Computer Science. Vol. 172, pp. 881-885.
[7] Joana B. Silva et al. Cooperative and Interactive Learning to estimate human behaviours for energy applications. 2022. Energy and Buildings. Vol. 258, 111727.
[8] Kalyana Chakravarthy Chilukuri. A Novel Framework for Active Learning in Engineering Education Mapped to Course Outcomes. 2020. Procedia Computer Science. Vol. 172, pp. 28-33.
[9] Koenen A., Dochy F., Berghmans I. A phenomenographic analysis of the implementation of competence-based education in higher education. 2015. Teaching and Teacher Education, vol. 50, pp. 1-12.
[10] Misbah Z. et al. Teacher interpersonal behaviour and student motivation in competence-based vocational education: Evidence from Indonesia Original Research Article. 2015. Teaching and Teacher Education. vol. 50, pp. 79-89.
[11] Nurzija, R. , Moldir, U. , Baitukayeva, A. , & Baitukayeva, D. Communicative Abilities Formation in Modern Pedagogical Science. 2015. Procedia - Social and Behavioral Sciences. vol. 190, pp. 305-308.
[12] Renuka G. Innovative teaching and learning strategies for materials engineering education. Materials Today: Proceedings. 2021. Pre-print. ISSN 2214-7853.
[13] Кондратьева Г.А., Наумкин Н.И. Деловая игра, как метод подготовки инженерных направлений к инновационной деятельности. Современное машиностроение: Наука и образование. 2019. с. 67-77
[14] Горелова А.В. формирование профессиональных и технического вуза путем использования методики CLIL в преподавании дисциплины «Химия». Современное машиностроение: Наука и образование. 2018. с. 29-37
[15] Кудрявцев В.Н., Парамонова В.А. Ролевые игры с элементами имитационного моделирования при изучении специальных дисциплин студентами инженерных направлений. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. с. 26-44

[16] Рубцов В.В., Макаровская З.В., Гуружапов В.А., Максимов Л.К. Компетентностно-деятельностный подход к проектированию и разработке новой модульной ОПОП исследовательской магистратуры "культурно-историческая психология и деятельностный подход в образовании": направление подготовки - психолого-педагогическое образование. 2014. Психологическая наука и образование. №2(43), с. 7-16

X.S.Arsentyeva[1]

COMPETENCE-ACTIVE APPROACH IN SPECIAL TECHNICAL DISCIPLINES TEACHING

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

Abstract

The article is devoted to the study of the interactive learning elements and competence-active approach usage effectiveness for the professional competencies development of students in groups with a multinational composition. The results showed a significant increase in the efficiency of theoretical material assimilation and the ability to apply knowledge in practice. The application of the proposed methods contributed to the formation of a cohesive and active team by increasing practice-oriented joint work.

Key words: interactive learning, special disciplines, competence approach, active approach, professional competencies.

REFERENCES

[1] Arsentyeva X.S., Gulk E.B., Kasyanik P.M. Applying a Collaborative Learning Technique in PhD Student Groups with Multinational Structure During Foreign Language Studying in Technical University. 2017. Interactive Collaborative Learning. ICL 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 544. pp. 31-44.

[2] Rostovtseva M.V., Mashanov A.A. Methods of Conflict Study in the System of Education. 2020. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences. Vol. 13(2), pp. 208-218.

[3] Kupavtsev A.V. Intensive activity training as the basis of a competence-based approach to vocational education at a technical university. 2012. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. Vol. 2, pp. 113-119.

[4] Serezhnikova R.K. Competence activity approach to professional pedagogical education. 2015. Higher education in Russia. Vol. 3. pp. - 127-133.
[5] Yalalov F. Activity-competence approach to practice-oriented education. 2008. Higher education in Russia. Vol. 1. pp. 89-93.
[6] Deepti Prit Kaura et al. Enhancing Student Motivation with use of Augmented Reality for Interactive Learning in Engineering Education. 2020. Procedia Computer Science. Vol. 172, pp. 881-885.
[7] Joana B. Silva et al. Cooperative and Interactive Learning to estimate human behaviours for energy applications. 2022. Energy and Buildings. Vol. 258, 111727.
[8] Kalyana Chakravarthy Chilukuri. A Novel Framework for Active Learning in Engineering Education Mapped to Course Outcomes. 2020. Procedia Computer Science. Vol. 172, pp. 28-33.
[9] Koenen A., Dochy F., Berghmans I. A phenomenographic analysis of the implementation of competence-based education in higher education. 2015. Teaching and Teacher Education, vol. 50, pp. 1-12.
[10] Misbah Z. et al. Teacher interpersonal behaviour and student motivation in competence-based vocational education: Evidence from Indonesia Original Research Article. 2015. Teaching and Teacher Education. vol. 50, pp. 79-89.
[11] Nurzija, R. , Moldir, U. , Baitukayeva, A. , & Baitukayeva, D. Communicative Abilities Formation in Modern Pedagogical Science. 2015. Procedia - Social and Behavioral Sciences. vol. 190, pp. 305-308.
[12] Renuka G. Innovative teaching and learning strategies for materials engineering education. Materials Today: Proceedings. 2021. Pre-print. ISSN 2214-7853.
[13] Kondratyeva G.A., Naumkin N.I. Business game, as a method of preparing engineering students for innovation. Modern mechanical engineering: Science and education. 2019. pp. 67-77
[14] Gorelova A.V. Achievement of professional and intercultural competencies of the students of technical university by CLIL approach in chemistry teaching. Modern mechanical engineering: Science and education. 2018. pp. 29-37
[15] Kudryavtsev V.N., Paramonova V.A. Role-playing games with elements of simulation modeling in the study of special disciplines by engineering students. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 26-44
[16] Rubcov V.V. Kompetentnostno-dejatelnostnyj podhod k proektirovaniju i razrabotke novoj modulnoj OPP [Competence-active approach to the design and development of a new modular PLO]. 2015. Vestnik prakticheskoj psihologii obrazovanija. Vol.2(43), pp. 7-16

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 378.147.34

Д.П. Гасюк[1], В.А. Косова[2]

ПРОВЕДЕНИЕ ЗАНЯТИЙ В АКТИВНОЙ ФОРМЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН СТУДЕНТАМИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

[1]Гасюк Дмитрий Петрович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 534-07-64, E-mail: cz_tipt@mail.ru

[2]Косова Валентина Андреевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 534-07-64, E-mail: kosova.va@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные вопросы, связанные с применением в образовательной деятельности активных методов обучения, анализируются проблемы применения активного обучения в высшей школе. Результаты апробации занятия показали, что в ходе занятия студенты более вовлечены в процесс изучения материалов занятия, приобретаются навыки ведения дискуссии и подготовки докладов результатах командной работы.

Ключевые слова: активные методы обучения, дискуссия, качество образования, ролевая игра, специальные дисциплины.

Введение

В настоящее время решение задач, связанных с повышением качества образования в Высших учебных заведениях, является важной составляющей в общей концепции развития образования в России. Согласно последним данным в рейтинге стран мира по индексу уровня образования Россия занимает 52 место [1]. Хотя с 90х годов прошлого столетия значение данного показателя неуклонно росло, в последние годы наметилась некоторая стагнация (значение показателя в 2017-2019 гг. составляло 0,823). В связи с этим необходимо продолжить разрабатывать и

внедрять подходы, позволяющие повышать качество знаний и уровень профессиональной подготовки студентов, способных успешно конкурировать на рынке труда и умеющих эффективно работать по специальности [2].

Традиционные способы подачи материала для студентов достаточно давно подвергается критике, так как в процессе лекционных и практических занятий не происходит взаимодействия между студентами и преподавателем. Студенты вовлечены в процесс пассивно, выступают в роли получателя информации. Поэтому в настоящее время повышенный интерес направлен на применение активных методов обучения - методов, которые побуждают учащихся к активной мыслительной и практической деятельности в процессе овладения учебным материалом и поиску новых идей для решения разнообразных задач по специальности [7].

Преимущество активных методов обучения заключается в том, что они переводят учащегося из объекта учебного процесса в его субъект [3]. При этом параллельно с образовательной деятельностью появляется возможность развития у студентов мышления, познавательной активности, познавательного интереса [5]. Достаточно много ученых отмечают преимущества при применении ролевых игр и других форм активного обучения, например [6,8,13,14,15,16]. Развитием направления применения активного обучения занимались А. М. Матюшкин, Т. В. Кудрявцев, А. А. Вербицкий [9]. К основным достоинствам относят именно дискуссионную составляющую, которая учит студентов взаимодействовать с другими людьми и искать пути решения проблем, возникающих в процессе практической деятельности.

Задачей данного исследования является анализ эффективности применения методов активных форм обучения при изучении специальных дисциплин студентами машиностроительных направлений СПбПУ. В ходе исследования изучены особенности проведения дидактических игр, разработан план проведения одного занятия для студентов первого курса программы магистратуры, проведена апробация метода, проведен анализ результатов занятия, с точки зрения повышения интереса к образовательному процессу у студентов.

Методы

На занятие выносятся вопросы анализа статистических данных для определения стабильности производственного процесса и выявления причин возникновения несоответствующей продукции. Занятие проводится в рамках курса «Статистические методы в управлении качеством», в конце семестра, после изучения блока тем, охватывающих материал о законе нормального распределения и инструментах менеджмента качества. По типу занятие можно отнести к практико-

ориентированному и контрольно-обучающему [11]. В основе занятия заложено соревнование, при котором группа студентов разделяется на две команды. Каждая команда должна ознакомиться с представленным исходными материалами и предложить варианты решения описанных проблем. Основной метод ведения занятия – практический. Студенты применяют знания и навыки, полученные в ходе выполнения лабораторных работ в течение семестра. Также в ходе занятия применятся словесный метод в виде обсуждения результатов и дискуссия.

Занятие базируется на применении инструментов качества: причинно-следственная диаграмма, контрольные листки, гистограммы, диаграммы разброса, регрессионный анализ, анализ Парето, контрольные карты Шухарта (внутрипредметные связи).

Занятие базируется на материалах, изученных студентами в курсах высшей математики, основ обеспечения качества, технологии машиностроения (межпредметные связи).

Цели проведения занятия:

1. Углубление знаний в области статистических методов в управлении качеством. На занятии у студентов появляется возможность разобраться с темами и понятиями, которые были недостаточно изучены или не поняты в ходе выполнения лабораторных работ в течение семестра.

2. В части развивающей составляющей в течение занятия студенты обучаются самостоятельно мыслить, формулировать свою точку зрения, выделять главное, структурировать и систематизировать полученную информацию.

3. С точки зрения практического опыта, студенты в ходе занятия осознают значимость анализа статистических данных на машиностроительном производстве, и как применение инструментов качества способствует улучшению качества продукции.

4. С точки зрения воспитательной составляющей, в ходе занятия у студентов есть возможность проявить инициативу, почувствовать ответственность за собственный результат и за результат работы команды.

Задачи занятия:

1) Развивающая - способствовать формированию навыков устной речи, ведения диалога, четкого изложения собственных мыслей и результатов командной работы, развитие логического мышления;

2) Обучающая – способствовать формированию практических навыков и умений использования полученных знаний, повторение и закрепление ранее усвоенного материала;

3) Контрольная – оценить степень осознанности материала курса студентами, оценить возможность применения учебных материалов за рамками лабораторных работ

4) Воспитательная – сформировать навыки, ориентированные для применения в дальнейшей профессиональной деятельности.

Форма учебного занятия – практическая работа. Общее время – 2 академических часа (90 минут): вводный инструктаж и погружение в тему – 20 минут, подготовка - 30 минут, выступление с докладами –20 минут, ответы на вопросы – 10 минут, подведение итогов –10 минут.

Количество обучающихся: 8 – 18 человек, студенты 1 курса программы магистратуры.

Необходимое оборудование и материалы: доска, бумага, ручка, компьютеры, проектор.

Погружение в тему. Ситуация представлена следующим описанием. На предприятии машиностроительной отрасли изготавливаются детали – тела вращения. Тип производства – серийный. Несколько месяцев назад предприятие получило крупный долгосрочный заказ на изготовление деталей для снегоходов. В результате расчетов было принято решение изготавливать партии деталей на двух станках №1 и №2. Однако при изготовлении деталей выяснилось, что не все детали успешно проходят контрольные операции и отправляются либо на доработку, либо признаются негодными.

Проблемы качества оборачиваются потерями (дефектные детали и затраты, связанные с их производством). Важными задачами для специалистов технического отдела и отдела качества являются определение источника потерь и его устранение. Для этого необходимо применять инструменты качества, которые помогают найти причины, приводящие к возникновению дефектов. В ходе выполнения задания, требуется выявить наиболее часто встречающиеся дефекты, определить, какое оборудование производит дефектную продукцию, сделать предположение о причинах возникновения дефектов, предложить возможные пути устранения причин дефектов.

Дидактический материал: в зависимости от количества студентов, группы карточек по 100 шт. с изображением валов. На каждой карточке указаны исходные данные: 1) выявленный дефект (при этом есть карточки с деталями без дефектов) 2) номер станка (№1 или №2), на котором изготавливалась каждая деталь.

Структура и содержание занятия:

1. Первый этап

- Студенты распределяются на 2-3 команды с целью формирования примерно равных по силам команд. Командам выдаются комплект карточек с исходными данными (детали с изображением валов).

- Команды в процессе самостоятельной работы выявляют дефекты деталей, отсортировывают дефектные детали, распределяют, какие детали, на каком станке изготовлены, подсчитывают количество каждого дефекта.

Студенты сами принимают решение, какой способ сортировки и итогового представления данных выбрать. У студентов есть материалы, выданные в ходе выполнения лабораторных работ в течение семестра. Можно пользоваться лекционным материалом в части формул, способах построения графиков.

В итоге у каждой команды должны быть сформированы таблицы данных. Это может быть список или рисунок, в зависимости от выбора команды. Примерная структура данных представлена в таблице №1.

Таблица 1 – Данные по дефектам

Типы дефектов	Число дефектов	Остальные части таблиц заполняются студентами в зависимости от принятого решения по выбору анализа данных		
Деформация	9			
Забоины	8			
Раковины	5			
Трещины	18			
Геометрия	3			
Дефекты резьбы	4			
Прочие	3			
ИТОГО:	50			

- Далее каждая команда строит графики, диаграммы, либо применяет метод мозгового штурма и т.п. Проводит сравнительный анализ и делает выводы о качестве работы станков, наиболее часто встречающемся дефекте, а также выдвигает предположения о возможных причинах дефектов, о том, каким образом можно устранить причины дефектов.

2. Второй этап:

- команды по очереди докладывают выводы о своей работе (при докладе на экране представляется исходное задание и полученные результаты), остальные задают вопросы на уточнение, выдвигают аргументы.

- взаимное рецензирование команд, команды характеризуют выступление команд-конкурентов, объясняют правильность-неправильность выдвинутых предположений о возможных причинах дефектов, ошибки, дают общую оценку команде-сопернику.

3. Подведение итогов:

- проводится оценка правильности выбранного инструмента качества, факта определения возможных причин появления дефектов. Оценивается также активное участие в обсуждении, степень обоснованности ответов.

- проводится сравнение действий команд по качеству доклада (содержанию, стилю изложения).

В ходе занятия используется несколько ролей, студенты выступают в качестве сотрудников отдела технического контроля при сортировке статистических данных, сотрудниками отдела качества при построении графиков и сотрудниками технического отдела, выдвигая гипотезы о возможных причинах брака.

Подведение итогов осуществляется на основании полученных участниками индивидуальных и командных достижений. Система оценивания представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Система оценивания

События	Команда 1	Команда 2
Командная работа		
Правильная сортировка данных, выбор 3 и более инструментов качества – 5 баллов Выбор двух инструментов качества в ходе анализа о – 4 балла Выбор одного инструмента качества - 3 балла		
Корректно построенные графики, диаграммы 2 диаграммы (графика) – 5 баллов 1 диаграмма (графика) – 4 балла Ошибки в построении – 3 балла		
Доклад Грамотно построенный доклад – 5 баллов Правильно определен основной дефект – 5 баллов Выдвинуты 2 гипотезы о возможных причинах – 5 баллов Выдвинута 1 гипотеза о возможных причинах – 4 баллов Назван минимум один способ устранения причины дефекта – 5 баллов		
Индивидуальная работа		
Баллы начисляются за вопросы и их уточнения: Проблемный вопрос, или связанный с практикой – 5 баллов Простой вопрос (определение, как построена диаграмма)- 4 балла В). Уточнение или пропущенная ошибка преподавателя - 3балла		
Итого		

Подведение итогов осуществляется на основании полученных баллов при индивидуальной и командной работе студентов.

Обсуждение

Результаты использования активных методов обучения показывают эффективность освоения учебного материала студентами по сравнению с

использованием традиционных методов обучения. Другой формат работы заставляет студентов думать, искать информацию, анализировать исходные данные.

Следует отметить, что перед проведением занятия необходима предварительная подготовка требуемых для игры материалов [4]. Также в процессе проведения занятия возникают сложности, связанные с процессом наблюдения за ходом обсуждения задачи и выработки решения. Основная цель преподавателя на этом этапе - не вмешиваться в процесс, не предлагать свои варианты решения проблемы, не вносить корректировки, которые повлияют на ход обсуждения и принятия решений. Дополнительно в числе сложностей следует отметить недостаточную подготовку отдельных студентов, что снижает вероятность нахождения нескольких путей решения поставленной задачи. Также в процессе занятия возможен выход за запланированные временные рамки. Поэтому перед началом выполнения заданий помимо четкой вводной информации необходимо озвучивать, сколько времени запланировано на каждый этап занятия, и периодически напоминать о нем студентам в процессе работы. Кроме того, для добавления элемента соревновательной игры возможно необходимо предусмотреть мотивационную составляющую, например, команде студентов, набравшей максимальное количество баллов, зачесть рассматриваемую тему до зачетного занятия. Также, следует отметить, в случае организации проведения занятий в активной форме на постоянной основе потребуется перестановка оборудования в аудитории для обеспечения удобства проведения дискуссии и работе в командах.

В ходе проведения практического занятия наглядно видна работа лидера, работа команды, понятно, как распределяются роли и видно, кто из студентов заинтересован в глубоком изучении предмета, кто понимает суть основных тем, а кто применяет формальный подход к процессу обучения.

К сожалению, в рамках данного исследования не проводилась количественная оценка знаний студентов до и после занятия. Данная оценка может быть полезна для определения степени понимания студентами тем занятий [10]. Этот факт необходимо учесть при проведении последующих занятий.

Заключение.

Активные формы обучения способствуют изучению вопросов, связанных с будущей профессиональной деятельностью студентов, улучшает навыки проведения дискуссии, способствует развитию аналитического мышления. В рамках изучаемой специальной дисциплины можно выносить на занятие достаточно разнообразный круг задач, требующий поиска решений, применения элементов мозгового штурма и обсуждения.

С целью повышения качества подготовки студентов-магистров возможно включение подобные типы занятий элементы задач, требующих освоения программных пакетов для статистического анализа данных.

Применение активного обучения способствует развитию профессиональных навыков у студентов, позволяет отрабатывать на практике теоретический материал, учить студентов вести дискуссию, приводить аргументы, работать как на процесс, так и на результат. Кроме того, приобретенный опыт работы позволяет на практике оценить основные принципы управления качеством на машиностроительном предприятии и пробудить интерес у студентов к будущей профессиональной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] United Nations Development Programme. Human Development Index (HDI): Education Index – Текст : электронный // United Nations Development Programme – URL: https://hdr.undp.org/en/countries/profiles/RUS

[2] Кузьминская Т.П. Проблемы повышения качества образования в вузах России / Кузьминская Т.П., Бурова Н.Н. // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). – 2017. – № 2 – С. 118-132.

[3] Смирнова А.В. Активные методы обучения в вузе / Смирнова А.В // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 4 – С. 129-133.

[4] Кудрявцев В.Н. Ролевые игры с элементами имитационного моделирования при изучении специальных дисциплин студентами инженерных направлений / Кудрявцев В.Н., Парамонова В.А. // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2021. - № 10. - С. 26-44.

[5] Иванов А. В. Активные методы обучения и метод традиционной лекции / Иванов А. В. // Многоязычие в образовательном пространстве. – 2014.

[6] Рафикова А.С. Активная и коллаборативная формы обучения: краткий обзор зарубежных исследований / Рафикова А.С. // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – №10-2 (61). – С. 127-130.

[7] Суринов В.В. Активные формы и методы обучения в процессе формирования компетенций обучающихся / Суринов В.В., Шиборин Г.В. // Вестник науки. – 2020. – №11 (32). – Т1. – С. 21-27.

[8] Кругликов В. Н. Инженерная педагогика : учеб. пособие / В. Н. Кругликов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 202 с.

[9] Бочкарева Т. Н. Активные методы обучения как новая форма предоставления теоретического материла в образовательном процессе колледжа/ Т. Н. Бочкарева, Э. А. Осадчий, И. Ф. Сибгатуллина// Гуманитарные науки. – 2020. – №1. – С. 53-60.
[10] Doug Lombardi, Thomas F. Shipley. The Curious Construct of Active Learning // Psychological Science in the Public Interest – 2021. – Vol. 22(1). – pp. 53-60.
[11] Кругликов В. Н. Интерактивные формы профессионального обучения : учеб. пособие / В. Н. Кругликов, М. В. Оленникова. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 436 с.
[12] Luis R. Murillo-Zamorano, Jose Angel Lopez Sanchez, Ana Luisa Godoy-Caballero, Carmen Bueno Munoz. Gamification and active learning in higher education: is it possible to match digital society, academia and students' interests? // International Journal of Educational Technology in Higher Education – 2021. – Vol. 15 – pp. 1-27.
[13] Fantazir, K., & Bartley, M. (2021). Role-playing gamification technologies with adult learners / Imagining SoTL. -2021 -Vol.1, p.p.3–24.
[14] Adelkhah Fatemeh, Shamsaddin Faezeh, Zarrin Khat Shahnaz, A Study Of Active Teaching Methods In Teaching Social Studies Of High School First Course // JOURNAL OF RESEARCH IN SOCIAL STUDIES EDUCATION, 2021 , Volume 3 , Number 2 (8), pp.29-57.
[15] Mochamad Abdul Azis Amir, Ananda Rachmaniar, Henri Rismanayadi, Andre Julius. Improving Student's Achievement Motivation Through Role-Play / International Journal of Global Operations Research – 2020 -Vol.1, No. 3, pp. 96-102
[16] Kalinina O.N., Shakarova F.D., Yadgarova G.I. The role of interactive teaching methods in the formation of students' professional competence. // Linguistics and Culture Review, 2021, 5 (S2),pp. 1424-1430.

D. P. Gasyuk [1], V.A. Kosova[2]

GIVING LESSONS IN AN ACTIVE FORM AT STUDYING OF THE SPECIAL DISCIPLINES BY THE ENGINEERING STUDENTS

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

Abstract

The current issues related to active learning methods in the educational process are considered in the article, the problems of usage of such a training in higher education are analyzed. The results of the approbation of the lessons have

shown that during the classes the students are more involved in studying the materials; they gain the skills of holding discussions and preparing reports with the results of teamwork

Key words: active learning methods, discussion session, quality of education, role game, special disciplines.

REFERENCES

[1] United Nations Development Programme. Human Development Index (HDI): Education Index – Текст : электронный // United Nations Development Programme – URL: https://hdr.undp.org/en/countries/profiles/RUS

[2] Kuzminskaya T.P. Problems of improving the quality of education in Russian higher education / Kuzminskaya T.P., Burova N.N., // Journal of Economic Regulation. – 2017. – № 2 – pp. 118-132.

[3] Smirnova A.V. Active learning methods at university/ Smirnova A.V.. // The journal "Cherepovets State University Bulletin". – 2016. – № 4 – pp. 129-133.

[4] Kudryavtsev V.N. Role-playing games with elements of simulation modeling in the study of special disciplines by engineering students / V.N.Kudryavtsev, V.A.Paramonova// Modern mechanical engineering. Science and Education. - 2021. - № 10. - pp. 26-44.

[5] Ivanov A. V. Active learning methods vs traditional lecturing / Ivanov A. V. // Russian Journal of Multilingualism and Education. – 2014

[6] A.S. Rafikova Active learning and collaborative learning: brief literature / / Rafikova A.S. // International journal of humanities and natural science. – 2021. – №10-2 (61). – pp. 127-130.

[7] Surinov V.V. Active forms and methods of teaching in the process of forming students' competencies Surinov V.V., Shiborin G.V. // Bulletin of Science. - 2020. - No. 11 (32). - T1.– pp. 21-27.

[8] Kruglikov V. N. Engineering pedagogy: textbook. allowance / V. N. Kruglikov. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic university, 2018. - 202 p.

[9] Bochkareva T. N. Active learning methods as a new form of providing theoretical material in the educational process of the college /T. N. Bochkareva, E. A. Osadchiy, I.F. Sibgatullin // Human sciences. – 2020. – №1. – pp. 53-60.

[10] Doug Lombardi, Thomas F. Shipley. The Curious Construct of Active Learning // Psychological Science in the Public Interest – 2021. – Vol. 22(1). – pp. 53-60.

[11] Kruglikov VN Interactive forms of vocational training: teaching guide / V. N. Kruglikov, M. V. Olennikova. - St. Petersburg.: Polytechnic Publishing House university, 2015. - 436 p.

[12] Luis R. Murillo-Zamorano, Jose Angel Lopez Sanchez, Ana Luisa Godoy-Caballero, Carmen Bueno Munoz. Gamification and active learning in higher education: is it possible to match digital society, academia and students' interests? // International Journal of Educational Technology in Higher Education – 2021. – Vol. 15 – pp. 1-27.
[13] Fantazir, K., & Bartley, M. (2021). Role-playing gamification technologies with adult learners / Imagining SoTL. -2021 -Vol.1, p.p.3–24.
[14] Adelkhah Fatemeh, Shamsaddin Faezeh, Zarrin Khat Shahnaz, A Study Of Active Teaching Methods In Teaching Social Studies Of High School First Course // JOURNAL OF RESEARCH IN SOCIAL STUDIES EDUCATION, 2021 , Volume 3 , Number 2 (8), pp.29-57.
[15] Mochamad Abdul Azis Amir, Ananda Rachmaniar, Henri Rismanayadi, Andre Julius. Improving Student's Achievement Motivation Through Role-Play / International Journal of Global Operations Research – 2020 -Vol.1, No. 3, pp. 96-102
[16] Kalinina O.N., Shakarova F.D., Yadgarova G.I. The role of interactive teaching methods in the formation of students' professional competence. // Linguistics and Culture Review, 2021, 5 (S2),pp. 1424-1430.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Р.Ю. Добрецов

ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ В МАГИСТРАТУРЕ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

Роман Юрьевич Добрецов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-7785, E-mail: dr-idpo@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы интеграции электронной компоненты обучения в учебный процесс основной образовательной программы магистратуры на примере направления «Наземные транспортно-технологические комплексы». Спецификой данного направления является значительный процент студентов, не прошедших подготовку в бакалавриате по данному направлению на фоне недостаточности аудиторных часов для компенсации отставания. Результаты показали, что гибридные технологии позволяют более качественно организовать самостоятельную работу студента и повысить качество обучения.

Ключевые слова: силовая установка, трансмиссия, ходовая часть, система передвижения, распределение мощности, профессиональные дисциплины

Введение

В последние годы увеличилась мобильность абитуриентов. В сочетании со спецификой основной образовательной программы (ООП) магистратуры «Мобильные энергетические платформы» (данная ООП реализуется на стыке компетенций направлений «Наземные транспортно-технологические комплексы» и «Энергетическое машиностроение») это привело к набору контингента, обучавшегося в бакалавриате по смежным направлениями и нуждающегося в оперативном заполнении пробелов в

подготовке в области проектирования шасси мобильных платформ (подсистемы силовой установки, трансмиссии, движителя, специального оборудования и др.). При этом тактика обучения должна быть максимально гибкой и учитывать очень разный уровень подготовки учащихся, но вписываться в рамки, отведенные учебным планом. Нужной гибкости, в сочетании с полнотой представления базовых положений современного подхода к проектированию шасси мобильных платформ, представляется возможным достигнуть, используя смешанные (гибридные) технологии обучения и время на самостоятельную работу студента.

Рассматриваемую литературу по данному вопросу можно структурировать следующим образом:

- практические руководства и аналитические работы по специфике использования дистанционных и гибридных технологий в образовании (представлены характерными работами [1-3], используемыми как базовые при выборе среды и методического подхода к построению курса);
- традиционные узкоспециальные учебные и учебно-методические пособия (представлены в списке рекомендуемой литературы в разделах курса: учебники Носова Н.А., Волкова Ю.П., Харченко А.П., Ефимова Ю.Т., Ролле В.Е. и др., ставшие классической основой курса);
- современные фундаментальнее отечественные и зарубежные работы в области теории и проектирования узлов и агрегатов мобильных машин (см. [4-8]);
- используемые в учебном процессе результаты современных научных работ, в том числе, выполненных преподавателями и инженерами Высшей школы транспорта (вопросам организации перспективных трансмиссий и методов управления агрегатами посвящены работы [9-12], моделирование работы коробки перемены передач представлено в статьях [13,14], в области управляемых механизмов распределения мощности использованы публикации [15-17]).

Рассмотренные библиографические источники активно использовались при разработке курса и рекомендуются обучающимся в качестве дополнительной литературы.

Целью работы является формирование дистанционной компоненты для реализации гибридного обучения по курсу дисциплине) «Основы цифрового проектирования мобильных энергетических платформ», планируемого к реализации в рамках ООП «Мобильные энергетические платформы».

Решаемые задачи:

- выбор рабочей среды;
- выработка структуры курса и способов представления материалов;
- определение технологии обратной связи и методов контроля успеваемости;

• апробация отдельных модулей и введение курса в учебный процесс.

Все перечисленные задачи, кроме непосредственно внедрения курса в полном объеме в учебный процесс, на настоящий момент практически решены. Последний шаг требует внесения изменений в документацию ООП и, как ожидается, совпадет по срокам с заявленной Министерством образования и науки РФ очередной реформой, в связи с чем содержательная часть курса потребует внесения некоторых корректив.

Методы

На основании анализа результатов исследований [1,2] в методическом отношении ставка делается именно на гибридное обучение (сочетание очной, дистанционной форм и самостоятельной работы студентов). Это позволит наиболее эффективно использовать учебное время (хотя имеется риск перегрузки студента). В этой связи целесообразно выстроить индивидуальные траектории изучения материала для студентов.

Организационной особенностью является необходимость привлечения нескольких специалистов для поддержания курса. Для одного преподавателя нагрузка может оказаться слишком высокой из-за широты охвата тем.

Контрольные мероприятия рассматриваются, как этап обучения, поэтому в основном применяется тестирование с множественными вариантами ответа на вопрос (закрепление основных понятий, постулатов, закономерностей и формирование остаточных знаний) и выполнение расчетно-графических заданий с загрузкой результатов самостоятельной работы (формирование практических навыков).

Для реализации гибридной формы обучения в СПбПУ наиболее доступными и легитимными ресурсами являются платформа LMS MOODLE (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment – модульная объектно-ориентированная динамическая обучающая среда) и среда MS Teams. Выбор был сделан в пользу LMS MOODLE, поскольку она обладает более удобным и устойчиво работающим интерфейсом, а также обеспечивает необходимый инструментарий и возможности резервного копирования [3]. Для размещения видеолекций в этом случае предусматривается облачное хранение данных на серверах поисково-информационных систем. Проблемы со стабильность работы серверов СПбПУ весной 2022 г. показали, что выбор был правильным – доступ к данным LMS MOODLE был восстановлен быстро и с минимальными потерями информации.

Формально итоговую задачу можно поставить, как разработку и загрузку в LMS MOODLE контента, обеспечивающего дистанционный аспект гибридного процесса обучения по интегрирующей дисциплине

«Основы цифрового проектирования мобильных энергетических платформ».

В качестве примеров, подтверждающих работоспособность такого подхода можно рассматривать и курсы, входящие в пакет «Образовательный форсайт» СПбПУ (их слабость – в полной дистанционности и низкой мотивированности обучающихся, но не в подаче материала и возможностях используемой среды), а также вспомогательные модули, разработанные и апробированные преподавателями ВШТ в период пандемии коронавируса.

Результаты

В результате работы был сформирован комплекс материалов, укрупнено структурированный в соответствии с рис. 1.

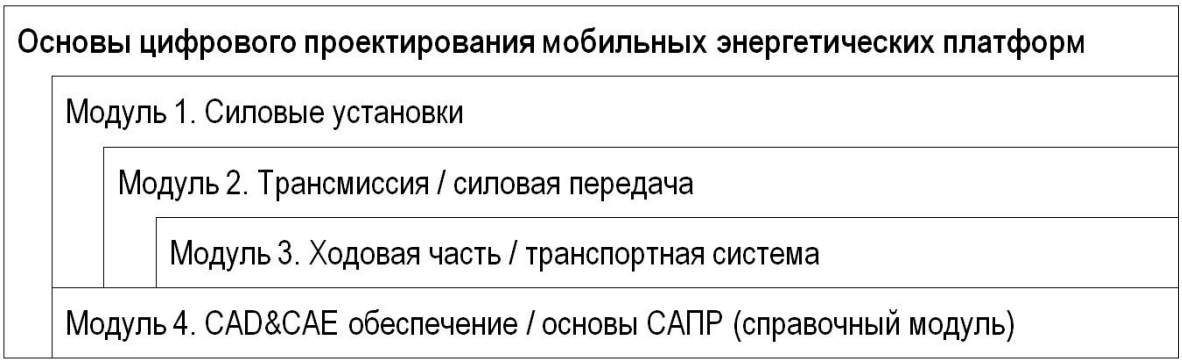


Рис. 1. Укрупненная структура курса

Курс разбивается на крупные модули, соответствующие типичным разделам дисциплины «Проектирование НТТМ», в сквозном виде (поэтапное изучение основ проектирования силовой установки, трансмиссии, ходовой системы, общей компоновки машины) представлена в родственной ООП специалитета «Транспортные средства специального назначения».

На рис. 2 показан «куст» родственных ООП высшего образования, охватывающий магистратуру, бакалавриат, специалитет, аспирантуру. Все эти ООП в настоящий момент реализуются в ВШТ СПбПУ.

Модуль 1 содержит необходимый экскурс в особенности устройства и классификации силовых установок мобильных платформ, принципы и основные формулы проектировочных и поверочных расчетов для подсистем и агрегатов, обслуживающих двигатель внутреннего сгорания (см. [4-8] и др.). Собственно конструкция, теория, основы проектирования тепловых двигателей не рассматриваются, этот материал излагается в рамках дисциплин «Тепловые двигатели» и «Силовые агрегаты МЭП», обеспечиваемых Высшей школой энергетического машиностроения

Института энергетики СПбПУ. практическая работа сводится к выполнению и загрузке результатов расчетно-графических заданий по проектированию отдельных узлов и агрегатов.

Рис. 2. Родственные направления и специальности

Модуль 2 содержит информацию по основам проектирования трансмиссий мобильных машин. В терминах тракторостроения иногда используется понятие «силовая передача». Рассмотрены принципы проектирования механических и гидромеханических трансмиссий, принципы и методы проектировочных и поверочных расчетов основных узлов (см. [4-8] и др.). Уделено внимание современным решениям по структуре, системам управления коробок перемены передач (см. [9-14] и др.) и управляемым механизмам распределения мощности (см. [15-17] и др.) Практические задания по объему и тематике близки к разделам курсового проекта, «Трансмиссия НТТМ», выполняемого на 4 курсе

бакалавриата или специалитета. Ввиду большой трудоемкости, однако, е предусматривается собственно выполнение эскизного проекта планетарной коробки передач в составе гидродинамической трансмиссии мобильной платформы. Опыт показывает, что работа над чертежом невозможна без участия преподавателя и требует слишком много времени.

Модуль 3 содержит информацию о классификации ходовых систем, необходимый экскурс в основы конструкции и методики расчета типичных объектов системы подрессоривания и собственно колесного и гусеничного движителей (см. [4-6,8] и др.). Термин «система передвижения» обычно используется применительно к роботизированным платформам. Практические задания близки к рассматриваемым в процессе проектирования системы подрессоривания и движителя на старших курсах специалитета.

Модуль 4 содержит необходимый минимум сведений по основам САПР. В ранних версиях ООП такая подготовка проводилась в течении третьего и четвертого семестров бакалавриата и специалитета. В настоящий момент, ввиду нехватки учебного времени, вызванной унификацией учебных планов и развитием модуля «Образовательный форсайт», «Основы проектной деятельности» и др., данный материал изучается в сжатом виде на практических занятиях по дисциплине САПР. Модуль рассматривается, как вспомогательный, т.к. изучение основ САПР характерно для всех программ бакалавриата технических направлений – вопрос лишь в адаптации студента к специфике цифрового обеспечения проектирования мобильных платформ. Практические задания просты и базируются на лабораторных работах, детально подготовленных для студентов второго курса бакалавриата или специалитета.

В составе Модулей 1-3 уделено внимание использованию специального программного обеспечения, разработанного преподавателями и инженерами СПбПУ для обеспечения проектирования систем шасси мобильных машин: программа кинематического и силового анализа планетарных коробок передач (ПКП) с произвольным числом степеней свободы, программы синтеза схем ПКП с тремя степенями свободы на основе двухстепенных прототипов, расчета ресурса подшипников сателлитов, расчета параметров плавности хода мобильной платформы, прочностного расчета балансира и др.

Навыки работы с этими программами дают основу для эффективного развития тем НИРС, формирования основ научно-исследовательского подхода к объектам изучения. Дальнейшее использование этих навыков совершенствуется в процессе изучения дисциплины «Компьютерные технологии проектирования МЭП», изучаемой на втором курсе магистратуры.

Обсуждение

Важность полученных результатов и в приобретении опыта создания интегрирующих дисциплин, и в заложении фундамента подготовки студентов, достаточно универсального по отношению к специфике отдельных ООП (см. рис. 2).

Дальнейшие тенденции к развитию дистанционных технологий обучения, концепции перспективных мультиязычных образовательных ресурсов, интерес к гибридному обучению в вузах РФ со стороны абитуриентов и студентов Китая (опытная группа студентов прошла обучение зимой 2022 г.) и Индии определяют потребность в развитии и расширении данного курса.

Важно и то, что курс дает фундаментальные основы, сохраняет наиболее ценные наработки советского периода развития отечественного инженерного образования. Знание этих основ существенно повышает конкурентоспособность выпускника.

Ввиду уникальности ООП, перечисленных на рис. 2, в рамках Северо-Западного региона не имеется продуктов, пригодных к сравнению с разработанным. Ближайшие родственные вузы, реализующие подобные программы – МГТУ им. Н.Э. Баумана и Московский политехнический университет. По нашим сведениям, подобный курс в этих учебных заведениях еще не разработан. Однако «московская» и «петербургская» школы подготовки специалистов в области транспортного машиностроения и мобильной энергетики весьма схожи, что позволяет использовать родственные методические подходы в организации учебного процесса.

Заключение

Таким образом, гибридное обучение расширяет возможности для организации самостоятельной работы студентов при сохранении контакта с преподавателем и наличии полноценных аудиторных занятий. Упрощается доступ студентов к большим объемам справочной информации.

Достигается цель проекта – интеграция а учебный процесс студентов, закончивших бакалавриат в других вузах. Упрощается вынужденная работа в дистанционном режиме, что реализовано в период пандемии. Основные результаты работы можно оценить положительно.

Просматриваются перспективы внедрения разработанной дисциплины (с необходимыми изменениями) в учебный процесс родственных образовательных программ (в нашем случае – ООП «Компьютерные технологии проектирования беспилотных автомобилей и

электромобилей»), использование отдельных модулей при работе со студентами бакалавриата «Автомобилестроение и автосервис», специалитетов «Наземные транспортно-технологические средства» и «Транспортные средства специального назначения». Отдельные разделы (с переводом на английский язык) апробированы при реализации программы «Transport vehicle» в рамках Зимней школы СПбПУ 2022 г.

Опыт работы в период пандемии позволил сформировать и апробировать методические подходы такого способа организации обучения. Полная реализация проекта потребует довольно радикального пересмотра учебного плана, подготовки электронного контента, обеспечения студентов эффективно функционирующими рабочими местами в учебно-вычислительной лаборатории, что связано со значительными финансовыми вложениями.

При дальнейшей доработке и сопровождении дисциплина может стать основой курса, реализуемого в дистанционном виде для удаленных пользователей с неизбежными последствиями в виде снижения качества обучения, радикального уменьшения числа обучавшихся, закончивших курс, падения ответственности и мотивации контингента.

Проект реализуется победителем Конкурса на предоставление грантов преподавателям магистратуры 2020/2021 благотворительной программы «Стипендиальная программа Владимира Потанина» Благотворительного фонда Владимира Потанина (The project is being implemented by the winner of the Master's program faculty grant competition 2020/2021 of the Vladimir Potanin fellowship program).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Сергеев А. Н. Обучение в сообществах в контексте возможностей Интернета. Педагогика. 2009. № 5. С. 89-94.

[2] Иванова П.О. Позитивные и негативные стороны использования в учебном процессе LMS MOODLE. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Гуманитарные и общественные науки. 2015. № 2 (220). С. 159-166.

[3] Андреев А. В., Андреева С.В, Доценко И. Б. Практика электронного обучения с использованием MOODLE. – Таганрог: Изд-во. ТТИ ЮФУ, 2008. – 146 с.

[4] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.

[5] Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкция, конструирование и расчет. Монография. Нижний Новгород. 2010. 320 с.

[6] Ogorkiewicz R. Technology of Tanks. London. 1991. 424 p.
[7] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 c.
[8] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
[9] Dobretsov R., ect. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox. 2018. International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol 12, N9. pp. 790-796.
[10] Демидов Н.Н. [и др.]. Фрикционные механизмы поворота в двухпоточных трансмиссиях транспортных гусеничных машин. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2019. № 1. С. 60-69.
[11] Lozin, A.V., ect. Hyperbolic steering for tracked vehicles. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 0 (9783319956299). pp. 2367-2374.
[12] Dobretsov R.Y., Uvakina, D.V. The Mechatronic Device Impulse Control in Vehicle Powertrains. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 63-73.
[13] Худорожков С.И., Красильников А.А. Численное моделирование динамических процессов в трансмиссии транспортных средств. Известия МГТУ «МАМИ». 2021. №1 (47). С. 38-45.
[14] Демидов Н.Н., Красильников А.А., Худорожков С.И. Исследование процесса переключения передач в коробке перемены передач трактора. Вестник СибАДИ. 2020. №17(1). С. 58-71.
[15] Ushiroda Y., ect. Development of Super AYC. 2003. Technical review. №15. pp. 73-76.
[16] Didikov R., ect. Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission. 2017. Procedia Engineering, Vol. 206. pp 1735-1740.
[17] Дидиков Р.А. Метод определения составляющих баланса мощности механизма распределения мощности в трансмиссии автомобиля. Вестник СибАДИ. 2016. №4(50). С. 61-63.

R.Yu. Dobretsov

HYBRID TECHNOLOGIES OF MASTER'S DEGREE STUDIES: ENGINEERING MOBILE ENERGY PLATFORMS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted the issues of integration of the electronic component of learning into the educational process of the main educational program of the

master's degree on the example of the direction "Ground vehicles and technological complexes". The specificity of this direction is a significant percentage of students who have not completed bachelor's degree in this direction against the background of insufficient classroom hours to compensate for the backlog. The results showed that hybrid technologies make it possible to organize the student's independent work more efficiently and improve the quality of education.

Key words: power plant, transmission, chassis, movement system, power distribution, professional disciplines

REFERENCES

[1] Sergeev A.N. Learning in communities in the context of the possibilities of the Internet. Pedagogy. 2009. No. 5. pp. 89-94. (rus.)
[2] Ivanova P.O. Positive and negative aspects of using LMS MOODLE in the educational process. Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Humanities and social sciences. 2015. No. 2 (220). pp. 159-166. (rus.)
[3] Andreev A.V., Andreeva S.V., Dotsenko I. B. E-learning practice using MOODLE. – Taganrog: Publishing House. TTI SFU, 2008. – 146 p. (rus.)
[4] Wong J.Y. Theory of ground vehicles. 2001. 528 p.
[5] All-terrain transport and technological machines. Construction, construction and calculation. Monograph. Nizhniy Novgorod. 2010. 320 p. (rus.)
[6] Ogorkiewicz R. Technology of Tanks. London. 1991. 424 p.
[7] Mehrdad E., ect. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 2005. 395 c.
[8] Schramm D., ect. Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2013. 412 p.
[9] Dobretsov R., ect. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox. 2018. International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol 12, N9. pp. 790-796.
[10] Demidov N.N. , ect. Friction mechanisms of rotation in two-stream transmissions of transport tracked vehicles. Tractors and agricultural machines. 2019. No. 1. pp. 60-69. (rus.)
[11] Lozin, A.V., ect. Hyperbolic steering for tracked vehicles. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 0 (9783319956299). pp. 2367-2374.
[12] Dobretsov R.Y., Uvakina, D.V. The Mechatronic Device Impulse Control in Vehicle Powertrains. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 63-73.

[13] Hoodorozhkov S.I., Krasilnikov A.A. Numerical modeling of dynamic processes in the transmission of vehicles. Izvestia of MSTU "MAMI". 2021. №1 (47). Pp. 38-45. (rus.)
[14] Demidov N.N., Krasilnikov A.A., Hoodorozhkov S.I. Investigation of the gearshift process in the gearbox of a tractor. Bulletin of SibADI. 2020. No.17(1). pp. 58-71. (rus.)
[15] Ushiroda Y., ect. Development of Super AYC. 2003. Technical review. №15. pp. 73-76.
[16] Didikov R., ect. Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission. 2017. Procedia Engineering, Vol. 206. pp 1735-1740.
[17] Didikov R.A. A method for determining the components of the power balance of the power distribution mechanism in the transmission of the car. Bulletin of SibADI. 2016. No.4(50). pp. 61-63. (rus.)

МЕХАНИКА МАШИН

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

П. А. Андриенко[1], А.Н. Евграфов[2], Д.П. Козликин[3], Ю.А. Семенов[4], Н.С. Семенова[5]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМОВ

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

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

[3]Денис Петрович Козликин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com

[4]Юрий Алексеевич Семенов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: tmm-semenov@mail.ru

[5]Надежда Сергеевна Семенова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: tmm-nss@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрен метод разделения на структурные группы, использующий раздел дискретной математики, теорию графов. Представленный метод используется в качестве учебного материала и входит в курс «Теория механизмов и машин», который читается студентам технических направлений в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

Ключевые слова: структурный анализ, степень свободы, кинематические пары, теория графов, кинематическая цепь, степень подвижности механизма, группа Ассура

Введение

При анализе работы или проектирования машин и механизмов всегда приходится прибегать к различным видам исследований. К их числу относятся структурный синтез (для формирования новых схем), структурный анализ (для разделения на отдельные структурные группы), геометрический анализ (для определения зависимости выходных параметров от входных координат механизма и наоборот) и т.д.

Во всех исследованиях не обходится без использования теорий и принципов различных разделов высшей математики. Например, для описания геометрии и кинематики механизмов промышленных роботов удобно использовать матричное исчисление [1], [2], для исследование законов движения механизма используются методы решения дифференциальных уравнений и т.д. Так и теория графов, раздел дискретной математики, нашла свое применение в структурном анализе и синтезе механизмов [3] - [6]. Эти разделы традиционно входят в состав курса «Теория механизмов и машин», преподаваемый студентам в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого [7].

Исследование механизма традиционно начинается с построения физической модели, т.е. с идеализации его реальных свойств. Первая задача курса «Теория механизмов и машин» – научить основным правилам перехода от реального механизма к его расчетной схеме, а также требованиям, предъявляемым к физической модели: ее адекватности, математической разрешимости, максимальной простоте и т.п.

Наиболее простой моделью реального механизма является модель, называемая механизмом с жесткими звеньями.

Под *звеном* понимается деталь или группа деталей, представляющих с кинематической точки зрения единое целое (т.е. группа деталей, жестко соединенных между собой и движущихся как единое твердое тело). Все звенья рассматриваются как недеформируемые тела.

Далее, говоря о физической модели соединения звеньев между собой, вводится понятие кинематической пары. *Кинематическая пара* (КП) это соединение двух звеньев, обеспечивающее определённое относительное движение. В этих соединениях реализуются голономные, стационарные и удерживающие связи [8].

Следующую физическую модель, которую используют в курсе «Теория механизмов и машин» называют *кинематической цепью*, это совокупность звеньев, которые соединены между собой кинематическими парами. Кинематическую цепь характеризуют ее *входы* и *степени свободы*. *Входы* кинематической цепи образуют смежные звенья, закон относительного движения которых задан. Эти движения задаются *двигателями*. Число двигателей определяет число таких входов n_c кинематической цепи. Они могут быть *внутренними*, где движущие усилия прикладываются к подвижным звеньям цепи, и *внешними*, где движущие усилия действуют на одно из подвижных звеньев цепи и на другое звено, не входящее в кинематическую цепь (в частности, на стойку, неподвижное звено).

Кинематическая цепь, в которой одно из звеньев принято за неподвижное, называется *механизмом* [7]. Из всего многообразия существующих механизмов их разделяют на *пространственные* и *плоские*. *Плоские* - это механизмы, в которых все принадлежащие им звенья двигаются в параллельных плоскостях, остальные механизмы - *пространственные*.

Поскольку в механизме одно звено принимается за неподвижное, следует учитывать только число подвижных звеньев N:

$$w = 6N - \sum_{s=1}^{s=5}(6-s)p_s\,. \qquad (1)$$

Формула (1) называется *структурной формулой Малышева–Сомова*. Пользуясь этой формулой, можно определить число степеней подвижности механизма. Для случая плоского механизма справедлива другая формула:

$$w = 3N - 2p_L - p_H\,, \qquad (2)$$

которая называется *формулой Чебышева* [7], где p_L – число низших кинематических пар, p_H - число высших кинематических пар механизма.

Строго говоря, формулы (1) и (2) можно привести к одному виду:

$$w = \mu N - \sum_{\mu=1}^{s=\mu-1}(\mu - s)p_s\,, \qquad (3)$$

где μ - количество степеней свободы того пространства, в пределах которого работает механизм (для пространственного движения $\mu=6$, для плоского движения $\mu=3$).

Следующий этап исследования механизмов заключается в анализе их структуры. Этот этап позволяет упростить сложный механизм, путем разделения его на более простые модели – структурные группы. Под *структурной группой* понимается кинематическая цепь, в которой число входов равно числу степеней подвижности $n_c=w_c$, такую структурную группу еще называют *нормальной n-подвижной структурной группой* [9]. Это понятие ввел М.З. Коловский [10], для описания структуры многодвигательных машин и машин с внутренними входами. Структурная группа называется *простой*, если она не может быть разделена на несколько групп с меньшим числом звеньев.

Под структурным анализом понимается задача разделения имеющейся структурной схемы механизма на простые структурные группы, по определенным правилам. Правила, по которым традиционно проводится структурный анализ, сформулировал еще в 1914 году русский ученый Л. В. Ассур [11] для рычажных механизмов. Они обычно используются в странах, где сформировалась российская школа механики [12], [13].

Следует также отметить, что на ряду с принципом Ассура, в таких странах, как Германия, США и т.д. широко распространен другой подход к изучению структуры рычажных механизмов, предложенный Грюблером в 70-х годах XIX века. Этот подход основан на использовании замкнутых кинематических цепей, носящих наименование цепей Грюблера [12] - [16].

Использование теории графов в структурном анализе механизмов

Однако упомянутые подходы к структурному анализу механизмов не являются универсальными и не распространяются, например, на механизмы с внутренними входами (см. рис. 1). Чтобы провести структурный анализ подобных механизмов предлагается использовать элементы теории графов [3], [7].

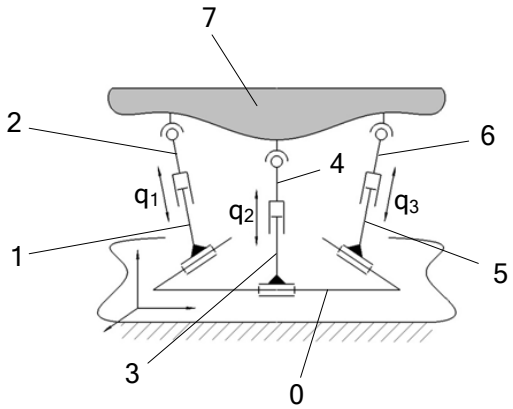


Рис. 1. Платформа

Граф представляет собой схематический рисунок, элементами которого являются *вершины* и *ребра*. Вершины соответствуют звеньям, номер вершины совпадает с номером звена (речь идет о *поименованном* графе). Ребра графа - линии, соединяющие смежные вершины, - соответствуют кинематической паре. Число ребер, соединяющих смежные вершины, совпадает с числом s - подвижностью кинематической пары. При $s>1$ ребра

называются *кратными*. На графе механизма отмечают утолщенными линиями *корневые ребра* – линии, соответствующие входам механизма.

После построения графа, зная N – число вершин, соответствующих подвижным звеньям механизма, можно проверить число обобщенных ребер (число кинематических пар механизма, где p_s – число кинематических пар s-ой подвижности)

$$P = \sum_{s=1}^{s=\mu-1} p_s ,$$

и число ребер графа (суммарное число подвижностей всех кинематических пар)

$$S = \sum_{s=1}^{s=\mu-1} s p_s .$$

С помощью количественных параметров N, P и S определяется число степеней подвижности механизма:

$$w = \mu N - \sum_{\mu=1}^{s=\mu-1} (\mu - s) p_s = \sum_{s=1}^{s=\mu-1} s p_s - \mu \left(\sum_{s=1}^{s=\mu-1} p_s - N \right) = S - \mu (P - N) = S - \mu K , \qquad (4)$$

где $K = P - N$ – *число независимых контуров графа* – замкнутых цепей, отличающихся от других цепей хотя бы одним обобщенным ребром. Данное понятие впервые ввел ученый-механик Гохман Х.И. [17].

Для разделения графа на структурные группы необходимо выделять подграфы. В окрестности вершины 0 (стойки) выделяется подграф, соответствующий структурной группе механизма.

Получим числовой признак такого подграфа. Из структурной формулы нормальной кинематической цепи, используя (4):

$$n_c = w_c = S_c - \mu K_c .$$

Откуда следует:

$$S_c - n_c = \mu K_c = \mu (P_c - N_c), \qquad (5)$$

т.е. разность между суммарным числом ребер подграфа S_c и числом корневых ребер n_c, равная числу *некорневых (тонких)* ребер, кратна *шести* (для пространственного механизма), *трем* (для плоского) или равна *нулю* при $P_c=N_c$ (для *открытой* кинематической цепи типа «дерево», где каждое ее ребро является корневым ($S_c=n_c$)).

Согласно рассматриваемой теории первоначально необходимо искать подграфы, соответствующие выполнению условия $S_c=n_c$, такие подграфы соответствуют простейшим однозвенным одноподвижным структурным группам. Когда выделены все такие варианты переходят к определению подграфов, состоящих из вершин и ребер независимых контуров.

Если в каком-нибудь независимом контуре ($К_c$=1), связанном с вершиной 0, число тонких ребер оказалось равным трем (или шести), то подграф, составленный из вершин и ребер этого контура, за исключением ранее выделенных открытых цепей типа «дерево», описывает простую структурную группу.

Если такой контур отсутствует, то следует найти два смежных контура ($К_c$=*2*), у которых число тонких ребер равно шести (или двенадцати) и т.д. Так последовательно проверяется условие (5) для всех контуров и тем самым выявляются простые структурные группы механизма.

Важно, что после выделения подграфа, состоящего из вершин и ребер независимых контуров, необходимо снова возвращаться к поиску случая подграфа, когда $S_c=n_c$. Может быть так, что к только, что выделенному подграфу следующая вершина присоединена через корневое ребро, это означает, что эта вершина и ребро присоединения являются открытой цепью типа «дерево», что требует их отдельного выделения в структурную группу.

На заключительном этапе, возможно, построить *структурный граф* механизма, в вершинах которого указывается количество звеньев в найденных простых группах и число входов, входящих в них. Порядок присоединения структурных групп к стойке указывается стрелками.

Граф механизма платформы (см. рис. 1) построен на рис. 2.

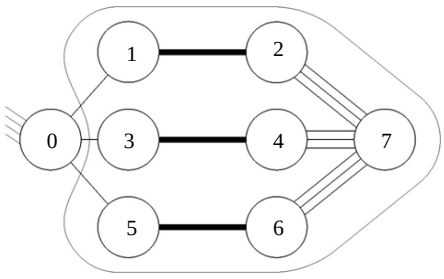


Рис. 2. Граф платформы

Граф имеет два независимых контура ($К$=2), 0-3-4-7-6-5 и 0-1-2-7-4-3-0, сам механизм нормальный ($n=w$=1), входы внутренние, заданы тремя двигателями. В этом примере нет возможности выделить однозвенную структурную группу, так как в окрестности вершины 0 нет присоединенных вершин через утолщенные ребра, все такие ребра заданы внутри графа, между вершинами 1-2, 3-4, 5-6. В контуре 0-3-4-7-6-5 число тонких ребер равно 8, что не позволят выделить вершины, входящие в этот контур в отдельную структурную группу, это противоречит условию (5). Аналогичный вывод можно сделать про контур 0-1-2-7-4-3-0. Простейшую структурную группу в этом графе можно выделить, если рассмотреть два этих контура совместно, тогда общее число ребер будет равно 12, что соответствует условию ($n=w$). Вершины, входящие в эти два контура, будут простейшей структурной группой. На рис. 3, построен структурный граф платформы. Полученная структурная группа не является структурной группой Ассура.

Структура этого механизма не подчиняется принципу Ассура [7] и соответственно он не может быть разделен по этим правилам, это удается сделать, только используя теорию графов.

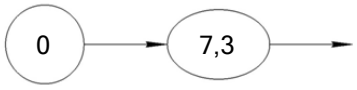


Рис. 3. Структурный граф платформы

Рассмотрим еще пример плоского механизма, в схеме которого используется много звеньев. На рис. 4 представлена схема механизма лошади Тео Янсена [18], [19], [20]. Число подвижных звеньев механизма $N=17$, количество кинематических пар $P=25$, суммарное число подвижностей всех пар $S=25$ число независимых контуров графа $K=P-N=8$, число степеней подвижности механизма $w=S-3K=1$ (механизм плоский), что совпадает с числом входов $n=1$, вход задан двигателем между звеньями 0-1. Граф механизма построен рис. 5*a*. Граф возможно разделить на простейшие структурные группы, из которых выделяется одна группа однозвенная одноподвижная и 6 групп Ассура. На рис. 5*b* построен структурный граф этого механизма.

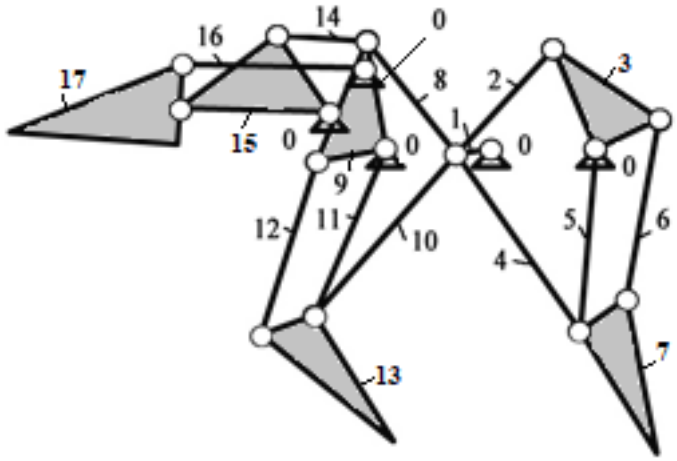
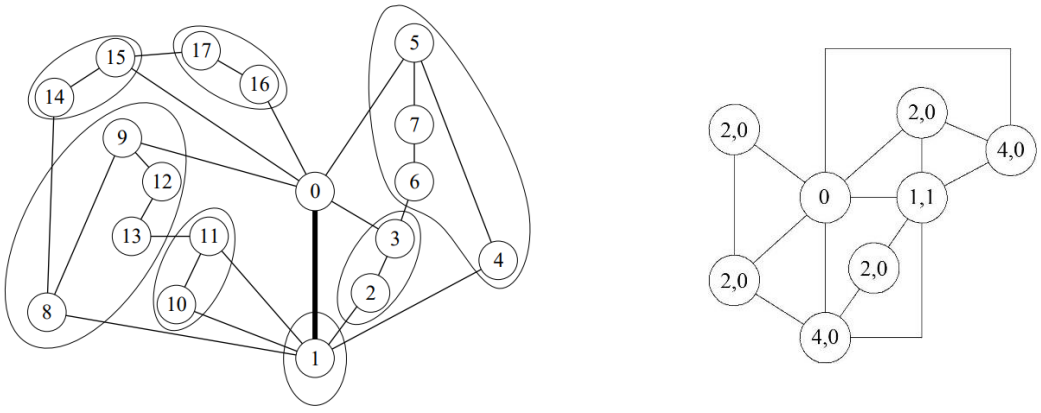


Рис. 4. Механизм лошади Тео Янсена



a) *b*)

Рис. 5. Граф и структурный граф механизма лошади Тео Янсена

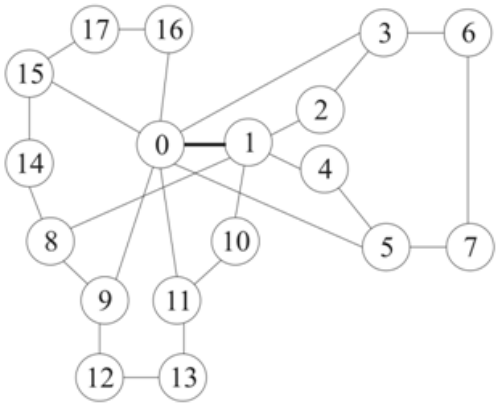


Рис. 6. Граф с «мнимыми» контурами

Очень важно строить граф механизма без пересечения ребер. Иначе может возникнуть ситуация, что плоскому механизму (рис. 4) может соответствовать неплоский граф (рис. 6), у которого на плоскости пересекаются некоторые ребра (между звеньями 8 и 1, 0 и 5), образуя «мнимые контуры».

При построении графов необходимо внимательно подходить к этому моменту и «мнимые» контуры не брать во внимание.

При этом ребра на графе не обязательно должны представлять собой прямые линии.

Обсуждение

По случаю применения теории графов в структурном анализе механизмов необходимо сделать несколько замечаний.

1. Если для механизма не выполняется условие (5) и $n \neq w$ то он называется особым. В таком механизме могут присутствовать, лишние степени свободы и избыточные связи [3]. Необходимо заметь, что в общем случае структурная формула (2) представляет собой следующую зависимость:

$$\nu - \eta = w - \mu \cdot N + \sum_{s=1}^{s=\mu-1} (\mu - s) p_s ,$$

где ν - число избыточных связей, η - число лишних степеней свободы. Эта зависимость не позволяет раздельно определить ν и η , она дает возможность найти лишь разность этих чисел. Рассмотрим пример плоского механизма с избыточными связями (рис. 7).

В этом примере число подвижных звеньев N=4, количество КП - 6, все они одноподвижные. Согласно (2) w=0, этот результат говорит нам о том, что в этом механизме звенья относительно стойки не двигаются. Однако это не так. Движение механизма возможно, при выполнении определенных условий, а именно: $OB \| CK$ и $OA \| DK$. Избыточную связь вносит наличие *4*-го звена.

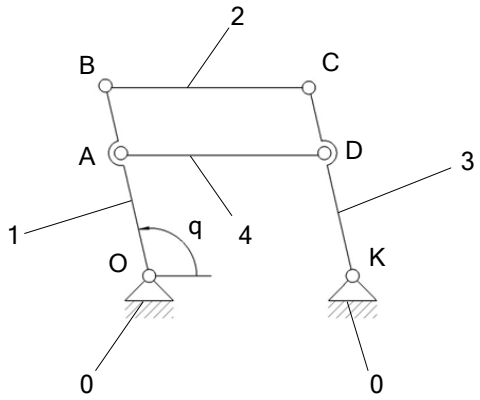


Рис. 7. Механизм с избыточными связями

Рассмотрим пример плоского механизма с лишними степенями свободы (рис. 8).

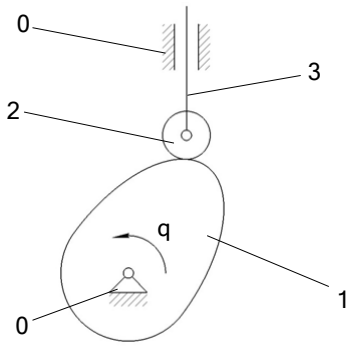


Рис. 8. Механизм с лишними степенями свободы

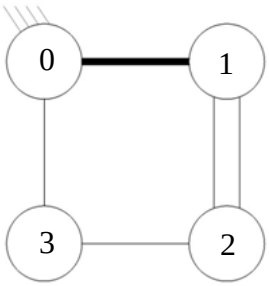


Рис. 9. Граф механизма с лишними степенями свободы

В этом примере число подвижных звеньев N=3, количество КП - 4, между звеньями 0-1, 2-3 и 3-0 одноподвижные КП, между звеньями 1-2 двухподвижные КП. Согласно (2) w=2, для движения механизма необходимо 2 входа. Практика показывает, что этот механизм будет работать при наличии одного двигателя, обозначенного координатой q. Такой механизм имеет лишнюю степень свободы, которую вносит наличие звена 2. Граф, построенный для этой схемы (рис. 9), не может быть разделен на структурные группы.

Касательно особых механизмов нельзя сделать однозначный вывод о возможности их работы, для этого потребуются дополнительные исследования по определению лишних степеней свободы и избыточных связей.

2. Механизму, содержащему совмещенный шарнир B (рис. 10a), может соответствовать несколько графов. Все зависит от того, как рассматривать соединение звеньев в шарнире B. На рис. 10b и 10c приведены граф и структурный граф для случая соединения в точке B звеньев 3-4 и 3-2. На рис. 10d и 10e приведены граф и структурный граф для случая соединения в точке B звеньев 3-4 и 2-4.

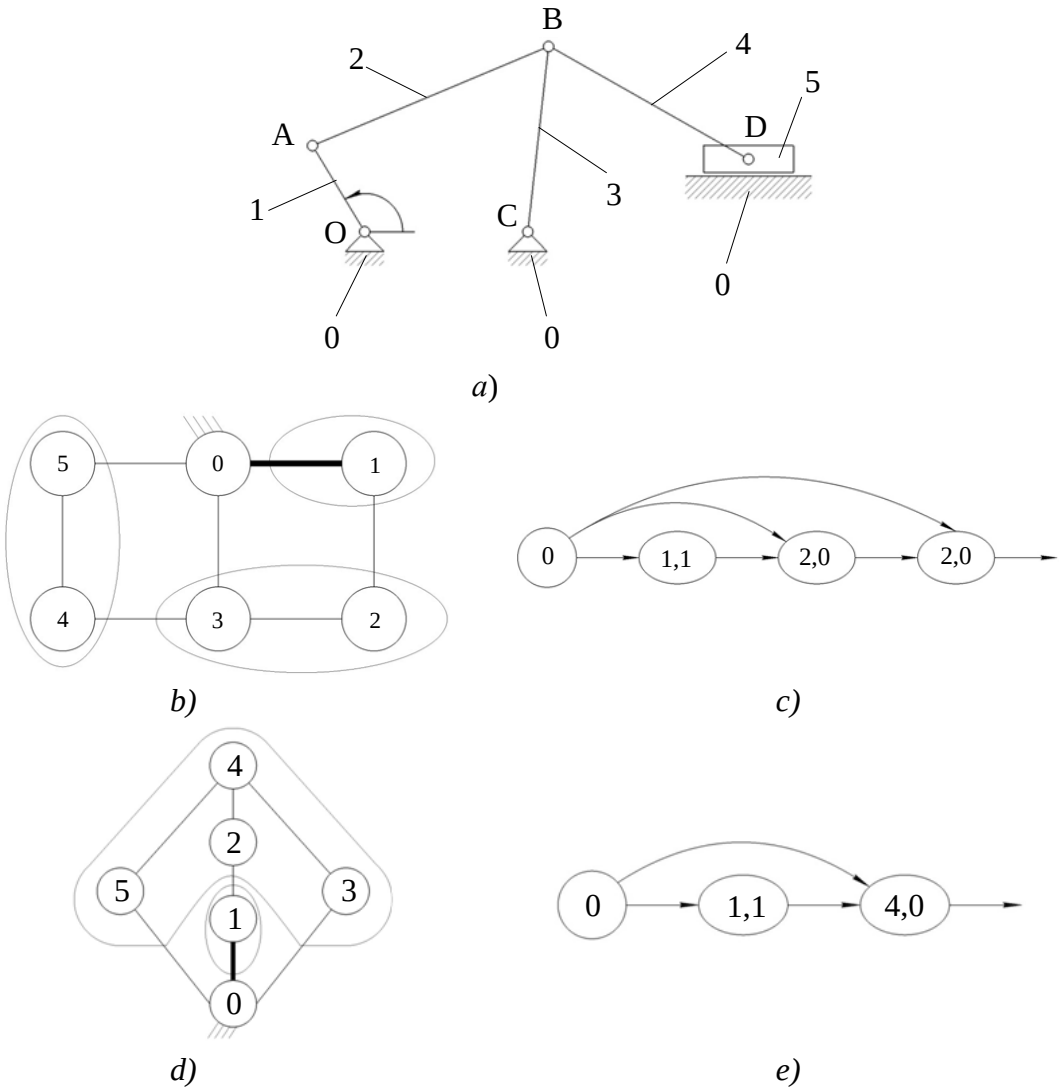
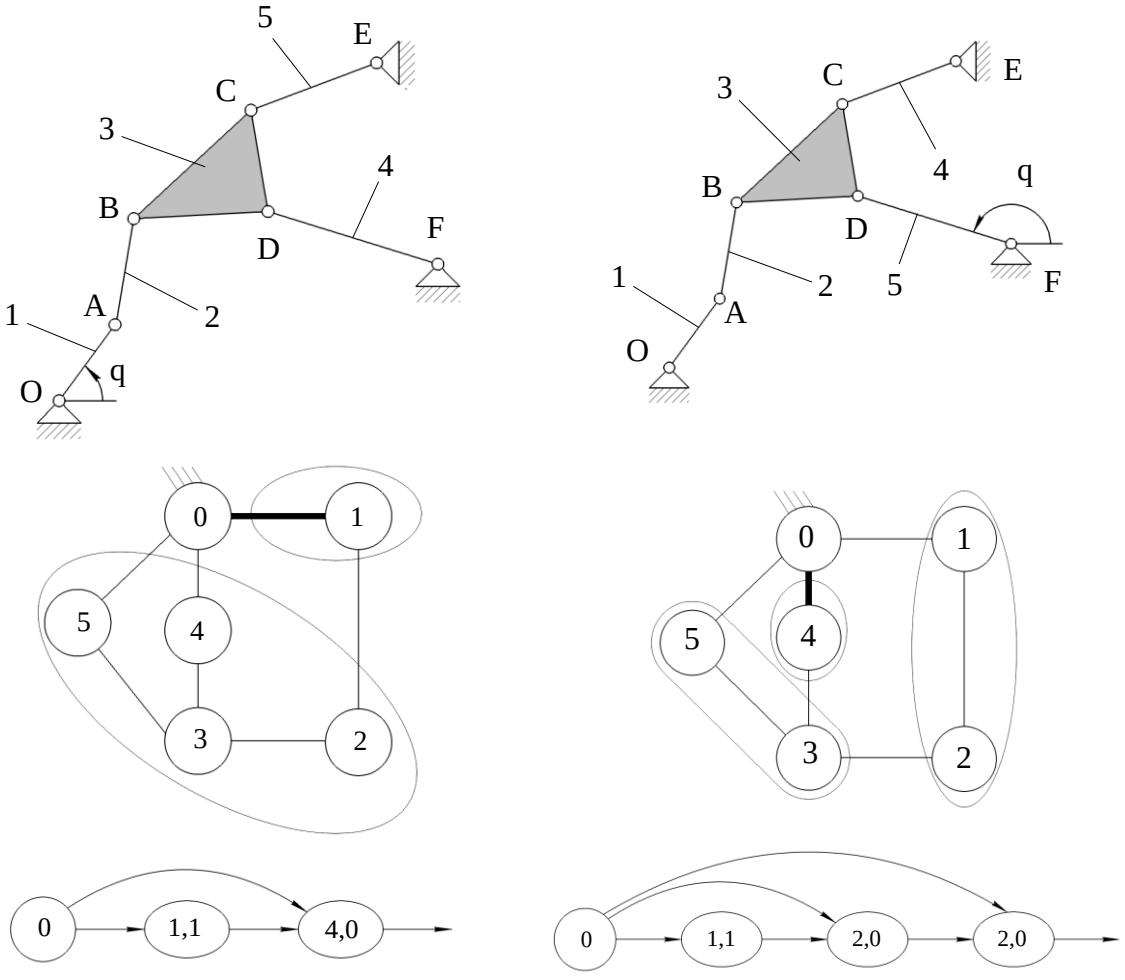


Рис. 10. Варианты структуры механизма с совмещенным шарниром

3. Иногда для упрощения анализа механизма производят его структурное преобразование, состоящее в условном переносе входов. Структурное преобразование, при котором входы и выходы меняются местами, называется структурной инверсией. При этом происходит изменение структуры механизма. Целью такого преобразования является упрощение структуры механизма, представление ее в форме, более удобной для решения той или иной задачи [9].

На рис. 11 представлен плоский механизм, если в качестве входного звена выбрать звено 1 (см. рис. 11*a*), то весь механизм разобьется на две структурные группы: однозвенную одноподвижную группу и четырехзвенную 0-подвижную. С другой стороны, если за входное звено выбрать 4, то механизм разобьется на три структурные группы: одну однозвенную одноподвижную и две двухзвенных 0-подвижных. В результате структурного преобразования удалось условно избавиться от громоздкой четырехзвенной группы.



a) *b*)

Рис. 11. Пример структурной инверсии механизма

4. Эффективным средством хранения структурной информации механизма и идентификации его групп являются матрицы:

а) *матрица смежности*, т.е. такая матрица $A=\{a_{ij}\}$, элемент которой a_{ij} равен числу ребер, соединяющих вершины с номером *i* и *j*;

б) *матрица инцидентности*, т.е. такая матрица $B=\{b_{ij}\}$, у которой элемент $b_{ij}=1$, если *i*-я вершина и *j*-ое ребро инцидентны, $b_{ij}=0$ в противном случае.

Используя эти матрицы, можно автоматизировать процесс разделения механизмов на структурные группы с помощью цифровых технологий.

Заключение

Применение элементов теории графов в вопросах исследования механических систем не ограничивается только структурным анализом. Данная теория позволяет упростить решение многих других задач курса

«Теория механизмов и машин». Использование этой теории распространяется и на разделы других технических дисциплин, в их числе логистика, схемотехника, информатика, химия, экономика и т.д. Некоторые авторы применили теорию графов в вопросах, связанных с театральными постановками [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Коловский, М. З. Основы динамики промышленных роботов / М. З. Коловский, А. В. Слоущ. М. : Наука, 1988. 240 с. : ил. (Научные основы робототехники ; №15) . ISBN 5020138932.

[2] Семенова, Н. С. Теория механизмов и машин. Исследование промышленного робота : учебное пособие / Н. С. Семенова, Ю. А. Семенов ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [Институт металлургии, машиностроения и транспорта]. Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. 52 с. : ил., табл. ; 20 см. ISBN 978-5-7422-6530-6.

[3] Структурный и геометрический анализ механизмов : методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский государственный технический университет, Кафедра теории механизмов и машин; [сост.: Ю. А. Семенов, Н. С. Семенова]. Санкт-Петербург : [б. и.], 1994. 42 с. : ил. ; 19 см.

[4] Диденко, Е. В. Разработка и анализ плоских многоконтурных механизмов на основе теории графов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.18 / Е. В. Диденко ; Институт машиноведения им. А.А Благонравова РАН (Москва). - Москва, 2019. - 23 с.

[5] Теория механизмов и машин : учебное пособие для вузов по машиностроительным специальностям / [М. З. Коловский [и др.]]. Москва : Академия, 2013. 558 с. : ил. ; 22 см. (Высшее профессиональное образование. Машиностроение) . ISBN 5769522925.

[6] Тимофеев, Г. А. Теория механизмов и машин : учеб. пособие для вузов по техн. специальностям / Г. А. Тимофеев ; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2010. 351 с. : ил. ; 21 см. (Основы наук) . ISBN 978-5-9916-0544-1. ISBN 978-5-9692-0840-7.

[7] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2 (2). С. 50-63.

[8] Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики. В 2 т. / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М. : Дрофа, 2006.

[9] Коловский, М. З.СПбГТУ. Теория механизмов и машин. Структура и кинематика механизмов : Текст лекций. СПб., 1993. 81с.
[10] Евграфов, А. Н. Вклад М. З. Коловского в теорию механизмов и машин = Contribution of M. Z. Kolovsky to theory of mechanisms and machines / А. Н. Евграфов, В. И. Каразин 10.18721/JEST.25215 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер.: Естественные и инженерные науки = St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2019. Т. 25, № 2. С. 183-191. ISSN 2542-1239.
[11] Evgrafov A., Kozlikin D. (2014) Leonid Assur (1878–1920). In: Ceccarelli M. (eds) Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science. History of Mechanism and Machine Science, vol 26. Springer, Dordrecht
[12] Кикин А. Основы анализа и синтеза плоских рычажных механизмов. Кинематика механизмов. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2017. ISBN 978-620-2-05067-8
[13] Синтез плоских рычажных механизмов на ЭВМ Кикин А.Б. монография / А. Б. Кикин ; М-во образования Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна. СПб., 2003.
[14] Grübler M. Gegtriebelehre. Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebene Mechanismen. − Berlin: Springer-Verlag, 1917
[15] Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей грюблера). часть 1. Пейсах Э.Е. Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 1 (11). С. 4-14.
[16] Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей грюблера). часть 2. Пейсах Э.Е. Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. № 2 (12). С. 3-17.
[17] Артоболевский, И. И. Леонид Владимирович Ассур : (1878-1920) / И. И. Артоболевский, А. Н. Боголюбов. М. : Наука, 1971. 261, [4] с., [4] л. портр., ил., факс. : ил. ; 20 см.
[18] Shunsuke Nansai, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase, Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism, Procedia Engineering, Volume 64, 2013, Pages 1562-1571, ISSN 1877 7058, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.238.
[19] Jansen, T, Theo Jansen: The Great Pretender, Netherlands: 010 Uitgeverij, 2007
[20] 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 In: Mechanisms and Machine Science, 2022, 108 MMS, pp. 141–149
[21] Zawislak, S., & Kopec, J. (2018). Theatre, love and graphs. Paper presented at the 17th Conference on Applied Mathematics, APLIMAT 2018 - Proceedings, 2018-February 1100-1111.

P. A. Andrienko, A.N. Evgrafov, D.P. Kozlikin, Y.A. Semenov,
N.S. Semenova

APPLICATION OF GRAPH THEORY ELEMENTS FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF MECHANISMS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers the method of separation of mechanisms into structural groups, which uses the section of the discrete mathematics and the theory of graphs. Presented method is used as an educational material and it is included into the “Theory of mechanisms and machines” course, which is taught to students of technical specialities in Saint-Petersburg State Polytechnic University of Peter the Great.

Key words: structural analysis, degree of freedom, kinematic pairs, theory of graphs, kinematic chain, degree of mobility of mechanism, Assur group

REFERENCES

[1] Kolovsky M.Z., Slousch A.V. (1988) *Osnovy dinamiki promyshlennyh robotov*[Basic Principles of Industrial RobotsDynamics], Moscow: Nauka Publishing, 240 p.ISBN 5020138932. (in Russian)

[2] Semenova N.S., Semenov Y.A. (2019) Teorija mehanizmov i mashin. Issledovanie promyshlennogo robota: uchebnoe posobie [The Theory of Mechanisms and Machines. Industrial Robot Research: Study Guide],Saint-Petersburg:Saint-Petersburg State Polytechnic University of Peter the Great, POLITEH-PRESS, 52 p.ISBN 978-5-7422-6530-6. (in Russian)

[3] Semenov Y.A., Semenova N.S. (1994) Strukturnyj i geometricheskij analiz mehanizmov: metodicheskie ukazanija k prakticheskim zanjatijam [Structural and GeometryAnalysis of Mechanisms: Methodology Guidlines for Practical Exercises], Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Polytechnic University of Peter the Great,42 p. (in Russian)

[4] Didenko E.V. (2019) Razrabotka i analiz mnogokonturnyh mehanizmov na osnove teorii grafov[Multi-loop Mechanisms Development and Analysis on the basis of the Graph Theory](PhD Thesis),Moscow: Mechanical Engineering ResearchInstitute of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)

[5] Teoriya mekhanizmov i mashin : uchebnoe posobie dlya vuzov po mashinostroitel'nym special'nostyam / [M. Z. Kolovskij [i dr.]]. Moskva :

Akademiya, 2013. 558 s. : il. ; 22 sm. (Vysshee professional'noe obrazovanie. Mashinostroenie) . ISBN 5769522925. (in Russian)
[6] Timofeev, G. A. Teoriya mekhanizmov i mashin : ucheb. posobie dlya vuzov po tekhn. special'nostyam / G. A. Timofeev ; Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N. E. Baumana. 2-e izd., pererab. i dop. M. : YUrajt, 2010. 351 s. : il. ; 21 sm. (Osnovy nauk) . ISBN 978-5-9916-0544-1. ISBN 978-5-9692-0840-7. (in Russian)
[7] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometrical and kinetostatic analysis of flat lever mechanisms of the second class. // Theory of Mechanisms and Machines. 2003. Т. 1. № 2 (2). С. 50-63. (in Russian)
[8] Lojcjanskij L.G., Lur'e A.I.(2006) Kurs teoreticheskoj mehaniki: uchebnoe posobie dlja vuzov [Theoretical Mechanics course: Study Guide for Graduate Students], Moscow: Drofa. (in Russian)
[9] Kolovsky M.Z. (1993) Teorija mehanizmov i mashin. Struktura i kinematika mehanizmov: Tekst lekcij [The theory of Mechanisms and Machines. Structure and Kinematics of Mechanisms: Lecture Texts], Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Polytechnic University, 81p. (in Russian)
[10] Evgrafov A.N., Karazin V.I. (2019) Vklad M.Z. Kolovskogo v teoriju mehanizmov i mashin [Contribution of M. Z. Kolovsky to theTheory of Mechanisms and Machines], 10.18721/JEST.25215, Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki [St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology], Saint-Petersburg State Polytechnic University of Peter the Great,25(2)183-191. ISSN 2542-1239. (in Russian)
[11] Evgrafov A.N., Kozlikin D.P. (2014) Leonid Assur (1878–1920). In: Ceccarelli M. (eds) Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science. History of Mechanism and Machine Science, vol 26. Springer, Dordrecht.
[12] Kikin A.B. (2017) Osnovy analiza i sinteza ploskih rychazhnyh mehanizmov. Kinematika mehanizmov [Fundamentals of Analysis and Synthesis of Flat Linkage Mechanisms. Kinematics of Mechanisms], LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN 978-620-2-05067-8. (in Russian)
[13] Kikin A.B. (2003) Sintez ploskih rychazhnyh mehanizmov na JeVM [Flat Linkage Mechanisms Synthesis on Computers], Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Technology and Design University, Russian Federation Ministry of Education. (in Russian)
[14] Grübler M. (1917) Gegtriebelehre. Eine Theorie des Zwanglaufes und der ebene Mechanismen, Berlin: Springer-Verlag. (in German)
[15] Pejsah E.E. (2008) Strukturnyj sintez zamknutyh kinematicheskih cepej (cepej Grjublera)[Structural Synthesis of Closed Kinematic Chains (Grübler Chains)], Teorija mehanizmov i mashin [The Theory of Mechanisms and Machines],vol 6, no 1 (11), pp. 4-14. (in Russian)

[16] Pejsah E.E. (2008) Strukturnyj sintez zamknutyh kinematicheskih cepej (cepej Grjublera) [Structural Synthesis of Closed Kinematic Chains (Grübler Chains)], Teorija mehanizmov i mashin [The Theory of Mechanisms and Machines], vol 6, no 2 (12). pp. 3-17. (in Russian)
[17] Artobolevskii I.I., Bogolyubov A.N. (1971) Leonid Vladimirovich Assur: (1878-1920), Moscow: Nauka Publishing. (in Russian)
[18] Shunsuke Nansai, Mohan Rajesh Elara, Masami Iwase (2013) Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism, Procedia Engineering,vol 64,pp. 1562-1571, ISSN 1877 7058,Available at: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.238 (accessed 25 March 2020).
[19] Jansen T. (2007) Theo Jansen: The Great Pretender, Netherlands: 010 Uitgeverij.
[20] 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 In: Mechanisms and Machine Science, 2022, 108 MMS, pp. 141–149
[21] Zawislak, S., & Kopec, J. (2018). Theatre, love and graphs. Paper presented at the 17th Conference on Applied Mathematics, APLIMAT 2018 - Proceedings, 2018-February 1100-1111.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

П.А. Андриенко[1], В.И. Каразин[2], Д.П. Козликин[3], В.А. Терешин[4],
А.В. Хисамов[5], И.О. Хлебосолов[6]

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТЕНДА ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

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

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

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

[4]Валерий Алексеевич Терешин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-48-45, E-mail: terva@mail.ru

[5]Хисамов Андрей Владимирович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: andrey@khis.ru.

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

Аннотация

В работе рассмотрен вопрос возможности создания стенда гармонических колебаний, с широким диапазоном воспроизводимого воздействия по частоте, амплитуде и ускорению. Для задания широкого диапазона воздействий используются свойства сжатого воздуха в системе «поршень-цилиндр».

Ключевые слова: механические колебательные системы, стенд испытательных воздействий, сжатый воздух, пневмоцилиндр.

Введение

Статья посвящена востребованной теме, которая актуальна в течение последнего полувека. Связана с проведением лабораторных испытаний на всех стадиях отработки экспериментальных образцов и макетов [1-9]. Авторы статьи уже долгие годы занимаются разработкой и изготовлением уникального испытательного оборудования для воспроизведения параметров движения объектов испытания по заданиям промышленности, в основном это испытательные и градуировочные центрифуги [10-12].

Для некоторых видов объектов испытания не достаточно проводить испытания только в поле центробежных сил. Для таких случаев испытания проводят с использованием дополнительных стендов и устройств, способных создавать необходимое воздействие.

В статье рассматривается математическая модель стенда, в котором задается гармоническое испытательное воздействие с использованием свойств сжатого воздуха. Составленная математическая модель применяется к опытным результатам, полученным на сконструированном макете.

Постановка задачи и решение

Испытательное воздействие в виде затухающих гармонических колебаний можно воспроизводить множеством разных способов. Все варианты имеют одну физическую основу, суть которой в том, что масса располагается в среде, обеспечивающей устойчивое равновесие. При ее

смещении в ту или другую сторону возникает восстанавливающая сила. Колебания в этих системах осуществляется на частотах свободных колебаний.

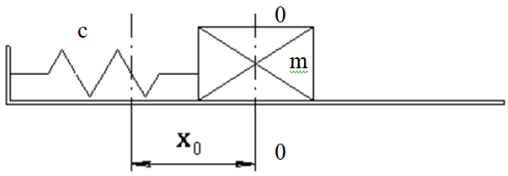


Рис. 1. «Масса на пружинах»

Дифференциальное уравнение задачи о свободных колебаниях (рис. 1), при использовании упругих элементов с линейной характеристикой например, цилиндрических пружин имеет классический вид:

$$m\ddot{x} + cx = 0$$

Решение которого [13] записывается в следующей форме:

$$x = \frac{\dot{x}_0}{k}\sin(kt) + x_0\cos(kt)$$

При соответствующем задании начального положения объекта испытаний x_0, относительно положения равновесия «0 - 0» (рис. 1), его движение будет определяться выражением:

$$x = x_0\cos(kt) \qquad (1)$$

Взяв дважды производную по времени, получим выражения для определения скорости и ускорения объекта соответственно:

$$\dot{x} = -x_0 k\sin(kt)\ \ddot{x} = -x_0 k^2\cos(kt) \qquad (2)$$

Откуда амплитудное значение воспроизводимого ускорения:

$$\ddot{X}_{\max}(x_0, k) = x_0 \cdot k^2 \qquad (3)$$

Как видно значение ускорения зависит от величины начального смещения x_0 и частоты свободных колебаний k. После решения уравнения движения появляется возможность построить поверхность параметров $\ddot{X}_{\max}(x_0, k)$ (см. рис. 2) воспроизводимых на стенде. Например для значений ускорения $\ddot{X}_{\max}$ от 2000 до 5000 $м/с^2$, частоты k от 10 до 40 $Гц$ и амплитуды перемещения x_0 от 0,01 до 0,5 $м$.

Проекция построенной поверхности на плоскость «амплитуда-частота», определит все те сочетания амплитуд и частот, при которых обеспечивается заданный диапазон амплитуд ускорений (рис. 3).

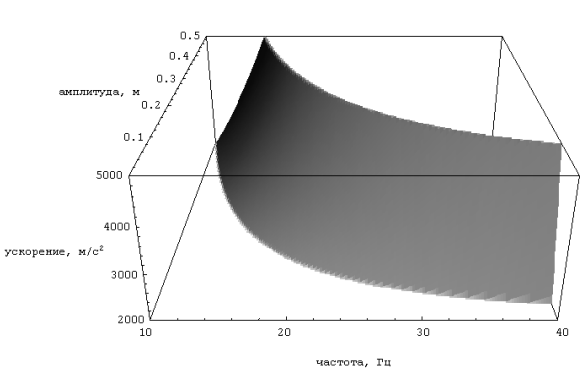


Рис. 2. Поверхность параметров ускорение-амплитуда-частота

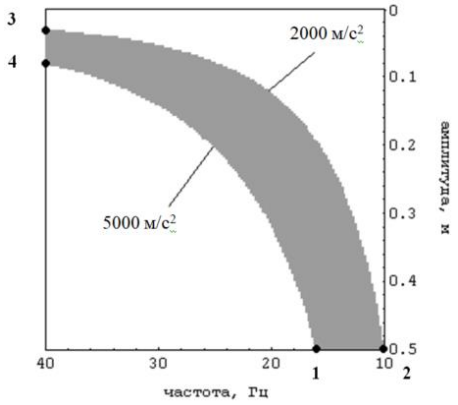


Рис. 3. Область ограничения возможности воспроизведения параметров

Как известно, величина k определяется постоянными параметрами системы c и m. Изменение этих параметров, при использовании цилиндрических пружин, довольно трудоемкая задача. Может сложиться ситуация при которой будет невозможно воспроизвести заданный диапазон испытательного воздействия. В этом случае представляется интересным рассмотреть вариант использования в качестве упругого элемента воздух, изменение характеристик которого осуществляется достаточно просто.

Уравнение свободных колебаний перепишется в следующем виде:

$$m\ddot{x} + F_1(x) + F_2(x) = 0 \qquad (4)$$

где $F_1(x)$ и $F_2(x)$ - упругие характеристика воздуха, находящегося в левой и правой части цилиндра соответственно (см. рис. 4).

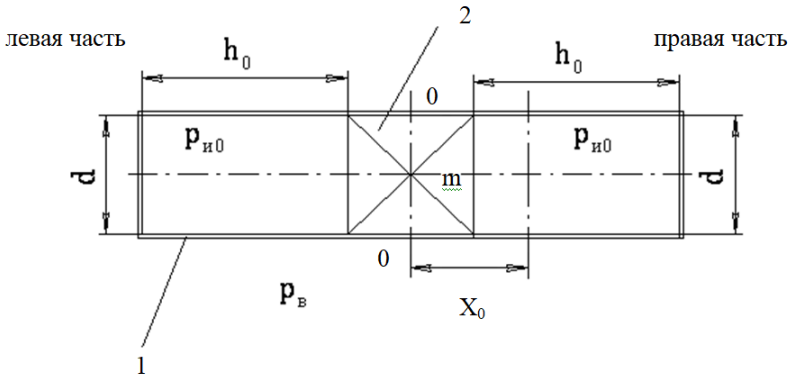


Рис. 4. «Масса на пневматических пружинах»

В общем виде упругую характеристику пневматической пружины можно представить в форме:

$$F(x) = S_П\left[\frac{p_{a0}V_0^{\gamma}}{(V_0 - S_П x)^{\gamma}} - p_в\right]$$

где $S_П$ - площадь поршня (см. рис. 5); V_0 - начальный объем цилиндра; γ - показатель политропы; $p_в$ - внешнее давление; $p_{а0}$ - начальное абсолютное давление в цилиндре:

$$p_{а0} = p_{и0} + p_в,$$

где $p_{и0}$ - начальное избыточное давление воздуха.

Замечая, что $V_0 = S_П h_0$, где h_0 - начальная высота столба воздуха, получаем:

$$F(x) = S_П \left[\frac{p_{и0} + p_в}{(1 - \frac{x}{h_0})^\gamma} - p_в \right] \qquad (5)$$

Площадь поршня:

$$S_П = \pi \frac{d^2}{4}$$

где d - диаметр поршня.

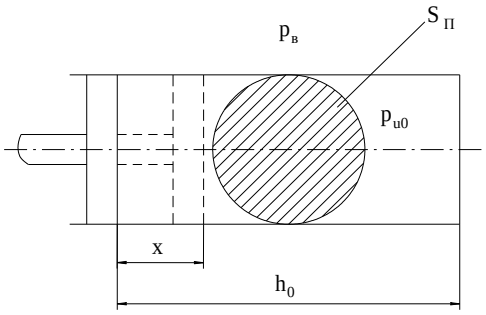


Рис. 5. Схема «Цилиндр-поршень»

Для левой и правой части цилиндра согласно (5):

$$F_1(x) = S_П \left[\frac{p_{и0} + p_в}{(1 - \frac{x}{h_0})^\gamma} - p_в \right] \quad F_2(x) = -S_П \left[\frac{p_{и0} + p_в}{(1 - \frac{-x}{h_0})^\gamma} - p_в \right] \qquad (6)$$

Подставляя (6) в (4), окончательно запишем дифференциальное уравнение свободных колебаний:

$$m\ddot{x} + S_П \left[\frac{p_{и0} + p_в}{(1 - \frac{x}{h_0})^\gamma} - p_в \right] - S_П \left[\frac{p_{и0} + p_в}{(1 - \frac{-x}{h_0})^\gamma} - p_в \right] = 0 \qquad (7)$$

Как видно из (6), регулировку упругих характеристик пневматической пружины возможно осуществить путем изменения

давления p_{u0} и начальной высоты столба воздуха h_0. В начальный момент времени считается, что в обеих частях создается одинаковое давление.

Амплитуда колебаний, как и в случае использования упругих элементов с линейной характеристикой (см. рис. 1), задается начальным смещением поршня цилиндра из положения равновесия на требуемую величину x_0. Отпуская объект испытаний из этого положения, возбуждаем его колебательное движение. Для определения параметров этого колебательного движения, а также выбора конструктивно-компановочных размеров стенда необходимо решить уравнение (7).

Данное уравнение нелинейно, его решение возможно найти численными методами, однако оно не позволит достаточно четко представить возможное влияние параметров стенда на воспроизводимое им воздействие. Поэтому предлагается применить приближенные аналитические методы, например метод гармонического баланса.

Разложим упругие характеристики левой и правой части цилиндра в ряд Тейлора в окрестности $x_0 = 0$, с сохранением всех членов разложения вплоть до восемнадцатой степени. Чем больше степень разложения, тем точнее описываются нелинейные характеристики (6). Далее, пользуясь методом гармонического баланса, представим, что решение уравнения движения с разложенными характеристиками:

$$m\ddot{x} + b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + ... + b_{17} x^{18} + d_0 + d_1 x + d_2 x^2 + ... + d_{17} x^{18} = 0 \qquad (8)$$

мало отличается от гармонического решения вида:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos(k_1 t) + a_2 \sin(k_1 t) \qquad (9)$$

Подставив (15) в (14), приравниваем к нулю постоянные составляющие, а также коэффициенты при $\cos(k_1 t)$ и $\sin(k_1 t)$, откуда определим a_0, a_1 и a_2. Вычисления показали, что $a_0 = 0$ и $a_2 = 0$, а величина амплитуды a_1 связана с частотой свободных колебаний k_1. Эта связь достаточно громоздкая, приведем ее в сокращенной форме:

$$k_1(a_1) = \sqrt{\frac{d^2 \pi \gamma}{2 h_0 m}(p_в + p_{uo}) + \frac{a_1^2 d^2 \pi \gamma}{h_0^3 m}\left(\frac{p_в}{8} + \frac{p_{uo}}{8} + \frac{3 p_в \gamma}{16} + \frac{3 p_{uo} \gamma}{16} + \frac{p_в \gamma^2}{16} + \frac{p_{uo} \gamma^2}{16}\right)} + ... \qquad (10)$$

Приведенное соотношение выражает характерную особенность свободных колебаний в нелинейной системе. Вид этой зависимости представлен на рис. 6.

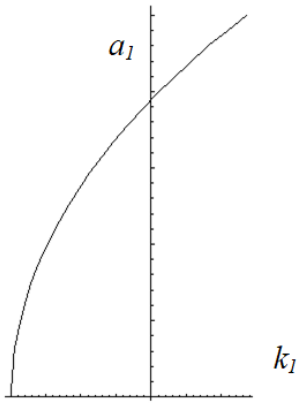


Рис. 6. Скелетная кривая

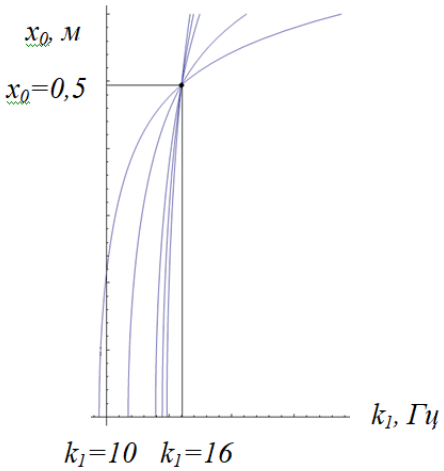


Рис. 7. Скелетная кривая

Окончательно решение примет вид:

$$x(t) = a_1 \cos(k_1 t) \qquad (11)$$

где a_1 - амплитуда перемещения, аналог параметра x_0 в выражении (1); k_1 - частота свободных колебаний, согласно (10) определяется подвижной массой m, амплитудой a_1, давлениями p_{u0} и $p_в$, а также набором параметров цилиндра h_0 и d. В дальнейшем примем $\gamma = 1$.

Для определения ускорения необходимо взять дважды производную от (11) по времени:

$$\ddot{x}(t) = -a_1 k_1^2 \cos(k_1 t) \qquad (12)$$

Откуда модуль амплитуды ускорения:

$$\ddot{X}_{\max} = a_1 k_1^2 . \qquad (13)$$

Выражения (12) и (13) и полученные ранее выражения (2) и (3) имеют схожий вид. Точки 1-4 (рис. 2) определяют граничные значения заданного диапазона параметров воспроизведения, а следовательно конструктивно-компановочные размеры стенда.

Проанализируем их при следующих постоянных параметрах стенда: $m = 50кг$, $d = 320мм$, $p_в = 1 \cdot 10^5 Па$ и предположим, что процесс испытания происходит по изотерме, $\gamma = 1$. В итоге задача сводится к определению величины h_0 из выражения (10), при заданном значении частоты k_1 и разных начальных избыточных давлениях p_{u0}, а также решения уравнения (8), а именно определения амплитуды ускорения $\ddot{X}_{\max}$, при полученном параметре h_0.

Расчеты показали, что при малой разнице между начальной высотой столба воздуха h_0 и начальным смещением x_0 проявляется нелинейность рассматриваемой системы. Получаемые амплитудные значения ускорения превышают желаемые. Границу нелинейности можно условно указать следующим неравенством, система проявляет нелинейность если:

$$\frac{h_0}{x_0} < 2$$

На рис. 7 показано семейство скелетных кривых построенных по выражению (10) для случая соответствующего точке номер 1 номограммы рис. 3. С увеличением h_0 скелетная кривая приближается к вертикали, что характеризует решаемую задачу как линейную, для которой с определенной вероятностью справедливы зависимости (1), (2) и (3).

Для реализации всего заданного диапазона параметров, согласно номограмме (рис. 3) достаточно задаться значением высоты столба воздуха h_0, причем максимальное значение этого параметра определяется точками 1 и 2 (воспроизведение максимальных амплитуд на низких частотах). Исходя из этого, наибольшее значение h_0 в стенде принято равным 1 м.

С позиции прочности стенда целесообразно работать при низких давлениях. Как показывают расчеты, в случае проведения испытаний на высоких частотах и низких амплитудах с увеличением h_0 растет значение необходимого давления p_{u0}. Это значит, что нет необходимости получать все воспроизводимые воздействия при одинаковом h_0. В стенде предусмотрена возможность изменения этой величины, путем изменения рабочего объема V_0.

Эксперимент

Для подтверждения составленной математической модели был изготовлен макет стенда и проведен эксперимент. Задача эксперимента сформулирована следующим образом:

- оценить возможность получения заданного испытательного воздействия;
- проверить соответствие экспериментальных данных с результатами, полученными в ходе рассмотрения математической модели.

Эксперимент проводился в 5 этапов. Исходные данные приведены в таблице 5.

Таблица 1. Значения для проведения эксперимента

№ опыта	Ри1, атм. избыточное давление в правой части цилиндра	Ри2, атм., избыточное давление в левой части цилиндра
1	1	11
2	20	10
3	30	20
4	40	30
5	5	20

В ходе эксперимента получены зависимости, которые были обработаны. На рис. 8 построены результаты первого опыта. Также из

эксперимента получен коэффициент характеризующий диссипативные свойства системы, его среднее значение получилось равным $n = 8,77$. Параметр n определяется исходя из логарифмического декремента колебаний по полученным зависимостям:

$$\delta = nT = \ln \frac{a_i}{a_{i+1}}$$

где T - период колебаний;

a_i и a_{i+1} - две последовательные амплитуды.

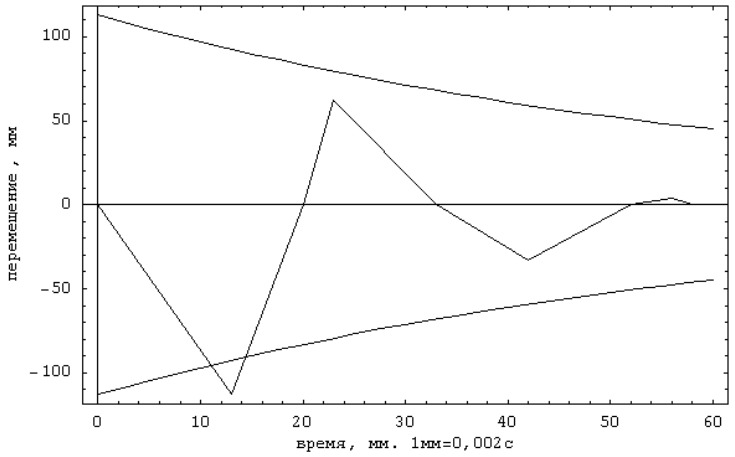


Рис. 8. Пример построенных результатов опыта №1

По полученным экспериментальным и теоретическим данным составлена таблица значений результатов.

Таблица 2. Эксперимент и теория

Опыт 1	Эксперимент	Расхождение	Теория
Частота колебаний, Гц	19,6	13,3 %	17
Амплитуда колебаний, м	0,115	2,5 %	0,118
Опыт 2	Эксперимент	Расхождение	Теория
Частота колебаний, Гц	23,8	30,7 %	16,5
Амплитуда колебаний, м	0,078	2,7 %	0,076
Опыт 3	Эксперимент	Расхождение	Теория
Частота колебаний, Гц	17	15,8 %	20,2
Амплитуда колебаний, м	0,06	25 %	0,045
Опыт 4	Эксперимент	Расхождение	Теория
Частота	28,5	17,5 %	23,5

колебаний, Гц			
Амплитуда колебаний, м	0,034	29,4 %	0,024
Опыт 5	Эксперимент	Расхождение	Теория
Частота колебаний, Гц	16,8	12,5 %	19,2
Амплитуда колебаний, м	0,13	3,8 %	0,125

Заключение

Как можно видеть система «масса на пневматических пружинах» вполне работоспособна. Результаты теоретического расчета и эксперимента с определенной долей погрешности совпадают. Это означает, что математическая модель способна предсказать поведение системы при проведении испытаний на заданных режимах воспроизведения параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Самсонов Л.М., Каляев А.К., Марков А.В. и др. Ротационные методы испытаний приборных устройств / М.: Машиностроение, 1981. - 135 с.: ил.; 22 см.

[2] Ксенофонтов В.И., Николаев В.Н, Чернокрылов С.Ю. Динамический стенд многофункционального назначения. // Испытательные и поверочные стенды. – Л.: ЛГТУ. - 1992. с. 29 – 32.

[3] Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Клюева. –М.: Машиностроение, 1982. – Кн.1, 1982. - 528 с.

[4] Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. /Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. - Т.5. Измерения и испытания /Под ред. М.Д.Генкина, 1981. – 496 с.

[5] Popov, A.N., Polishchuck, M.N., Reshetov, D.V. Test Centrifuge Rotor Balancing Based on 3D Model. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, p. 97–107.

[6] Polishchuck, M.N., Popov, A.N., Reshetov, D.V. Mathematical Model of Shock Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, p. 86–96.

[7] Popov, A.N., Polishchuck, M.N., Pulenets, N.Y. Test centrifuge arrangement analysis. (2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, p. 139-151.

[8] Yang Wenbo, Qian Zhihao, Tu Jiulin, Zhou Ziyang, Yan Qixiang, Fang Yong, He Chuan . Centrifuge modelling of ground-borne vibrations

induced by railway traffic in underground tunnels, 2022, Earthquake Engineering and Engineering Vibration 21(2), pp. 517-528.
[9] Yang, Y., Hu, X. Measuring and balancing dynamic unbalance of precision centrifuge (2009) Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 7133. vol.
[10] Some ways of stable counterbalancing in the respect of moving masses on centrifuges. Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Tereshin V.A., Khlebosolov I.O. Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Evgrafov A., (ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2017, p.73-85.
[11] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. Some characteristics of linear acceleration reproduction with flexible harmonical component (2018) Lecture Notes in Mechanical Engineering, PartF5, pp. 71-81.
[12] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. Centrifuges for variable accelerations generation (2017) International Review of Mechanical Engineering, 11 (5), pp. 280-285.
[13] Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1980. - 272 с.

P.A. Andrienko, V.I. Karazin, D.P. Kozlikin, V.A. Tereshin,
A.V. Khisamov , I.O. Khlebosolov

RESEARCH AND MODELLING OF A FLUCTUATING LINEAR ACCELERATION STAND

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers the possibility of creating a stand of harmonic vibrations with a wide range of reproducible effects in frequency, amplitude and acceleration. The properties of compressed air in the "piston-cylinder" system are used to set a wide range of effects.

Key words: mechanical vibrating systems, test bench, compressed air, pneumatic cylinder.

REFERENCES

[1] Samsonov L.M., Kalyaev A.K., Markov A.V. et al. Rotational Methods of Testing Instrument Devices / M.: Mashinostroenie, 1981. - 135 p. : or; 22 cm (rus.)

[2] Ksenofontov V.I., Nikolaev V.N., Chernokrylov S.Yu. Multifunctional dynamic stand // Testing and control stands. – L.: LGTU. - 1992. p. 29 – 32. (rus.)

[3] Test Equipment Handbook. In 2 books /Ed. V.V.Klyueva, Moscow: Engineering, 1982, Book 1, 1982, 528 p. (rus.)

[4] Vibration technique. Directory in 6 Vols. /Ed. Tip: V.N.Chelomei (chairman), Moscow: Engineering, 1981, V. 5. Measuring and testing /Ed. M.D. Genkin, 1981, 496 p. (rus.)

[5] Popov, A.N., Polishchuck, M.N., Reshetov, D.V. Test Centrifuge Rotor Balancing Based on 3D Model. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, p. 97–107.

[6] Polishchuck, M.N., Popov, A.N., Reshetov, D.V. Mathematical Model of Shock Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022, p. 86–96.

[7] Popov, A.N., Polishchuck, M.N., Pulenets, N.Y. Test centrifuge arrangement analysis. (2019) Lecture Notes in Mechanical Engineering, p. 139-151.

[8] Yang Wenbo, Qian Zhihao, Tu Jiulin, Zhou Ziyang, Yan Qixiang, Fang Yong, He Chuan . Centrifuge modelling of ground-borne vibrations induced by railway traffic in underground tunnels, 2022, Earthquake Engineering and Engineering Vibration 21(2), pp. 517-528.

[9] Yang, Y., Hu, X. Measuring and balancing dynamic unbalance of precision centrifuge (2009) Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 7133. vol.

[10] Some ways of stable counterbalancing in the respect of moving masses on centrifuges. Karazin V.I., Kozlikin D.P., Sukhanov A.A., Tereshin V.A., Khlebosolov I.O. Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Evgrafov A., (ed.). Springer International Publishing Switzerland, 2017, p.73-85

[11] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. Some characteristics of linear acceleration reproduction with flexible harmonical component (2018) Lecture Notes in Mechanical Engineering, PartF5, pp. 71-81.

[12] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Kozlikin, D.P., Khlebosolov, I.O. Centrifuges for variable accelerations generation (2017) International Review of Mechanical Engineering, 11 (5), pp. 280-285.

[13] Panovko YaG (1980) Introduction to mechanical vibrations. Moscow: Science. 272 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Е. Н. Куц[1], В.И. Пожбелко [2]

НОВЫЙ МЕТОД СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МНОГОКОНТУРНЫХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ СО СЛОЖНЫМИ ШАРНИРАМИ

[1]Екатерина Николаевна Куц,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: +7 (351)267-9742, E-mail: ekaterina.n.kuts@gmail.com.

[2] Владимир Иванович Пожбелко,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
Тел.: +7 (351)267-9291, E-mail: pozhbelkovi@susu.ru.

Аннотация

В работе представлен новый метод структурного синтеза всего возможного многообразия многоконтурных рычажных механизмов, выполняемый на основе заданных разнообразных сборок сложных шарниров. В результате применения данного метода впервые построен полный атлас, содержащий 51 структуру трехконтурных кинематических цепей, включая 7 новых кинематических цепей. На основе синтезированных новых цепей создано 50 одноподвижных 8-звенных рычажных механизмов для дальнейшего возможного использования в разных областях техники.

Ключевые слова: структурный синтез, механизм, сложный шарнир

Введение

Разнообразные рычажные механизмы со сложными шарнирами [13] эффективно применяются в современных областях техники [2,4,7], но недостаточно изучены в теории механизмов и машин. В связи с тем, что задача структурного синтеза таких механических систем, с одной стороны,

является более сложной по сравнению с традиционной задачей синтеза механизмов только с простыми шарнирами [1, 3, 5, 6, 8], так как содержит дополнительные искомые параметры различных сложных шарниров, но с другой стороны, именно, за счет этих дополнительных структурных параметров увеличивается массив синтезируемых рычажных механизмов.

В современных работах для структурного синтеза кинематических цепей многозвенных механизмов широко применяются такие методы как теория графов [9, 10], матрицы смежности [15], теория групп и др. [16], но данные методы не позволяют установить все возможное многообразие механизмов со сложными шарнирами.

Таким образом, возникает необходимость разработки новых методов структурного синтеза многоконтурных рычажных механизмов.

Целью данной работы является разработка метода структурного синтеза разнообразных рычажных механизмов с учетом применения в их строении всего возможного многообразия сложных шарниров: (а) различной кратности; (б) разного количества; (в) всех видов их сборок.

Основные понятия и структурное представление механизмов со сложными шарнирами

Для структурного синтеза всего возможного массива многоконтурных структур со сложными шарнирами применим согласно «Единой теории структуры механических систем» [14] следующие основные понятия и соотношения:

1. Кратность сложного шарнира (j) во всем диапазоне $2 \le j \le j_{\max}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$j = n' - 1, \tag{1}$$

где $n' \ge 3$ – число собираемых на оси данного шарнира рычажных звеньев.

Возможные варианты образования сложных шарниров показаны на рис.1. Например, сложный шарнир, соединяющий три двухшарнирных звена, обозначен – j_2 (222), сложный шарнир, соединяющий два двухшарнирных звена и одно трехшарнирное звено – j_2 (223) и т.д.

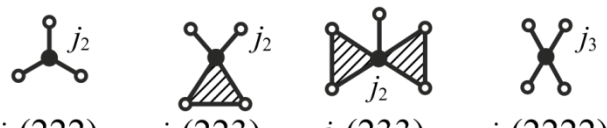


Рис. 1. Варианты образования сложных шарниров для синтеза многоконтурных механизмов

2. Ассортимент (набор) многошарнирных звеньев [LA] в многозвенной замкнутой цепи механизма:

$$[LA] = [n_2, n_3, n_4, \ldots, n_{i\max}]. \tag{2}$$

где $i \geq 2$ – число шарниров на рычажном звене; n_2, n_3, n_4, …, n_i – число многошарнирных звеньев, образующих в данной цепи K взаимно независимых замкнутых контуров, отличающихся друг от друга в данной кинематической цепи хотя бы одним звеном.

3. Ассортимент (набор) сложных шарниров [*MJA*] в цепи механизма:

$$[MJA] = [v_2 \cdot v_3 \cdot v_4 \cdot \ldots \cdot v_{j\max}]. \quad (3)$$

где v_j – число сложных шарниров кратностью $j \geq 2$, рассчитываемое через число $n' \geq 3$ установленных на оси данного шарнира рычажных звеньев.

4. Приведенное число сложных шарниров (V) в кинематической цепи синтезируемого механизма рассчитывается по формуле:

$$V = v_2 + 2v_3 + 3v_4 + \ldots + (j-1)v_{j\max}. \quad (4)$$

Для кинематических цепей механизмов со сложными шарнирами $1 \leq V \leq V_{\max}$, для цепей с простыми шарнирами $V = 0$.

5. Структурная математическая модель для синтеза плоских рычажных механизмов со сложными шарнирами:

$$\begin{cases} \sum\limits_{i=1}^{i_{\max}} n_i = n_2 + n_3 + n_4 + \ldots + n_{i_{\max}} = W + 2K + 1 \\ 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + \ldots + i_{\max} n_{i_{\max}} = 2(W + 3K) - V, \\ v_2 + 2v_3 + \ldots + (j_{\max} - 1)v_{j_{\max}} = V \\ i_{\max} = K + W,\ j_{\max} = K, V_{\max} = 2(K-1) \end{cases} \quad (5)$$

где W – число степеней свободы (подвижность) механизма.

Новый метод структурного синтеза механизмов со сложными шарнирами

Рассмотрим задачу структурного синтеза всего возможного многообразия K-контурных рычажных механизмов со сложными шарнирами.

Для решения поставленной задачи предлагается следующий метод структурного синтеза, применяемый для создания всех возможных V-семейств кинематических цепей в диапазоне ($1 \leq V \leq 2(K-1)$) и включающий ниже описанные этапы:

Этап 1. Задание входных параметров синтеза $W \geq 1$, $K \geq 2$, $1 \leq V \leq 2(K-1)$, расчет всех целочисленных решений структурной математической модели (5) и составление из них полного перечня всех возможных наборов рычажных звеньев [*LA*] и сложных шарниров [*MJA*].

Этап 2. Структурный синтез всего многообразия структурно-неповторяющихся кинематических цепей, выполняемый на основе рассчитанных наборов [*LA*] и [*MJA*] в следующем порядке (рис. 2):

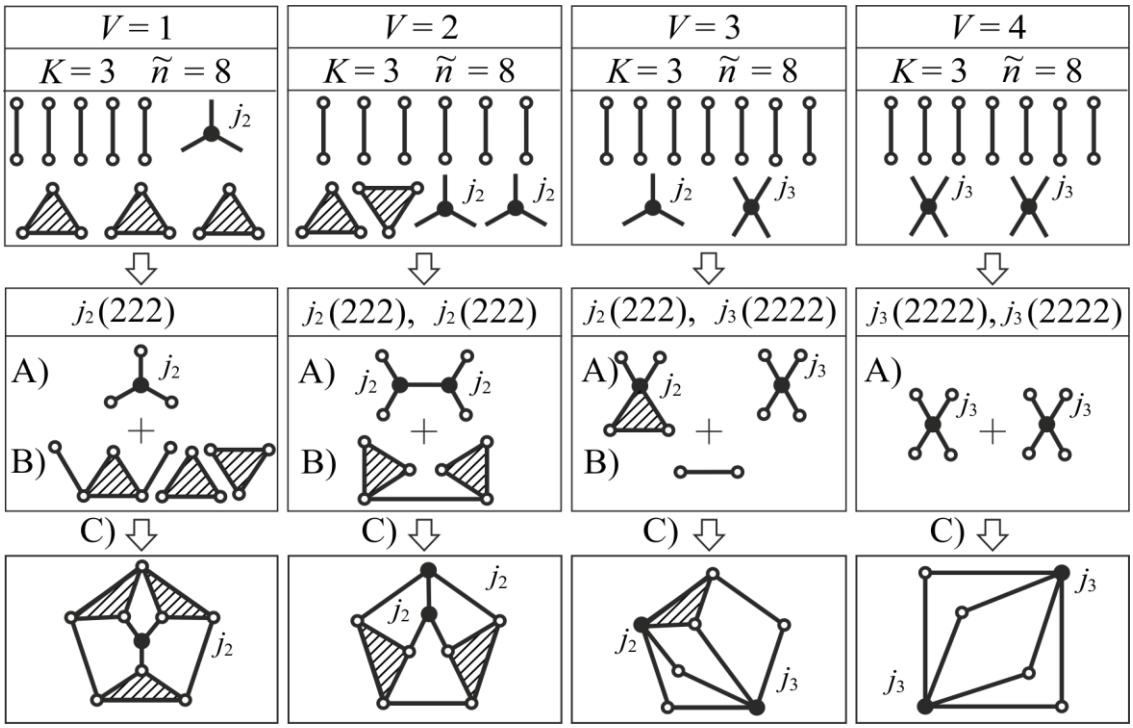


Рис. 2. Примеры структурного синтеза многоконтурных кинематических цепей со сложными шарнирами (сборки *A*, *B* и *C*)

Сборка A – представляет собой сборку всех сложных шарниров согласно набору [*MJA*], которая выполняется из набора звеньев [*LA*];

Сборка B – представляет собой сборку открытых кинематических цепей с нечетным числом звеньев, которая выполняется из оставшихся в наборе [*LA*] (после сборки *A*) многошарнирных рычажных звеньев;

Сборка C – представляет собой объединенную между собой сборку *A* и сборку *B* (*C* = *A* + *B*), выполняемую путем замыкания между собой всех свободных шарниров сборки *A* со сборкой *B*, для образования искомой замкнутой кинематической цепи, содержащей заданной число $K \geq 2$ взаимно независимых замкнутых контуров.

Этап 3. Системное формирование полного атласа синтезированных замкнутых многоконтурных кинематических цепей.

Этап 4. Выбор в каждой из синтезированных кинематических цепей стойки и входного звена и составление полных атласов рычажных механизмов со сложными шарнирами.

Этап 5. Структурный анализ всех синтезированных *K*-контурных рычажных механизмов со сложными шарнирами.

Используя предложенный подход, решим задачу структурного синтеза всего возможного многообразия 3-контруных 8-звенных механизмов со сложными шарнирами.

В данном случае структурная математическая модель (5) после подстановки в нее входных структурных параметров синтеза (*W* = 1, *K* = 3, $1 \leq V \leq 4$, $i_{\max} = 4$, $j_{\max} = 3$) примет следующий вид:

$$\begin{cases} n_2 + n_3 + n_4 = 8 \\ 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 = 20 - V \\ v_2 + 2v_3 = V \end{cases}.$$

Данная система уравнений имеет следующие целочисленные решения:

(а) семейство кинематических цепей с $V = 1$: $1)[LA] = [5,3,0], [MJA] = [1 \cdot 0]$;
$2)[LA] = [6,1,1], [MJA] = [1 \cdot 0]$;

(б) семейство кинематических цепей с $V = 2$: $1)[LA] = [6,2,0], [MJA] = [0 \cdot 1]$;
$2)[LA] = [6,2,0], [MJA] = [2 \cdot 0]$; $3)[LA] = [7,0,1], [MJA] = [0 \cdot 1]$;
$4)[LA] = [7,0,1], [MJA] = [2 \cdot 0]$;

(в) семейство кинематических цепей с $V = 3$: $1)[LA] = [7,1,0], [MJA] = [1 \cdot 1]$;
$2)[LA] = [7,1,0], [MJA] = [3 \cdot 0]$;

(г) семейство кинематических цепей с $V = 4$: $1)[LA] = [8,0,0], [MJA] = [0 \cdot 2]$;
$2)[LA] = [8,0,0], [MJA] = [4 \cdot 0]$; $3)[LA] = [8,0,0], [MJA] = [2 \cdot 1]$.

На основе рассчитанных ассортиментов (наборов) сложных шарниров и ассортиментов (наборов) звеньев в соответствие с этапом 2 построим полный атлас (рис.3) 8-звенных кинематических цепей со сложными шарнирами и наиболее сложным четырехшарнирным звеном ($i_{\max} = 4$).

Эффективность предлагаемого метода структурного синтеза заключается в том, что точное нахождение из структурной математической модели (5) всех возможных целочисленных решений и последующая сборка сложных шарниров позволяет построить полный атлас неизоморфных (структурно-неповторяющихся) структур.

Обсуждение

Сравнение представленного на рис. 3 полного атласа синтезированных плоских восьмизвенных трехконтурных кинематических цепей с ранее известными результатами структурного синтеза [11,12,15] позволяет установить существование 7 новых кинематических цепей со сложными шарнирами (кинематические цепи №№ 1;14;17;20;33;41;43).

На базе полученных новых кинематических цепей с помощью различного выбора стойки и входного звена можно синтезировать 150 новых структурных схем восьмизвенных трехконтурных одноподвижных механизмов. В качестве примера на рис. 4 показаны атласы возможных структурных схем восьмизвенных трехконтурных одноподвижных механизмов II и III классов с одним сложным шарниром, образованных из новых кинематических цепей № 41 и № 43. Данные атласы можно применить для создания новых разнообразных многоконтурных рычажных одноподвижных механизмов.

Результаты структурного синтеза трехконтурных 8-звенных механизмов со сложными шарнирами

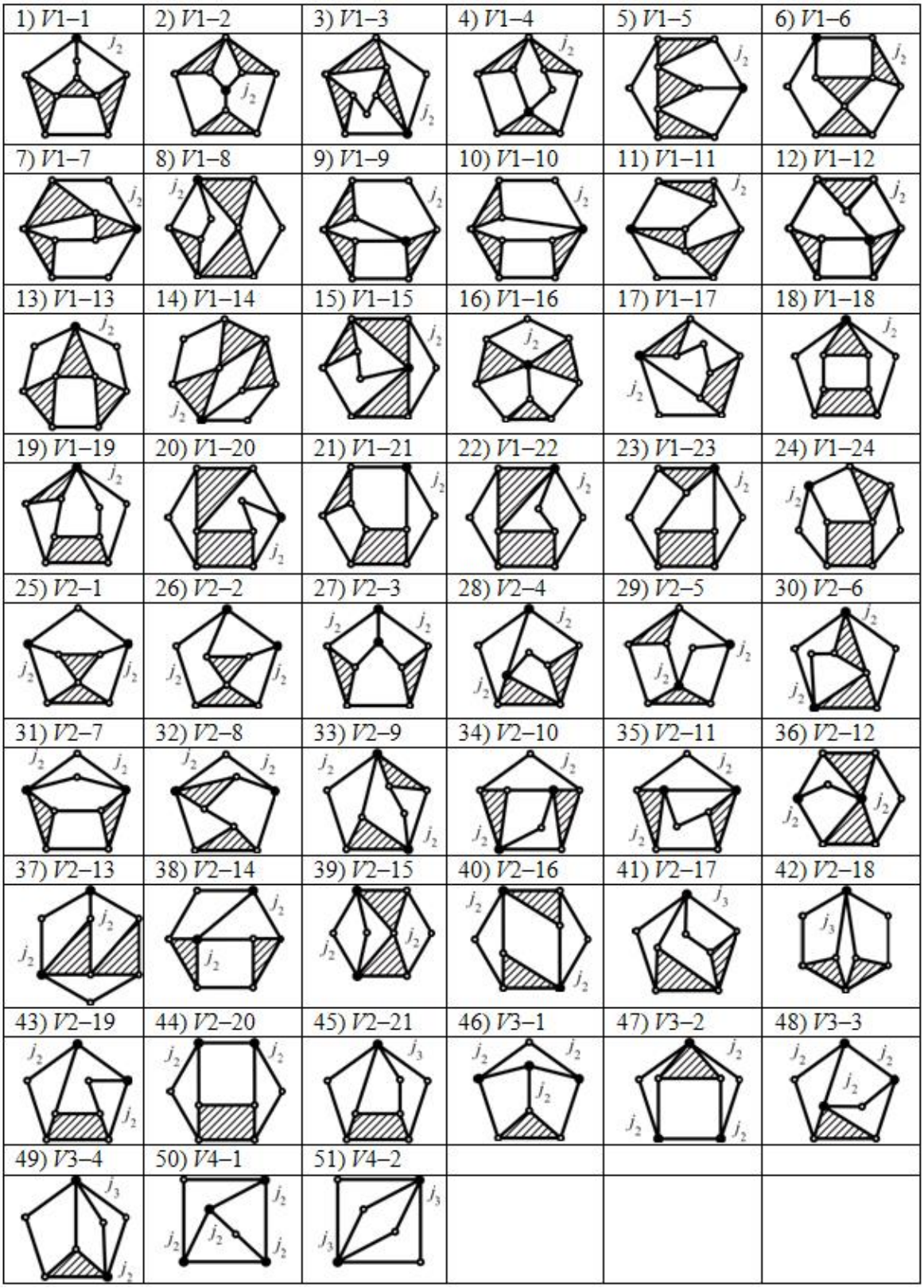


Рис. 3. Полный атлас синтезированных плоских восьмизвенных трехконтурных кинематических цепей со всеми возможными наборами сложных шарниров и звеньев

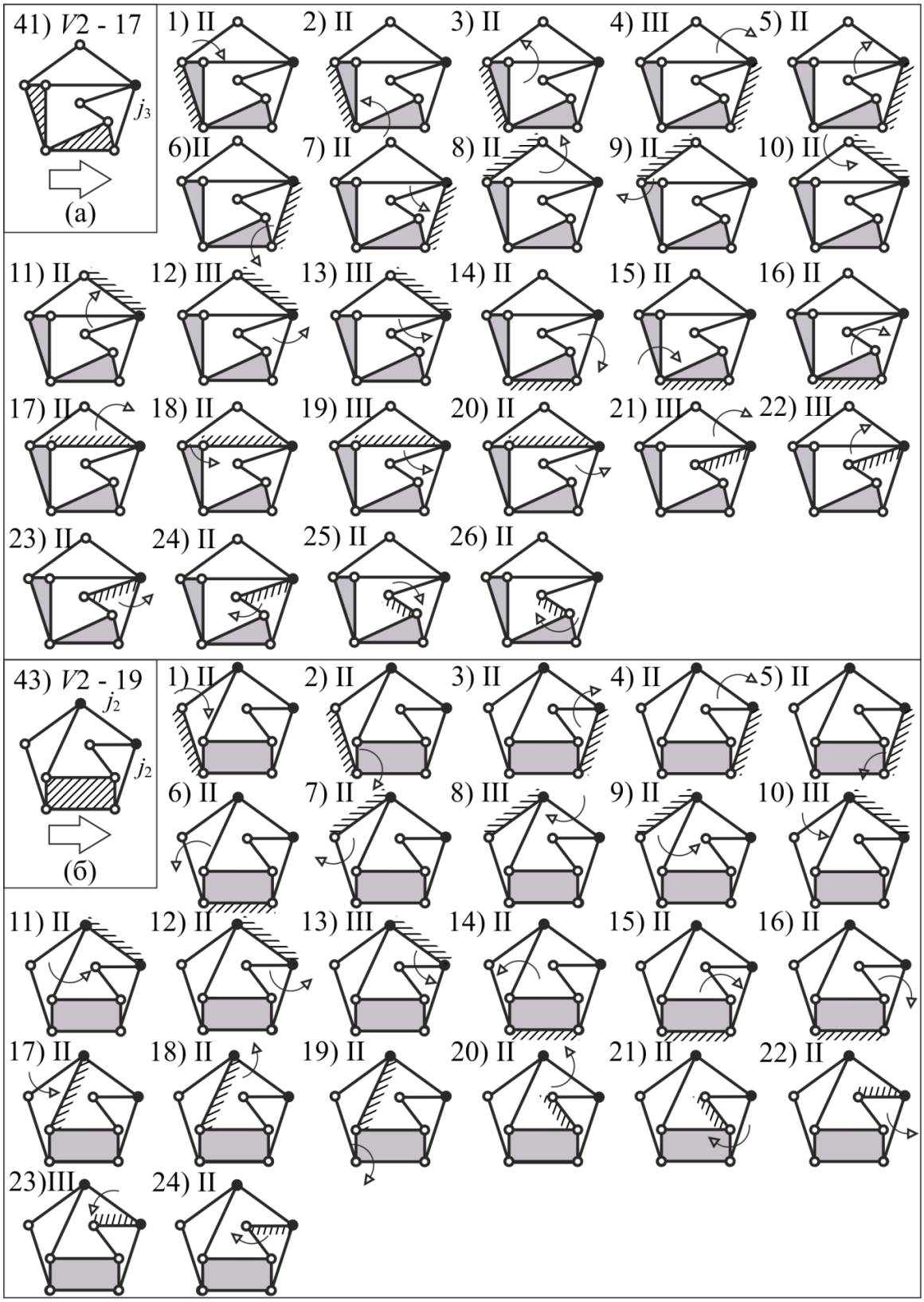


Рис. 4. Атласы возможных структурных схем восьмизвенных одноподвижных трехконтурных механизмов II и III классов, образованных из новых синтезированных кинематических цепей: (а) № 41) *V*2–17; (б) № 43) *V*2–19.

Заключение

Предлагаемый подход позволяет выполнить структурный синтез разнообразных многоконтурных рычажных механизмов с учетом применения в их структуре всех возможных наборов сложных шарниров и многошарнирных звеньев и создать полный атлас 8-звенных трехконтурных 51 кинематических цепей для дальнейшего синтеза на их основе новых рычажных механизмов со сложными шарнирами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Дворников Л.Т. Опыт структурного синтеза механизмов. Теория механизмов и машин. 2004. Т. 2, № 2. С.3-17.

[2] Марковец, А.В., Полотебнов, В.О. Синтез механизмов транспортирования материалов с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки. 2018. Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. Т. 38, № 1. С. 117-121.

[3] Пейсах Э.Е. Атлас структурных схем восьмизвенных плоских шарнирных механизмов // Теория механизмов и машин. 2006. Т. 4. 1(7). С.3-17.

[4] Пожбелко, В.И., Куц, Е.Н. Целочисленный структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов со сложными шарнирами для разных областей машиностроения. 2021. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 6 (735). С. 23-36.

[5] Романцев, А.А. К вопросу создания структурных схем плоских шарнирных групп звеньев. 2014. Теория механизмов и машин. Т. 12, 1(23). С. 81-90.

[6] Смелягин, А.И. Структурный анализ и синтез транспортных и робототехнических устройств. Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С. 54-71.

[7] Яруллин М.Г., Хабибуллин Ф.Ф., Мудров А.П. К вопросу о синтезе модификаций механизма Беннетта. Современное машиностроение: Наука и образование. 2018. № 7. С. 230-244.

[8] Babichev, D., Evgrafov, A., Lebedev, S. Structural-kinematic synthesis method for (planar) link. Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC 2019. Mechanism and Machine Science, 2019, 73, pp. 2937-2953.

[9] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. 2014. Proc. of the Ins. of Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.. 12(228), pp. 2178-2192.

[10] Ding H., Hou, F., Kecskemethy, A., Huang, Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. 2011. Mechanism and Machine Theory. 11(46), pp.1588-1600.
[11] Ding, H., Yang, W., Huang, P., Ma, L., Kecskeméthy, A. Generation of planar kinematic chains with one multiple joint. Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Portland, Oregon, USA, August 4 – 7, 2013). Portland, 2013, pp.1-9.
[12] Hasan, A. Study of multiple jointed kinematic chains. 2018. International Journal of Computational Engineering Research. 8(1), pp.13-19.
[13] Pozhbelko, V., Ermoshina, E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5- loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. 2015. Mechanism and Machine Theory. 90(8), pp. 108 -127.
[14] Pozhbelko, V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. 2016. Mechanism and Machine Theory. 100(6), pp. 1-16.
[15] Sun, W., Kong, J., Sun, L. A novel graphical joint-joint adjacent matrix method for the automatic sketching of kinematic chains with multiple joints. 2020. Mechanism and Machine Theory. 150, pp. 1-15.
[16] Yan, H.-S., Chiu, Y.-T. On the number synthesis of kinematic chains. 2015. Mechanism and Machine Theory. 89(9), pp. 128 -144.

E.N.Kuts[1], V.I.Pozhbelko[2]

A NEW STRUCTURAL SYNTHESIS METHOD OF MULTILOOP LINKAGES WITH MULTIPLE JOINTS

[1] South Ural State University (national research university), Russia;
[2] South Ural State University (national research university), Russia.

Abstract

The paper presents a new method of structural synthesis of the entire possible variety of multiple-jointed mechanisms, performed on the basis of a given variety of assemblies of multiple joints. As a result of the application of this method, for the first time, a complete atlas was constructed containing 51 structures of three-loop kinematic chains, including 7 new kinematic chains. Based on the synthesized new chains, 50 1 DOF 8-link lever mechanisms have been created for further possible use in various fields of technology.

Key words: structural synthesis, mechanism, multiple joint

REFERENCES

[1] Dvornikov, L.T. Experience of structural synthesis of mechanisms. Theory of mechanisms and machines. 2004. Vol. 2, № 2, pp.3-17. (rus.)

[2] Markovets, A.V., Polotebnov, V.O. Synthesis of mechanisms for the transportation of materials with a straight section of the trajectory of the gear link // Proceedings of higher educational institutions. Light industry technology. 2018. Vol. 38, № 1, pp.117-121. (rus.)

[3] Peisach, E.E. Atlas of structural schemes of 8-link planar hinge mechanisms. Theory of mechanisms and machines. 2006. Vol. 4, №1(7), pp.3-17. (rus.)

[4] Pozhbelko, V.I., Kuts, E.N. Integer structural synthesis of multiloop lever mechanisms with multiple joints for different areas of mechanical engineering. 2021. News of higher educational institutions. Machinery. № 6 (735), pp. 23-36. (rus.)

[5] Romantsev, A.A. On the issue of creating structural diagrams of planar hinged groups of links // Theory of mechanisms and machines. 2014. Vol.12, № 1 (23), pp.81-90. (rus.)

[6] Smelyagin, A.I. Structural analysis and synthesis of transport and robotic devices. Scientific works of KubSTU. 2019. № 3, pp. 54-71. (rus.)

[7] Yarullin M.G., Habibullin F.F., Mudrov A.P. On the question of synthesis of modifications of the Bennett mechanism. Modern mechanical engineering: Science and education. 2018. № 7, pp. 230-244. (rus.)

[8] Babichev, D., Evgrafov, A., Lebedev, S. Structural-kinematic synthesis method for (planar) link. Advances in Mechanism and Machine Science. IFToMM WC 2019. Mechanism and Machine Science, 2019, 73, pp. 2937-2953.

[9] Chu J., Zou Y. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains. 2014. Proc. of the Ins. of Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.. 12(228), pp. 2178-2192.

[10] Ding H., Hou, F., Kecskemethy, A., Huang, Z. Synthesis of a complete set of contracted graphs for planar non-fractionated simple-jointed kinematic chains with all possible DOFs. 2011. Mechanism and Machine Theory. 11(46), pp.1588-1600.

[11] Ding, H., Yang, W., Huang, P., Ma, L., Kecskeméthy, A. Generation of planar kinematic chains with one multiple joint. Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Portland, Oregon, USA, August 4 – 7, 2013). Portland, 2013, pp.1-9.

[12] Hasan, A. Study of multiple jointed kinematic chains. 2018. International Journal of Computational Engineering Research. 8(1), pp.13-19.

[13] Pozhbelko, V., Ermoshina, E. Number structural synthesis and enumeration process of all possible sets of multiple joints for 1-DOF up to 5- loop 12-link mechanisms on base of new mobility equation. 2015. Mechanism and Machine Theory. 90(8), pp. 108 -127.
[14] Pozhbelko, V. A unified structure theory of multibody open-, closed-, and mixed-loop mechanical systems with simple and multiple joint kinematic chains. 2016. Mechanism and Machine Theory. 100(6), pp. 1-16.
[15] Sun, W., Kong, J., Sun, L. A novel graphical joint-joint adjacent matrix method for the automatic sketching of kinematic chains with multiple joints. 2020. Mechanism and Machine Theory. 150, pp. 1-15.
[16] Yan, H.-S. , Chiu, Y.-T. On the number synthesis of kinematic chains. 2015. Mechanism and Machine Theory. 89(9), pp. 128-144.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621 + 531.8

А.Н. Евграфов[1], Г.Н. Петров[2], В.А. Терешин[3]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВХОДОВ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К ОСОБЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ

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

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

[3]Валерий Алексеевич Терешин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)297-48-45, E-mail: terva@mail.ru

Аннотация

Возникновение режимов самоторможения в механизмах, особенно многоподвижных, наблюдается достаточно часто. В определенных конфигурациях структурных групп резко возрастают реакции в кинематических парах, что приводит к заклиниванию механизма. В статье рассмотрены условия, при которых в плоских рычажных механизмах могут возникать эти нежелательные явления, если учитывать силы трения во вращательных и поступательных кинематических парах. Показано, как можно использовать дополнительные входы структурных групп, если мы близко приближаемся к особым положениям.

Ключевые слова: структурная группа, группа Ассура, механизм, особое положение, заменяющая идеальная кинематическая пара, трение, самоторможение.

Введение

Рассмотрению проблем сингулярности многоподвижных механизмов (наличие и/или обход особых (сингулярных) зон) и появлению при приближении к этим зонам режимов самоторможения посвящены работы [1-14]. В многоподвижных механизмах часто используют большее число входов, чем это необходимо для решения поставленной задачи. Так, для подхода схвата робота к нужной точке с необходимой ориентацией достаточно шести степеней подвижности. В действительности это число бывает намного большим. Можно назвать множество причин в пользу таких решений:

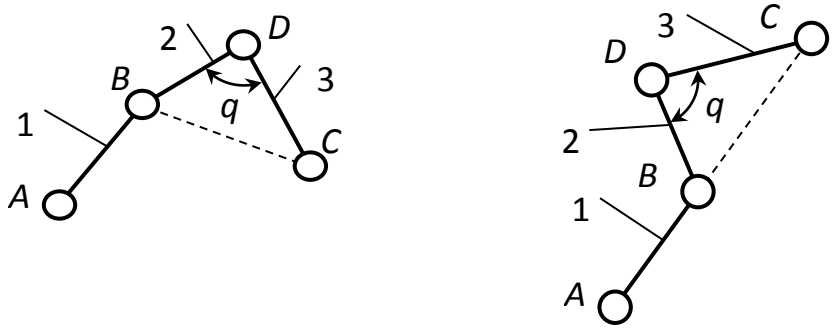
- необходимость увеличения зоны обслуживания;
- обеспечение маневренности;
- некоторые двигатели отвечают за перемещение на большие расстояния, требуют больших усилий, некоторые – за точное позиционирование;
- иногда в каждый момент времени выбирается группа двигателей, которая является оптимальной по выбранным критериям (такая задача решалась в работах [8, 15]).

В предлагаемой статье рассматривается еще одна причина, когда могут вводиться дополнительные входы. Это уход от положений, в которых могут возникать режимы самоторможения. В этой ситуации резко возрастают реакции в кинематических парах, что приводит к заклиниванию и невозможности выхода из данного положения. Дополнительные входы могут помочь обойти эти нежелательные конфигурации.

Использование дополнительных входов

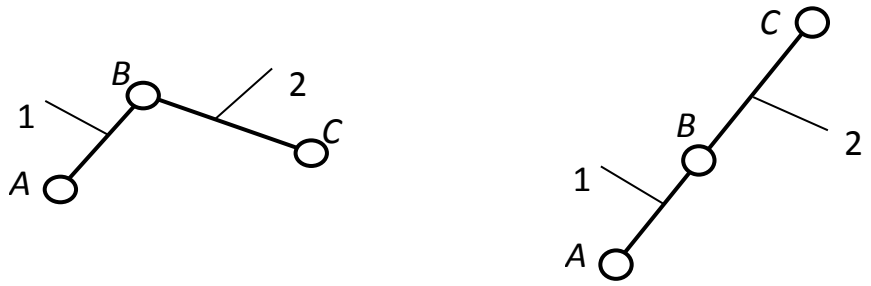
В механизмах платформ, роботов, станков, испытательных стендов, подъемно-транспортных машин и т.п. достаточно часто используются структурные группы с внутренними входами. Пример такой группы показан на рис. 1, *а*. В ней четыре звена, одна степень подвижности, один вход q. Если зафиксировать этот вход ($q = const$), можно эту группу заменить на группу Ассура ВВВ (с тремя вращательными парами), рис. 2, *а*. Расстояние между точками B и C обеспечивается заданной координатой q. Особые положения этих структурных групп показаны на

рис. 1, *б* и рис. 2, *б*, когда три пассивных шарнира A, B и C расположены на одной линии.



а) *б)*

Рис.1. Структурная группа ВВВ с внутренним входом
а) текущее положение, б) особое положение



а) *б)*

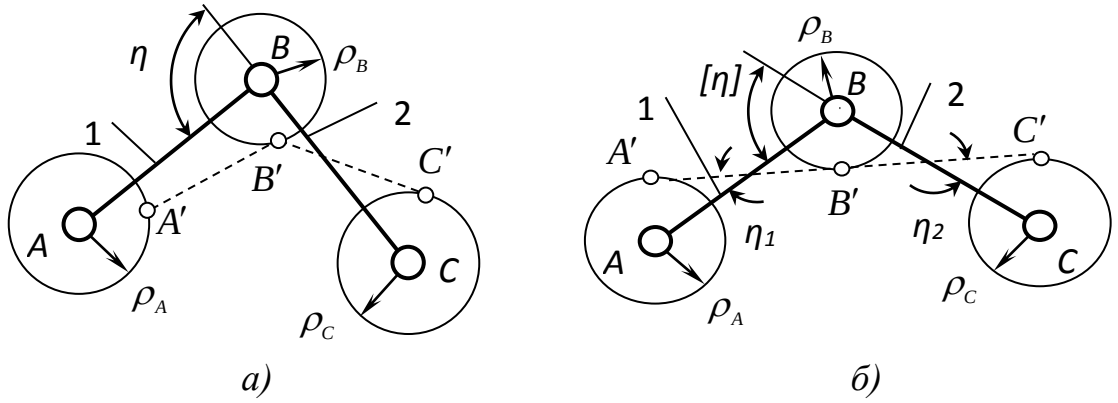
Рис.2. Группа Асура ВВВ
а) текущее положение, б) особое положение

Если расстояние между точками присоединения группы Ассура (рис. 2, *б*) равно сумме длин звеньев ($AC = AB + BC$), избежать особого положения не удается. В случае структурной группы с дополнительным входом при подходе к особому положению можно увеличить или уменьшить координату q так, чтобы $|AB - BC| < AC < AB + BC$. В этом случае мы можем не допустить попадания структурной группы в особое положение.

Самоторможение группы ВВВ

Рассмотрим диаду ВВВ и определим, когда в такой группе Асура возможен режим самоторможения. В работах [15-17] было показано, что это может произойти, если среди множества структурных групп с заменяющими идеальными кинематическими парами существует хотя бы одна в особом положении.

По аналогии с заменяющим механизмом, в котором звенья совершают те же движения, что и в исходном, введён термин «заменяющая идеальная кинематическая пара» (ЗИКП). В такой кинематической паре будут возникать те же реакции, что и в КП с учётом сил трения.



а) *б)*

Рис.3. Диада ВВВ
а) заменяющие ИКП , б) режим самоторможения

Для группы Ассура ВВВ (с тремя вращательными КП) на рис. 3, *а* показаны оси ЗИКП A', B', C'. Множество таких ЗИКП находятся внутри кругов трения ρ_A, ρ_B, ρ_C при отсутствии относительного движения звеньев, соединенных данным шарниром, или на окружностях этих радиусов в противном случае.

На рис. 3, *б* изображено положение группы, в котором круги трения всех шарниров касаются одной линии. В таком положении существует группа с ЗИКП A', B', C' в особом положении. При определенных внешних усилиях, силах инерции и относительных скоростях в шарнирах в этом положении может быть режим самоторможения. Определим допустимый угол $[\eta]$ между звеньями AB и BC:

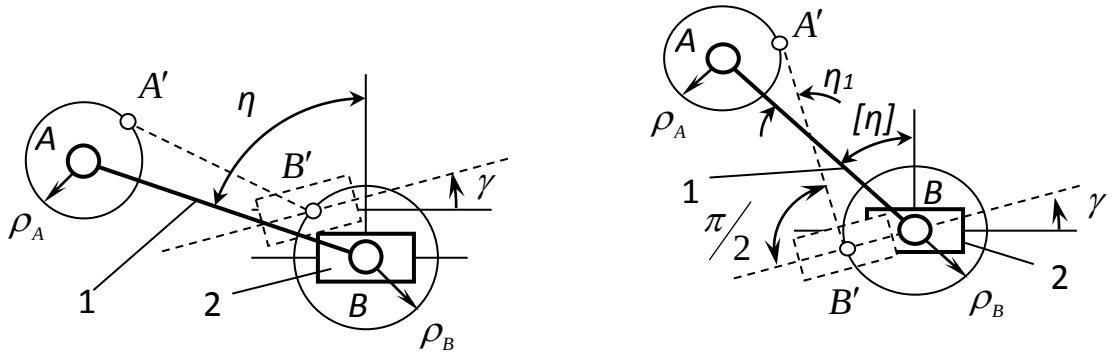
$$[\eta] = \eta_1 + \eta_2 = \arcsin\left(\frac{\rho_A + \rho_B}{AB}\right) + \arcsin\left(\frac{\rho_B + \rho_C}{BC}\right).$$

Отсюда следует вывод, что в структурной группе с внутренним входом (рис. 1, *а*) значения q следует выбирать таким образом, чтобы выполнялось условие $\eta > [\eta]$. В этом случае мы сможем избежать режима самоторможения.

Самоторможение группы ВВП

Допустимый угол $[\eta]$ можно определить для группы ВВП (рис. 4, *а*), включающей поступательную кинематическую пару. В работе [16] показано, что для такой группы шарниры A' и B' будут находиться на окружностях ρ_A и ρ_B соответственно, направляющая поступательной пары

должна быть наклонена на угол трения γ. Аналогично диаде ВВВ покажем положение, в котором среди множества групп с ЗИКП существуют группы



а) *б)*

Рис.4. Диада ВВП
а) заменяющие ИКП , б) режим самоторможения

в особом положении, когда угол между отрезком $A'B'$ и поступательной ЗИКП становится равным $\pi/2$ (рис. 4, *б*) и возникает возможность самоторможения.

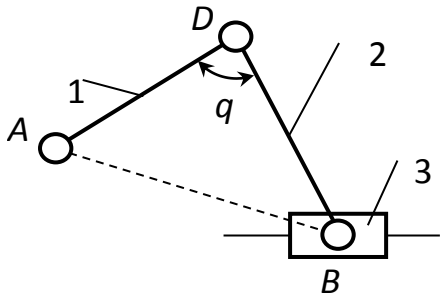


Рис.5. Структурная группа ВВП с внутренним входом

Допустимый угол $[\eta]$ в этом случае

$$[\eta]=\eta_1+\gamma=\arcsin\left(\frac{\rho_A+\rho_B}{AB}\right)+\arctan(f),$$

где f – коэффициент трения скольжения в поступательной кинематической паре.

В такой группе тоже можно ввести дополнительный вход q (рис. 5), который сможет обеспечить условие $\eta>[\eta]$, чтобы избежать режима самоторможения.

Заключение

В работе показано, что, если среди множества структурных групп с ЗИКП в заданном положении нашлись группы в особом положении, то это говорит только о возможности возникновения режима самоторможения при определенных внешних силах и относительных скоростях движения звеньев. Но даже если эффекта самоторможения не происходит, в этом случае, чаще всего, возникает резкое увеличение реакций и сил трения в шарнирах, что негативно сказывается на работоспособности механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гебель Е.С., Гаврилина Л.В., Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Романов А.А., Духов А.В. К анализу сингулярных зон механизмов параллельной структуры с линейными двигателями. // Станкоинструмент. 2021. № 3 (24). С. 92-99.

[2] Fomin A., Petelin D., Antonov A., Glazunov V., Ceccarelli M. Virtual and physical prototyping of reconfigurable parallel mechanisms with single actuation. In: Applied Sciences (Switzerland). 2021. Т. 11. № 15.

[3] Gebel E.S., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Demidov S.M., Shvets P.A. Construction of a singularity zone for a type of mechanisms with parallel structure. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Т. 49. № 11. С. 907-913.

[4] Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A. Structural synthesis of spatial l-coordinate mechanisms with additional links for technological robots. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 902. С. 683-691.

[5] Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Antonov A.V., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Skvortsov S.A., Shalyukhin K.A. Analysis and synthesis of parallel structure mechanism without singularities. In: Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. С. 112023.

[6] Хейло С.В., Гарин О.А., Палочкин С.В., Дорофеев С.Д. Исследование свойств пространственных механизмов с шестью степенями свободы. Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2021. № 3 (288). С. 28-33.

[7] Some Characteristics of Linear Acceleration Reproduction with Flexible Harmonical Component / Evgrafov A.N., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. In: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2018. С. 71-81.

[8] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Геометрический и кинетостатический анализ плоских рычажных механизмов второго класса. // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2 (2). С. 50-63.

[9] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. In: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. С. 75-82.

[10] 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, 14(2), стр. 73–78

[11] Semenov Y.A., Semenova N.S. Study of mechanisms with allowance for friction forces in kinematic pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. С. 169-179.
[12] Петров Г.Н. Компьютерное моделирование механических систем в среде «ModelVision» // Теория механизмов и машин. - 2004. - № 1. - Том 2. - С. 75-79.
[13] Петров Г.Н. Алгоритм кинетостатического расчета на ЭВМ замкнутых рычажных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 3.
[14] Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терешин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями // Научно-технические ведомости СПбГТУ. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2011. - №2(123). - С. 170-176.
[15] Евграфов А.Н., Петров Г.Н. Анализ эффекта самоторможения рычажных механизмов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 111-121.
[16] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. In: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. С. 75-82.
[17] 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.

A.N.Evgrafov, G.N.Petrov, V.A.Tereshin

USE OF ADDITIONAL LEVER INPUTS WHEN APPROACHING SINGULARITY POSITIONS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The occurrence of self-braking modes in mechanisms, especially multi-motor mechanisms, is quite common. In certain configurations of structural groups, the reactions in the kinematic couples increase dramatically, which leads to jamming of the mechanism. The paper considers conditions under which these undesirable phenomena can arise in planar lever mechanisms by considering friction forces in rotary and translational kinematic pairs. It is shown how additional inputs of structural groups can be used if we are close to singularity positions.

Key words: structural group, Assur group, mechanism, singularity position, replacing ideal kinematic pair, friction, self-braking.

REFERENCES

[1] Gebel E.S., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Lastochkin A.B., Romanov A.A., Dukhov A.V. To analysis of singular zones of mechanisms of parallel structure with linear motors. // Stankoinstrument. 2021. № 3 (24). Pp. 92-99. (in Russian)
[2] Fomin A., Petelin D., Antonov A., Glazunov V., Ceccarelli M. Virtual and physical prototyping of reconfigurable parallel mechanisms with single actuation. In: Applied Sciences (Switzerland). 2021. T. 11. № 15.
[3] Gebel' E.S., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Demidov S.M., Shvets P.A. Construction of a singularity zone for a type of mechanisms with parallel structure. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. T. 49. № 11. Pp. 907-913.
[4] Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A. Structural synthesis of spatial l-coordinate mechanisms with additional links for technological robots. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. T. 902. Pp. 683-691.
[5] Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Antonov A.V., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Skvortsov S.A., Shalyukhin K.A. Analysis and synthesis of parallel structure mechanism without singularities. In: Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. C. 112023.
[6] Kheilo S.V., Garin O.A., Palochkin S.V., Dorofeev S.D. Research of properties of spatial mechanisms with six degrees of freedom. Reference book. Inzhenernyj Zhurnal with appendix. 2021. № 3 (288). Pp. 28-33 (in Russian)
[7] Some Characteristics of Linear Acceleration Reproduction with Flexible Harmonical Component / Evgrafov A.N., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. In: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2018. Pp. 71-81.
[8] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Geometrical and kinetostatic analysis of flat lever mechanisms of the second class. // Theory of Mechanisms and Machines. 2003. T. 1. № 2 (2). Pp. 50-63 (in Russian)
[9] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. In: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. Pp. 75-82.

[10] 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, 14(2), стр. 73–78
[11] Semenov Y.A., Semenova N.S. Study of mechanisms with allowance for friction forces in kinematic pairs. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. Pp. 169-179.
[12] Petrov G.N. Computer simulation of mechanical systems in the "ModelVision" environment // Theory of mechanisms and machines. - 2004. - № 1. - Vol. 2. - Pp. 75-79 (in Russian)
[13] Petrov G.N. Algorithm of kinetostatic computer calculation of closed lever mechanisms // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 1993. № 3.
[14] Khrustitskii A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometry and kinematics of a spatial hexahedron with redundant links // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Technical University. - SPb.: Publishing house of SPbGTU, 2011. - №2(123). - Pp. 170-176 (in Russian)
[15] Evgrafov A.N., Petrov G.N. Analysis of the Effect of Lever Mechanisms Self-Locking // Modern Mechanical Engineering: Science and education. 2018. № 7. Pp. 111-121 (in Russian)
[16] Evgrafov A.N., Petrov G.N., Evgrafov S.A. Consideration of friction in linkage mechanisms. In: Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME). Cham, 2020. Pp. 75-82.
[17] Kolovsky M.Z., Petrov G.N., Sloush A.V. On controlling the motion of closed lever mechanisms with several degrees of freedom // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2000, № 4.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01 (075.8)

В.И. Пожбелко

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗА СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СЛОЖНЫХ ОДНОПОДВИЖНЫХ И МНОГОПОДВИЖНЫХ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Владимир Иванович Пожбелко,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
Россия, Челябинск
E-mail: pozhbelkovi@susu.ru

Аннотация

В работе поставлена и решена задача разработки универсального алгоритма направленного поиска всего возможного многообразия структурных схем сложных многозвенных рычажных механизмов, выполняемого на основе составленных из решений математической модели «Универсальных периодических структурных таблиц», содержащих все возможные коды строения сложных K-контурных механизмов. Даны примеры направленного синтеза структурных схем 1-, 2- и 3-подвижных механизмов с числом звеньев $\tilde{n} = 8 - 14$ и для $\tilde{n} = 8$ построен их полный систематизированный атлас из 25 базовых кинематических цепей, где 5 структур получены впервые.

Ключевые слова: структурный синтез, механизм, замкнутый контур.

Введение

Синтез структурных схем разнообразных сложных механизмов (многозвенных, многоконтурных, одно- и многоподвижных) [1–18] – с одной стороны является первоочередным и наиболее сложным вследствие большого числа возможных структурных решений, а с другой стороны – самым важным этапом создания надежно работающих механизмов, предопределяющим их функциональные характеристики и срок службы. Данный этап заключается в поиске всех возможных структурных схем и подачи их в виде систематизированного атласа (как «банка данных»).

В основополагающей научной монографии ведущего ученого-механика С.Н.Кожевниковым «Основания структурного синтеза механизмов» (Киев: НАУКОВА ДУМКА, 1979) представлен подробный анализ работ в области синтеза с 1883 г. (П.Л.Чебышева, Л.В.Ассура, И.И.Артоболевского, О.Г.Озола, Г.Г.Баранова, Л.Н.Решетова, M.Grubler и др.). В этой монографии С.Н.Кожевником впервые поставлена и обоснована задача «оптимального структурного синтеза механизмов, как статически определимых систем».

В связи с указанной задачей возникает проблема алгоритмизации поиска всего возможного многообразия работоспособных структур. Начальный пример её решения выполнен в 1997 году Э.Е.Пейсахом на основе компьютерных технологий, но только для элементарных одноподвижных механизмов с простыми шарнирами и представлен им в виде атласов из 9 схем 6-звенных и 153 схем 8-звенных шарнирных механизмов (в журналах «Теория механизмов и машин» - СПбГПУ: 2005, №1 и 2006, №1) и в его электронных каталогах $\tilde{n}-$звенных групп Ассура ($\tilde{n}=6/\sum=10$, $\tilde{n}=8/\sum=173$ и $\tilde{n}=10/\sum=5442$).

Другая, предпринятая Л.Т.Дворниковым (в журнале «Теория механизмов и машин» - СПбГПУ: 2004, №2) попытка поиска структур на основе своих комбинаторных уравнений – оказалась вообще ошибочной, так как полученный им «полный состав» (по твердому утверждению Л.Т.Дворникова) в действительности содержал 7 из 9 6-звенных и только 60% от 8-звенных механизмов, уже указанных в этих атласах Э.Е.Пейсаха (очевидно, разработчик этого метода не знал, к какому правильному конечному результату синтеза следует на практике его «подогнать»).

Целью данной работы является разработка универсального алгоритма образования и сборки (далее «*VIP*-алгоритм») любых структурных схем для направленного поиска – (и без «тупикового» перебора всех $\tilde{n}!$ десятков тысяч сочетаний групп Ассура) – всего их возможного топологического многообразия на основе предлагаемых «Универсальных структурных таблиц», содержащих расчетные коды строения всех возможных K-контурных структур ($1 \le K \le 6$) сложных рычажных механизмов с подвижностью $W=1,[6],W=2;\ 3$ и большим числом звеньев до $\tilde{n}=14$.

Основные понятия и структурные уравнения

Представленная в «Единой теории структуры механических систем» [6] общая структурная математическая модель любых механических систем применительно к рассматриваемым плоским и пространственным рычажным механизмам с одноподвижными вращательными и поступательными кинематическими парами ($H=1$), которые работают в пространстве с числом степеней свободы $h=3$, примет следующий вид:

$$\begin{cases} n_2 - [n_3 + 3n_4 + \cdots + (5 - 2i_{max})n_{imax}] = W + 2(V - K) + 3n_1 + 5; \\ n_3 + 2n_4 + 3n_5 + \cdots + (i_{max} - 2)n_{imax} = 2(K - 1) + n_1 - V; \\ i_{max} = K + W;\ V_{max} = 2(K - 1) + n_1;\ (L_0)_{max} = \tilde{n} - V. \end{cases} \quad (1)$$

Принятые обозначения:

n_i – число i-шарнирных звеньев K-контурной кинематической цепи (с учетом применения в ней однократных/простых и многократных/сложных шарниров [7] или заменяющих их поступательных пар);

K – количество замкнутых контуров, расположенных внутри наружного контура кинематической цепи (КЦ) механизма;

$\tilde{n} = n_1 + n_2 + n_3 + \cdots + n_{imax}$ – общее число звеньев механизма;

W – подвижность механизма (число его степеней свободы $F \geq 1$ [8]);

V – приведенное число сложных шарниров [6], [7], принимаемое за номер «*V*-семейства» во всем возможном диапазоне $0 \leq V \leq V_{max}$, где $V = 0$ – обозначает семейство механизмов только с простыми шарнирами, а $1 \leq V \leq 2(K - 1)$ – остальные «*V*-семейства» со сложными шарнирами;

L_0 – число сторон «базового шарнирного контура (БШК)», принимаемого за наружный замкнутый контур, как основу для образования структурной схемы рычажного механизма с заданными *входными* параметрами синтеза W, K и V.

Выходными параметрами структурного синтеза рычажных механизмов являются гарантированно собираемые между собой расчетные наборы i-шарнирных звеньев вида [*LA/Link Assortment*] и коды вида [*LA/V*]:

$$[LA] = [n_2 n_3 n_4 n_5 n_6 n_7 n_8 \ldots n_{K+W}] \rightarrow Code[LA/V], \quad (2)$$

которые представляют собой полный массив всех возможных целочисленных решений системы структурных уравнений (1) и которые затем сгруппированы в оригинальные периодические по V (от $V = 0$ до $V = V_{max}$) структурные таблицы $F1$ (для *W*=1) [6], $F2$ (для $W = 2$) и $F3$ (для $W = 3$) с найденными автором расчетными кодами [*LA/V*], в сумме:

$$\sum Code[[LA/V]] = 129[LA/V_0] + 286[LA/V \geq 1] = 415[LA/0 \leq V \leq 10].$$

Формализация процедуры синтеза структурных схем сложных многоконтурных механизмов

Предлагаемый «*VIP*-алгоритм» направленного поиска структурных схем многоконтурных рычажных механизмов разной подвижности $W \geq 1$ содержит следующие этапы:

Шаг «0». Выбор из «Универсальных структурных таблиц расчетных стандартных кодов $F1$ [6], $F2, F3$» одного из возможных расчетных

наборов многошарнирных рычажных звеньев $[LA]=[n_2 n_3 n_4 \dots n_{imax}]$, гарантировано обеспечивающих сборку [6] всех K замкнутых контуров кинематической цепи при задаваемых входных параметрах синтеза:

$$W \geq 1; K \geq 1(\tilde{n} \geq 4), 0 \leq V \leq V_{max} = 2(K-1)$$

осуществляемую посредством только простых шарниров $V = 0$) или с применением сложных (многократных) шарниров (для всех остальных V-семейств в полном возможном диапазоне $0 \leq V \leq V_{max} = 2(K-1)$).

Таблица F2. Универсальная периодическая структурная таблица расчетных стандартных кодов $[LA/V]$ правильного строения двухподвижных механизмов

W = 2, ***h*** = 3, ***H*** = 1																	
K = 1		***K*** = 2				***K*** = 3											
($\tilde{\boldsymbol{n}}$ =5)		($\tilde{\boldsymbol{n}}$ =7)				($\tilde{\boldsymbol{n}}$ =9, N_3=11)											
V	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	1	2	2	3	4	
n_2	**5**	5	6	6	7	5	6	7	7	6	7	8	7	8	8	9	
n_3	–	**2**	**0**	**1**	**0**	4	2	0	1	3	1	0	2	0	1	0	
n_4	–	–	1	–	–	**0**	**1**	**2**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	
n_5	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	1	–	–	–	–	

h = **3**

F = **2**

i ≤ ***K***+ ***F***

K = 4 ($\tilde{\boldsymbol{n}}$ = 11, N_4=27)																												
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6	
n_2	5	6	7	7	8	8	8	9	9	6	7	8	8	9	9	7	8	9	9	10	8	9	10	9	10	10	11	
n_3	6	4	2	3	0	1	2	0	0	5	3	1	2	0	1	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0	
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	1	2	0	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
n_5	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	
n_6	–	–	–	–	–	–	1	–	1	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	

W = 2, ***h*** = 3, ***H*** = 1																																							
K = 5 ($\tilde{\boldsymbol{n}}$ = 13, N_5=60)																																							
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							
n_2	5	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9	10	10	10	10	11	11	6	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10	11	11							
n_3	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	3	0	0	1	1	0	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1	1	2	0	0							
n_4	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	0	1	2	0	1	0	0	0	1	2	0	3	1	0	2	0	1	0	0	1							
n_5	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	0							
n_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**							
n_7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	1							

K = 5 (продолжение)																																						
V	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8									
n_2	7	8	9	9	10	10	10	11	11	11	8	9	10	10	11	11	12	9	10	11	11	12	10	11	12	11	12	12	13									
n_3	6	4	2	3	0	1	2	0	0	1	5	3	1	2	0	1	0	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0									
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0									
n_5	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0									
n_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**									
n_7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–									

Таблица F3. Универсальная периодическая структурная таблица расчетных стандартных кодов $[LA/V]$ правильного строения трехподвижных механизмов

***W* = 3, *h* = 3, *H* = 1**																		**h = 3** **F = 3** ***i* ≤ *K*+ *F***
K = 1 ($\tilde{n}$ =6)		***K*** = 2 ($\tilde{n}$ =8)				***K*** = 3 ($\tilde{n}$ =10, N_3=12)												
V	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	3	4	
n_2	**6**	6	7	7	8	6	7	8	8	9	7	8	9	8	9	9	10	
n_3	–	**2**	**0**	**1**	**0**	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0	
n_4	–	–	1	–	–	**0**	**1**	**2**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	
n_5	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0	–	–	1	–	–	–	–	
n_6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	

K = 4 ($\tilde{n}$ = 12, N_4=29)																												
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6
n_2	6	7	8	8	9	9	9	10	10	10	7	8	9	9	10	10	11	8	9	10	10	11	9	10	11	10	11	11	12
n_3	6	4	2	3	0	1	2	0	0	1	5	3	1	2	0	1	0	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0
n_5	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
n_6	–	–	–	–	–	–	1	–	1	0	–	–	–	–	–	1	0	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–
n_7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

W = 3, ***h*** = 3, ***H*** = 1

K =5 ($\tilde{n}$ = 14, N_5=64)																																			
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n_2	6	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	7	8	9	9	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	
n_3	8	6	4	5	2	3	4	0	1	2	2	3	0	0	1	1	2	0	0	0	7	5	3	4	1	2	3	0	1	1	2	0	0	1	
n_4	0	1	2	0	3	1	0	4	2	0	1	0	1	2	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	3	1	0	2	0	1	0	0	1	0	
n_5	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	
n_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	
n_7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	1	0	–	1	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	1	0		
n_8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	

K =5 (продолжение)

V	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	7	8
n_2	8	9	10	10	11	11	11	12	12	12	13	9	10	11	11	12	12	13	10	11	12	12	13	11	12	13	12	13	13	14
n_3	6	4	2	3	0	1	2	0	0	1	0	5	3	1	2	0	1	0	4	2	0	1	0	3	1	0	2	0	1	0
n_4	0	1	2	0	3	1	0	0	1	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0
n_5	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
n_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
n_7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
n_8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Шаг «1». Построение базового шарнирного контура (БШК) с числом сторон L_0 в расчетном диапазоне:

$$4 \le L_0 \le [\tilde{n} - V]$$

для образования на его основе структурной схемы механизма.

Шаг «2». Совмещение многошарнирных рычажных звеньев ($i \ge 3$) из выбранного расчетного набора вида $[LA]$ (2) со сторонами построенного базового шарнирного контура L_0.

Шаг «3». Установка внутрь базового шарнирного контура L_0 всех остальных многошарнирных ($i \ge 3$) и двухшарнирных ($i \ge 2$) рычажных

звеньев из выбранного расчетного набора [*LA*] для образования из них *K*-контурной кинематической цепи и выбора в ней стойки и входных звеньев.

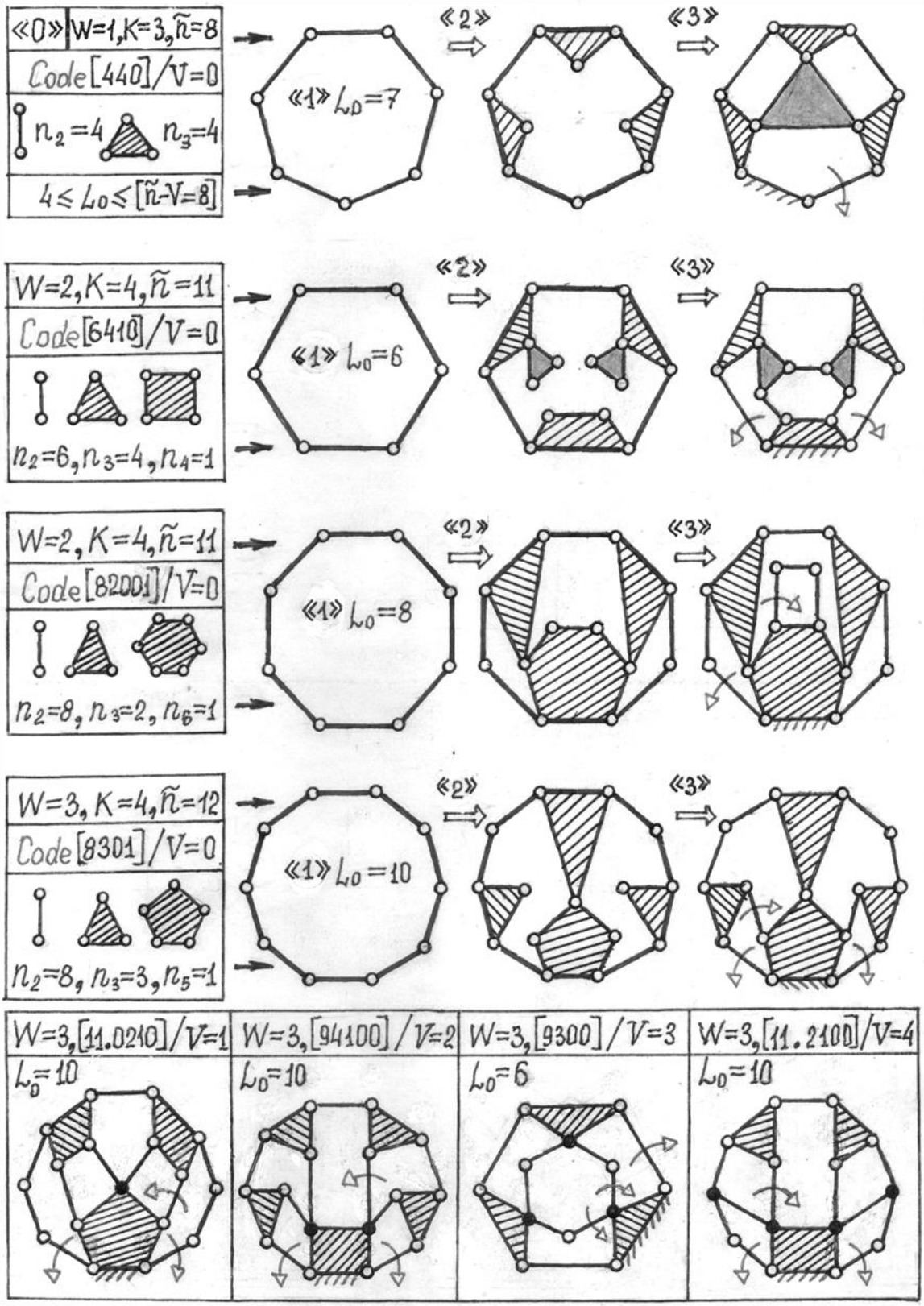


Рис.1. Процедура и результаты синтеза структурных схем сложных одно и многоподвижных механизмов на основе пошагового «*VIP*-алгоритма»

На рис.1 и рис.2 представлена процедура и конкретные результаты применения предлагаемого «*VIP*-алгоритма» для направленного синтеза структурных схем сложных механизмов разных V-семейств и $\tilde{n} \leq 14, W \leq 3$ и построения систематизированного по наборам $[LA]$ звеньев (2) полного атласа 8-звенных структур (который, в дополнении к синтезированным на основе теории графов 20 кинематическим цепям №№1-20 с $W = 1$, содержит 5 новых КЦ №№21,22,23,24 и 25 механизмов с $W = 2$).

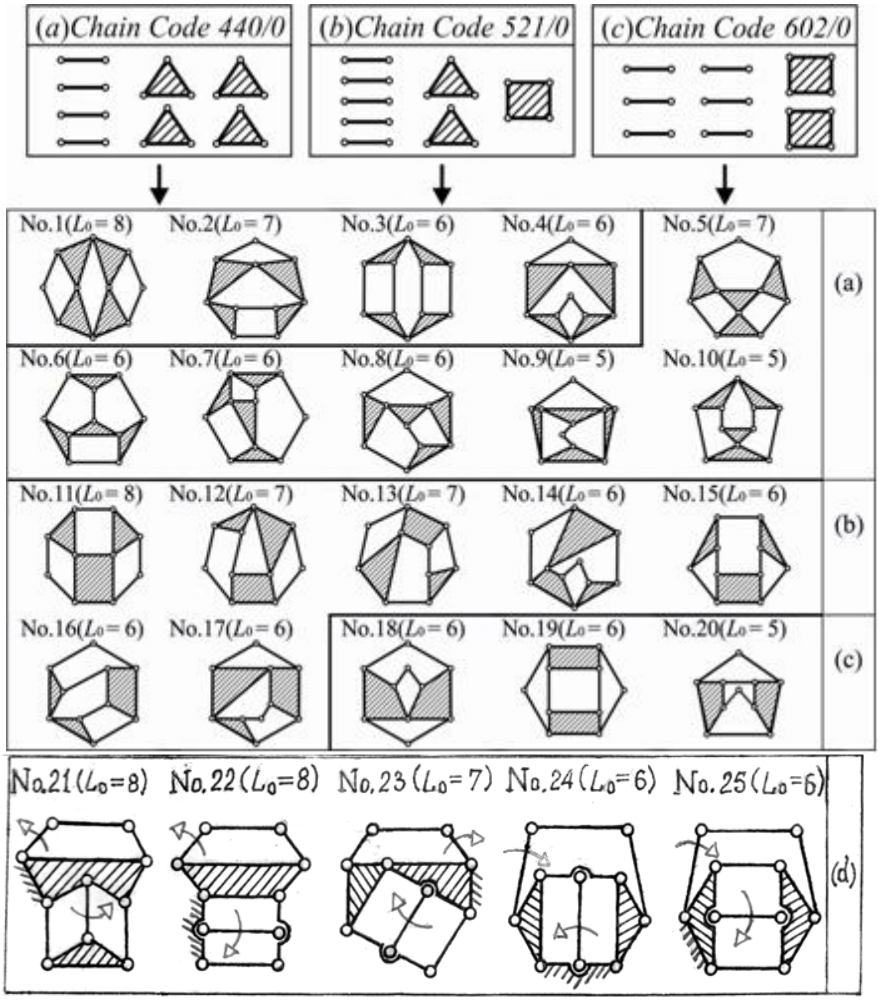


Рис.2. Полный топологический атлас из 25 базовых кинематических цепей с $\tilde{n} = 8$, $K = 3$ для образования рычажных механизмов семейства $V = 0$

Заключение

1. Представленные «Универсальные структурные таблицы $F1$ [6], $F2$ и $F3$» содержат разделенный на все возможные V-семейства точный полный массив из $\sum = 415$ целочисленных структурных решений (2) новой структурной модели (1) – для образования из них при заданных входных параметрах W, K и V всего возможного многообразия структур нормальных рычажных механизмов с $W = 1; 2$ и 3, выполняемого на

основе предлагаемого «*VIP*-алгоритма» (представляющего возможное решение проблемы направленного создания разнообразных сложных структур без избыточных связей).

2. В порядке *научной дискуссии* автор утверждает о невозможности создания сложных статически определимых рычажных механизмов (в диапазоне параметров: $\tilde{n} = 4 - 14, K = 1 - 6, 1 \leq W \leq 3$), структурные коды которых вида [LA/V] отсутствуют в «Универсальных таблицах расчетных стандартных кодов $F1$ [6], $F2, F3$».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике. - М: ЛЕНАРД, 2019. - 500 с.

[2] Новые механизмы в современной робототехнике// Под ред. В.А.Глазунова. – М: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 316 с.

[3] Мудров А.Г., Мудрова А.А., Сахапов Р.Л. Пространственные аппараты с мешалкой и смесители: Монография. – М: РУСАЙНС, 2021. – 190 с.

[4] Марковец К.И., Полотебнов В.О. Синтез механизмов транспортирования с прямолинейным участком траектории движения зубчатой рейки//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2018. Т. 39(1). – С. 117-121.

[5] Смелягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного перемешивающего устройства// Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2014. – Т5-6. – С.85-88.

[6] Пожбелко В.И. Единая теория структуры, синтеза и анализа многозвенных механических систем с геометрическими, гибкими и динамическими связями звеньев//Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – N9(726). – С.24-23.

[7] Куц Е.Н. Структурный синтез многоконтурных рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложным двухшарнирным звеном//Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 8-ой Межд. научно-практ. конф./Под ред. А.Н.Евграфова и А.А.Поповича. – СПб. 2019. – С.211-214.

[8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms//Advances in Mechanisms and Machine Science/ IFToMM WC-2019. – Springer, 2019. – Vol.73.pp.1517-1526.

[9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains//Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10. – pp.1-10.

[10] Zou.Y, He.P and Pei.Y. Automatic topological structural synthesis apgorithm//Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol.8. pp.1-12.

[11] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains.//Mech.Mach.Theory.– 2012.–Vol.47. – pp.1-15.
[12] Chen L.M. Digital and Discrete Geometry: Theory and Algorithms.-Heidelberg: Springer, 2014. – 322 p.
[13] Norton R.L. Design in Machinery, Worcester: Mc Graw Hill, 2012. –250 p.
[14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages//Robotica, Vol.36(11) – 2018, – pp.1641-1663.
[15] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms.//Robotica, Vol.33(4) – 2015. – pp.181-193.
[16] Babichev D., Evgrafov A. and Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis//Advances in Mechanisms and Machine Science. IFToMM WC-2019.-Springer, 2019. – Vol.73. – pp.1030-1050.
[17] Пожбелко В.И. Шарнирный кривошипный механизм. Патент RU на изобретение № 2740526; Бюл. №2, 2021.
[18] Пожбелко В.И. Механизм плавающего шарнирного параллелограмма. Патент RU на изобретение № 2765387, Бюл. №4, 2022.

V.I.Pozhbelko

AN UNIVERSAL ALGORITHM THE STRUCTURAL SYNTHESIS OF COMPLEX SINGLE- AND MULTIDEGREES OF FREEDOM LINKAGE MECHANISMS

South-Ural State University (national research university), Russia

Abstract

The paper presents a new universal algorithm for constructing the various closed multibody kinematic chains for creation all the possible 8-link, 10-link, 12-link and 14-link multiple structures of linkages with one-, two- and three degrees of freedom. The total synthesis result of applying the ones new algorithm which presents the complete atlas of 25 synthesized 8-link 3-closed loop structures of linkages included the 5 a novel structural decisions.

Key words: structural synthesis, mechanism, close loop.

REFERENCES

[1] Artobolevskij I.I. Mekhanizmy v sovremennoj tekhnike. - M: LENARD, 2019. S. 500.
[2] Novye mekhanizmy v sovremennoj robototekhnike// Pod red. V.A.Glazunova. – M: TEKHNOSFERA, 2018. – 316 s.

[3] Mudrov A.G., Mudrova A.A., Sahapov R.L. Prostranstvennye apparaty s meshalkoj i smesiteli: Monografiya. – M: RUSAJNS, 2021. – 190 s.
[4] Markovec K.I., Polotebnov V.O. Sintez mekhanizmov transportirovaniya materialov s pryamolinejnym uchastkom traektorii dvizheniya zubchatoj rejki// Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti. 2018. T. 39(1). S. 117-121.
[5] Smelyagin A.I., Prihod'ko A.A. Strukturnyj sintez slozhnogo peremeshivayushchego ustrojstva// Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Pishchevaya tekhnologiya. – 2014. – T.5-6. – s.85-88.
[6] Pozhbelko V.I. Edinaya teoriya struktury, sinteza i analiza mnogozvennyh mekhanicheskih sistem s geometricheskimi, gibkimi i dinamicheskimi svyazyami zven'ev//Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. – 2020. – N9(726). – s.24-23.
[7] Kuts E.N. Strukturnyj sintez mnogokonturnyh rychazhnyh mekhanizmov s mnogokratnymi sharnirami i naibolee slozhnym dvuhsharnirnym zvenom//Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: Materialy 8-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakt. Konferencii./Pod red. A.N.Evgrafova i A.A.Popovicha. – SPb. 2019. – s.211-214.
[8] Pozhbelko V. Type synthesis method of planar and spherical mechanisms//Advances in Mechanisms and Machine Science/ IFToMM WC-2019. – Springer, 2019.-Vol.73.pp.1517-1526.
[9] Sun W. A joint-joint matrix representation of planar kinematic chains//Advances in Mechanical Engineering. – 2018.-Vol. 10.-pp.1-10.
[10] Zou.Y, He.P and Pei.Y. Automatic topological structural synthesis apgorithm//Advances in Mechanical Engineering. – 2016.-Vol.8. pp.1-12.
[11] Ding H.F., Hou F.M. and Kecskemethy A. Synthesis of the whole family of 1-DOF kinematic chains.//Mech.Mach.Theory.-2012.-Vol.47.-pp.1-15.
[12] Chen L.M. Digital and Discrete Geometry: Theory and Algorithms.-Heidelberg: Springer, 2014.-322 p.
[13] Norton R.L. Design in Machinery, Worcester: Mc Graw Hill, 2012.
[14] Muller A. Kinematic topology and constraints of multi-loop linkages//Robotica, Vol.36(11)-2018,-pp.1641-1663.
[15] Talaba D. Mechanical models and the mobility of robots and mechanisms.//Robotica, Vol.33(4)-2015.-pp.181-193.
[16] Babichev D., Evgrafov A. and Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis//Advances in Mechanisms and Machine Science. IFToMM WC-2019.-Springer, 2019.Vol.73.-pp.1030-1050.
[17] Pozhbelko V.I. SHarnirnyj krivoshipnyj mekhanizm. Patent RU na izobretenie № 2740526; Byul. №2, 2021.
[18] Pozhbelko V.I. Mekhanizm plavayushchego sharnirnogo parallelogramma. Patent RU na izobretenie № 2765387, Byul. №4, 2022.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научноq конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Ю. А. Семенов[1], Н.С.Семенова[2]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОШИБОК РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ

[1]Юрий Алексеевич Семенов,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.; (812)345-1622, E-mail: tmm-semenov@mail.ru

[2]Надежда Сергеевна Семенова
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Россия, Санкт-Петербург :
Тел.: (812)345-1622, E-mail: tmm-nss@yandex.ru

Аннотация

Решение ряда задач динамики современных машин требует исследования упругих колебаний рычажных механизмов. Причины возникновения таких колебаний могут быть различны, однако их результат, как правило, неблагоприятен – появление знакопеременных нагрузок, снижение точностных качеств механизма, повышенный износ в кинематических парах и т.п. В работе представлена одна из динамических моделей кривошипно-ползунного механизма и определены динамические ошибки, вызванные возмущающими силами.

Ключевые слова: рычажный механизм, собственные частоты, динамические ошибки.

Введение

С ростом рабочих скоростей машин все чаще возникает ситуация, когда использование простейших динамических моделей с жесткими звеньями становится неприемлемым и приходится обращаться к более

сложным моделям, учитывающим упругость звеньев. Вопросы, связанные с учетом упругости звеньев, нашли свое отражение во многих монографиях и статьях, посвященных проблемам динамики механизмов и машин $[1-16]$и др.

Под упругим механизмом понимается физическая модель реального механизма, полученная в предположении, что некоторые звенья и кинематические пары, входящие в этот механизм, являются деформируемыми. Упругие механизмы могут быть получены из механизмов с жесткими звеньями, если в последних некоторые жесткие связи заменить упругими. При этом превращение жесткого механизма возможно множеством способов, в зависимости от того, какие именно связи предполагаются упругими.

Определение кинематических параметров упругого механизма

Введение упругих элементов приводит к увеличению числа степеней свободы механизма при сохранении числа степеней подвижности. Функции положения упругого механизма, наряду с входными координатами $\varphi_1,\dots\varphi_n$, содержат в качестве аргументов компоненты столбца деформаций $\theta=(\theta_1,\dots,\theta_s)^T$. При кинематическом анализе учитывается, что деформации, а также их производные по времени, являются малыми величинами, в силу чего в выражениях для производных от функций положения должны сохраняться члены, содержащие эти величины в степени не выше первой. Например, функция положения одноподвижного механизма представляется в форме

$$x=x(\varphi,\theta_1,\theta_2,\dots,\theta_s). \qquad (1)$$

Дифференцируя (1) по времени, получаем выражение для первой производной от функции положения:

$$\dot{x}=\frac{\partial x}{\partial q}(\varphi,\theta)\dot{\varphi}+\frac{\partial x}{\partial\theta}(\varphi,\theta)\dot{\theta},$$

В этом выражении частные производные должны определяться для деформированного механизма, что резко усложняет задачу кинематического анализа. Для упрощения расчета воспользуемся моделью жесткого механизма, разложив эти производные по степеням $\theta_k\,(k=1,2,\dots,s)$ и сохранив в них члены первого порядка малости:

$$\frac{\partial x}{\partial\varphi}(\varphi,\theta)=\left(\frac{\partial x}{\partial\varphi}\right)_0+\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi\partial\theta}\right)_0\theta+\dots,\ \frac{\partial x}{\partial\theta}(\varphi,\theta)=\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0+\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\theta^2}\right)_0\theta+\dots\ .$$

Здесь нижний индекс означает, что частные производные определяются при $\theta=0$, т.е. зависят только от геометрических параметров жесткого механизма. Тогда

$$\dot{x} \approx \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)_0 \dot{\varphi} + \left(\frac{\partial x}{\partial \theta}\right)_0 \dot{\theta} + \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \varphi \partial \theta}\right)_0 \dot{\varphi}\theta.$$

(2)

Если кинематические параметры отсчитывать относительно жесткого механизма, то первое слагаемое в (2) характеризует переносную скорость v^e, равную скорости жесткого механизма $(\dot{x})_0 = (\partial x/\partial \varphi)_0 \dot{\varphi}$, а второе слагаемое – относительную скорость $v^r = (\partial x/\partial \theta)_0 \dot{\theta}$. Третье, добавочное, слагаемое

$$v^{\text{доб}} = \left(\partial^2 x/\partial \varphi \partial \theta\right)_0 \dot{\varphi}\theta$$

появилось из-за того, что частные производные определялись для жесткого механизма.

Аналогично вычисляются ускорения точек упругого механизма:

$$\ddot{x} \approx \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \varphi^2}\right)_0 \dot{\varphi}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)_0 \ddot{\varphi} + \left(\frac{\partial x}{\partial \theta}\right)_0 \ddot{\theta} + 2\left(\frac{\partial^2 x}{\partial \varphi \partial \theta}\right)_0 \dot{\theta}\dot{\varphi} + \left[\left(\frac{\partial^3 x}{\partial \varphi^2 \partial \theta}\right)_0 \dot{\varphi}^2 + \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \varphi \partial \theta}\right)_0 \ddot{\varphi}\right]\theta. \quad (3)$$

Кинематический анализ упрощается, когда движение упругого механизма представляет собой малые колебания, происходящие вблизи некоторого положения равновесия жесткого механизма $\varphi = \varphi_0$. Такая ситуация возникает, например, в механизме после его прихода в точку позиционирования. В этом случае после остановки двигателя в системе возникают колебания, вызванные деформацией упругих элементов. Положив в (2) и (3) $\varphi = \varphi_0, \dot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi} = 0$, получаем

$$\dot{x} = \left(\partial x/\partial \theta\right)_0 \dot{\theta}, \quad \ddot{x} = \left(\partial x/\partial \theta\right)_0 \ddot{\theta}. \quad (4)$$

Колебания рычажного механизма вблизи положения равновесия

Составим уравнения колебаний кривошипно-ползунного механизма вблизи положения равновесия (рис. 1).

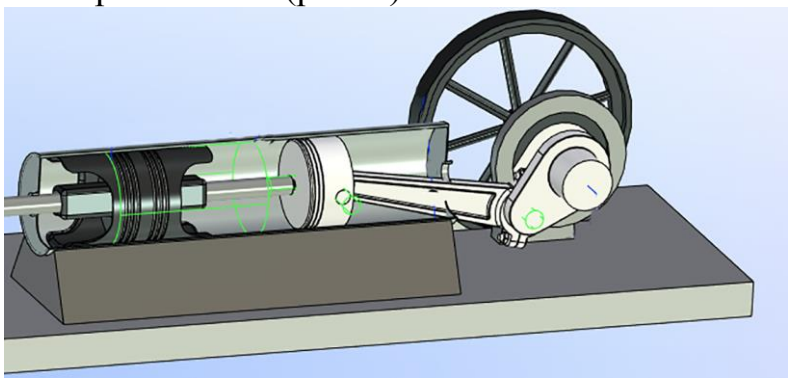


Рис. 1. Кривошипно-ползунный механизм

В этом положении двигатель заторможен, а механизм, подверженный воздействию рабочих нагрузок, совершает малые колебания за счет

деформации звеньев и кинематических пар. В рассматриваемой динамической модели будем считать упругими передачу, связывающую заторможенный ротор двигателя с кривошипом, и шатун, деформируемый в продольном направлении. Из инерционных параметров учтем момент инерции кривошипа J и массу ползуна m (рис. 2).

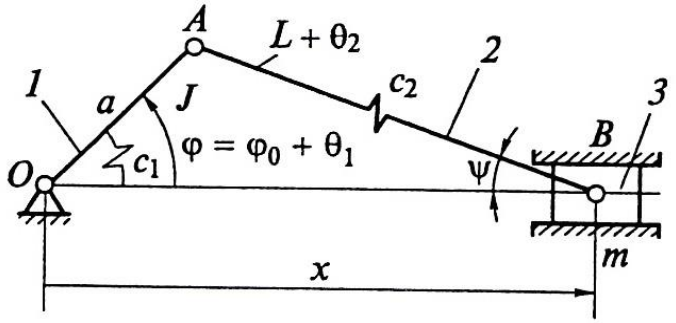


Рис.2. Динамическая модель механизма

Введем столбец координат

$$\rho_C = (\varphi, x)^T, \tag{5}$$

определяющий отклонения системы от положения равновесия и столбец деформаций упругих элементов

$$\theta = (\theta_1, \theta_2)^T. \tag{6}$$

Собственные кинетические параметры механизма будем характеризовать диагональной матрицей

$$A_c = \begin{pmatrix} J & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}$$

той же размерности, что и столбец ρ_C.

Тогда с учетом соотношений (4) и (5) столбец сил и моментов сил инерции определяется выражением

$$\Phi = -A_c \ddot{\rho}_C = -A_c \left(\frac{\partial \rho_C}{\partial \theta} \right)_0 \ddot{\theta}, \tag{7}$$

где $(\partial \rho_C / \partial \theta)_0$ – матрица, составленная из первых производных от элементов столбца ρ_C по элементам столбца деформаций θ:

$$\left(\frac{\partial \rho_C}{\partial \theta} \right)_0^T = \begin{pmatrix} \partial\varphi/\partial\theta_1 & \partial x/\partial\theta_1 \\ \partial\varphi/\partial\theta_2 & \partial x/\partial\theta_2 \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} \partial\varphi/\partial\varphi & \partial x/\partial\varphi \\ \partial\varphi/\partial L & \partial x/\partial L \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 & \partial x/\partial\varphi \\ 0 & \partial x/\partial L \end{pmatrix}_0,$$

где частные производные, определяемые с помощью групповых уравнений,

$$(\partial x/\partial\varphi)_0 = -a\sin(\varphi+\psi)/\cos\psi; \quad (\partial x/\partial L)_0 = 1/\cos\psi,$$

a – радиус кривошипа, L – длина шатуна, ψ – угол давления в точке B.

Предположим сначала, что активные внешние силы отсутствуют. Тогда деформации вызываются только действием инерционных сил. При

деформациях в упругих элементах возникают силы упругости, равные произведению жесткости соответствующего упругого элемента на его деформацию

$$F = -\begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix}, \tag{8}$$

где c_1, c_2 – жесткости упругих элементов.

Для составления уравнения малых колебаний механизма вблизи положения равновесия воспользуемся общим уравнением динамики

$$-(C\theta)^T \delta\theta + \Phi^T \delta\rho_C = 0. \tag{9}$$

Подставим выражение (7) в (9). Тогда

$$-(C\theta)^T \delta\theta + \left[-A_c\left(\frac{\partial\rho_C}{\partial\theta}\right)_0 \ddot{\theta} \right]^T \delta\rho_C = \left\{ -(C\theta)^T - \ddot{\theta}^T \left[A_c\left(\frac{\partial\rho_C}{\partial\theta}\right)_0 \right]^T \right\} \frac{\delta\rho_C}{\delta\theta} = 0.$$

Отсюда получим дифференциальное уравнение малых свободных колебаний вблизи положения равновесия:

$$A\ddot{\theta} + C\theta = 0, \tag{10}$$

где матрица приведенных кинетических параметров механизма:

$$A = \left(\frac{\partial\rho_C}{\partial\theta}\right)_0^T A_c \left(\frac{\partial\rho_C}{\partial\theta}\right)_0 = \begin{pmatrix} \dfrac{ma^2 \sin^2(\varphi+\psi)}{\cos^2\psi} + J & \dfrac{ma\sin(\varphi+\psi)}{\cos^2\psi} \\ \dfrac{ma\sin(\varphi+\psi)}{\cos^2\psi} & \dfrac{m}{\cos^2\psi} \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Положив в механизме радиус кривошипа $a = 0{,}2$ м; длина шатуна $L = 0{,}2\sqrt{3}$ м; момент инерции кривошипа относительно оси вращения $J = 0{,}4$ кг$\cdot$м^2; масса ползуна $m = 30$ кг; жесткость на входе механизма $c_1 = 100$ Н$\cdot$м; жесткость шатуна $c_2 = 10^5$ Н/м, составим частотное уравнение:

$$\det(C - Ak^2) = 16k^4 - 2{,}04\cdot 10^5 k^2 + 10^7 = 0,$$

откуда найдем собственные частоты $k_1 = 7{,}015\ \text{с}^{-1}$; $k_2 = 112{,}7\ \text{с}^{-1}$,

коэффициенты собственных форм

$h_{11} = 1$; $h_{12} = -4{,}016\cdot 10^{-3}$ м; $h_{21} = 1$; $h_{22} = 0{,}249$ м.

Предположим, что на кривошип действует возмущающий момент $M = M_0 \sin\omega t$, где $M_0 = 0{,}2$ Н$\cdot$м, а на упругие элементы силы сопротивления. При этом коэффициенты линейных сил сопротивления пропорциональны соответствующим жесткостям $b_i = c_i\psi / 2\pi\omega$, где коэффициент поглощения $\psi = 0{,}4\,(i = 1{,}2)$.

Тогда с помощью выражения

$$-(C\theta)^T\delta\theta-(B\dot{\theta})^T\delta\theta+V^T\delta\rho_K+\Phi^T\delta\rho_C=0, \qquad (12)$$

получим уравнения малых вынужденных колебаний механизма около положения равновесия

$$A\ddot{\theta}+B\dot{\theta}+C\theta=\left(\partial\rho_K/\partial\theta\right)_0^T V \qquad (13)$$

где столбец активных сил $V=(M,0)^T$, столбец координат их приложения $\rho_K=(\varphi,0)^T$, матрица сил сопротивления $B=\left(\psi/2\pi\omega\right)C$.

Для нахождения частного решения удобно в уравнении (13) от обобщенных координат θ перейти к главным координатам z_m при помощи следующего линейного преобразования $\theta=\sum_{m=1}^{2}h_m z_m$.

При этом получается система уравнений

$$\alpha_m\ddot{z}_m+\beta_m\dot{z}_m+\gamma_m z_m=V^T\left(\partial\rho_K/\partial\theta\right)_0 h_m \quad (m=1,2), \qquad (14)$$

где $\alpha_m=(Ah_m)^T h_m;\quad \beta_m=(Bh_m)^T h_m;\quad \gamma_m=(Ch_m)^T h_m$.

Перепишем уравнения (14) в операторном виде:

$$(\alpha_m p^2+\beta_m p+\gamma_m)z_m=V^T\left(\partial\rho_K/\partial\theta\right)_0 h_m,$$

отсюда найдем

$$z_m=\left(\alpha_m p^2+\beta_m p+\gamma_m\right)^{-1}V^T\left(\partial\rho_K/\partial\theta\right)_0 h_m.$$

Переходя к исходным координатам, получаем

$$\theta=\sum_{m=1}^{2}\frac{h_m h_m^T}{\alpha_m p^2+\beta_m p+\gamma_m}\left(\partial\rho_K/\partial\theta\right)_0^T V. \qquad (15)$$

В рассматриваемом механизме при помощи линейного преобразования

$$\theta_1=h_{11}z_1+h_{21}z_2=z_1+z_2,$$

$$\theta_2=h_{12}z_1+h_{22}z_2=-4{,}016\cdot10^{-3}z_1+0{,}249z_2$$

запишем уравнения вынужденных колебаний в главных координатах

$$\alpha_1\ddot{z}_1+\beta_1\dot{z}_1+\gamma_1 z_1=h_{11}M_0\sin\omega t=M_0\sin\omega t,$$

$$\alpha_2\ddot{z}_2+\beta_2\dot{z}_2+\gamma_2 z_2=h_{21}M_0\sin\omega t=M_0\sin\omega t,$$

где $\alpha_1=\left(Ah_1\right)^T h_1=2{,}065\,\text{кг}\cdot\text{м}^2;\quad \alpha_2=\left(Ah_2\right)^T h_2=0{,}496\,\text{кг}\cdot\text{м}^2;$

$\gamma_1=\left(Ch_1\right)^T h_1=101{,}613\,\text{Н}\cdot\text{м};\quad \gamma_2=\left(Ch_2\right)^T h_2=6300\,\text{Н}\cdot\text{м};$

приведенные коэффициенты сопротивления

$\beta_1=0{,}064\gamma_1/\omega=6{,}51/\omega\,\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с};\ \beta_2=0{,}064\gamma_2/\omega=403{,}2/\omega\,\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}.$

Тогда получим

$$2{,}065\ddot{z}_1+6{,}51\frac{\dot{z}_1}{\omega}+101{,}613z_1=0{,}2\sin\omega t, 0{,}496\ddot{z}_2+403{,}2\frac{\dot{z}_2}{\omega}+6300z_2=0{,}2\sin\omega t.$$

Решение этих уравнений при учете линейных сил сопротивления

$$z_l = \frac{M_0 h_{l1} \sin(\omega t + \zeta_l)}{\gamma_l \sqrt{\left(1-(\omega/k_l)^2\right)^2 + (\psi/2\pi)^2}}; \quad \mathrm{tg}\zeta_l = \frac{\psi/2\pi}{(\omega/k_l)^2 - 1} \qquad (l = 1,2);$$

При $\omega = 0{,}3k_1$ имеем

$z_1 = 0{,}00216\sin(0{,}3k_1 t + 0{,}07); z_2 = 0{,}0000317\sin(0{,}3k_1 t + 0{,}064).$

При $\omega = k_1$ получаем

$z_1 = 0{,}03087\sin(k_1 t + 1{,}571); z_2 = 0{,}0000318\sin(k_1 t + 0{,}064).$

Динамические ошибки при $\omega = 0{,}3k_1$:

$\theta_1 = h_{11}z_1 + h_{21}z_2 = z_1 + z_2 \approx z_1 = 0{,}0026\sin(0{,}3k_1 t + 0{,}07);$

$\theta_2 = h_{12}z_1 + h_{22}z_2 = -0{,}00000899\sin(0{,}3k_1 t + 0{,}07) + 0{,}00000789\sin(0{,}3k_1 t + 0{,}064)$ м.

Динамические ошибки при $\omega = k_1$):

$\theta_1 = h_{11}z_1 + h_{21}z_2 = z_1 + z_2 \approx z_1 = 0{,}03087\sin(k_1 t + 1{,}571);$

$\theta_2 = h_{12}z_1 + h_{22}z_2 \approx h_{12}z_1 = -0{,}00013\sin(k_1 t + 1{,}571)$ *м.*

На рис. 3 показаны динамические ошибки для двух упругих элементов на разных частотах возмущения, а на рис. 4 – амплитудно-частотные характеристики системы

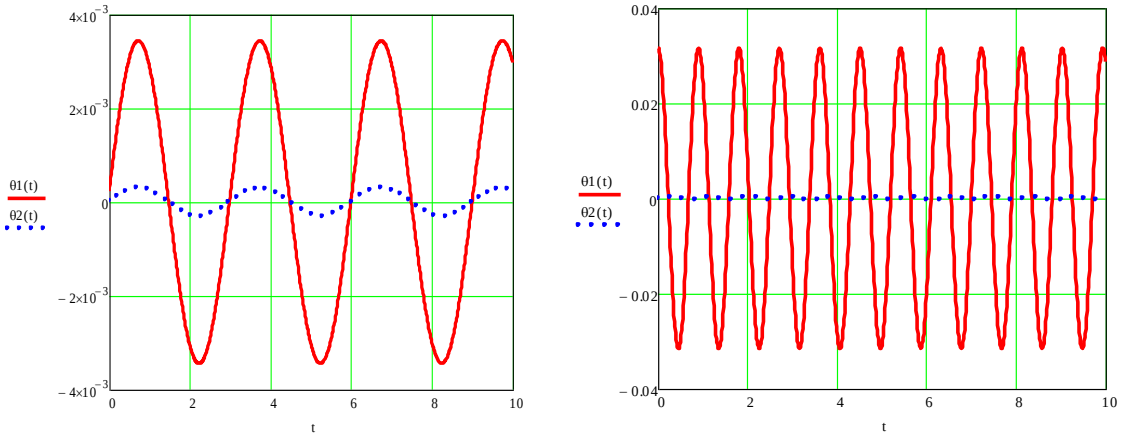


Рис. 3. Динамические ошибки механизма

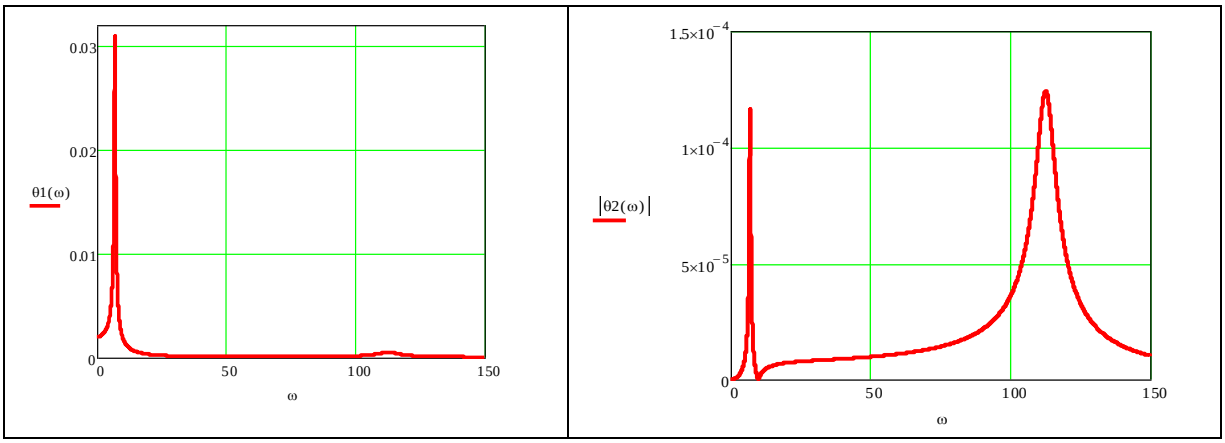


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики системы

Колебания рычажного механизма вблизи программного движения

Рассмотрим кривошипно-ползунный механизм, у которого входное звено OA вращается с постоянной угловой скоростью ω_0. Предположим, что податливым является только шатун AB, а из всех масс будем учитывать только массу ползуна m. Уравнение движения такого механизма вблизи программного движения может быть получено с помощью общего уравнения динамики

$$-(c\theta + b\dot{\theta})\delta\theta - m\ddot{x}\delta x = -(c\theta + b\dot{\theta} + m\ddot{x}\delta x/\delta\theta)\delta\theta = 0,$$

откуда

$$m\ddot{x}(\partial x/\partial\theta)_0 + b\dot{\theta} + c\theta = 0. \qquad (16)$$

Ускорение ползуна в соответствии с (3) и $\varphi = \omega_0 t$ может быть записано в виде

$$\ddot{x} = \left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi^2}\right)_0 \omega_0^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0 \ddot{\theta} + 2\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi\partial\theta}\right)_0 \omega_0\dot{\theta} + \left(\frac{\partial^3 x}{\partial\varphi^2\partial\theta}\right)_0 \omega_0^2\theta. \qquad (17)$$

Подставив (17) в (16), получим

$$m\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0^2\ddot{\theta} + \left[b + 2m\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi\partial\theta}\right)_0\omega_0\right]\dot{\theta} + \left[c + m\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0\left(\frac{\partial^3 x}{\partial\varphi^2\partial\theta}\right)_0\omega_0^2\right]\theta =$$

$$= -m\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi^2}\right)_0\omega_0^2. \qquad (18)$$

Поскольку функция положения упругого механизма

$$x = a\cos\varphi + \sqrt{(L+\theta)^2 - a^2\sin^2\varphi}, \qquad (19)$$

то

$$\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)_0 = \left(\frac{L+\theta}{\sqrt{(L+\theta)^2 - a^2\sin^2\varphi}}\right)_0 = \frac{1}{\sqrt{1-2\mu(1-\cos2\varphi)}} = 1 + \mu - \mu\cos2\varphi + \ldots,$$

где введен малый параметр $\mu = (a/2L)^2$. Остальные частные производные

$$\left(\frac{\partial^2 x}{\partial\theta\partial\varphi}\right)_0 \approx 2\mu\sin2\varphi;\ \left(\frac{\partial^3 x}{\partial\theta\partial\varphi^2}\right)_0 \approx 4\mu\cos2\varphi;\ \left(\frac{\partial^2 x}{\partial\varphi^2}\right)_0 \approx -a\cos\varphi. \qquad (20)$$

После подстановки частных производных в (18) уравнение движения при $\varphi = \omega_0 t$ запишется в виде

$$m\ddot{\theta} + (b + 4\mu m\omega_0\sin2\omega_0 t)\dot{\theta} + (c + 4\mu m\omega_0^2\cos2\omega_0 t)\theta = m\omega_0^2 a\cos\omega_0 t$$

или

$$\ddot{\theta} + 2n(t)\dot{\theta} + k^2(t) = W(t), \qquad (21)$$

где введены обозначения

$$n(t) = n + 2\mu\omega_0 \sin 2\omega_0 t; \quad k^2(t) = k^2 + 4\mu\omega_0^2 \cos 2\omega_0 t;$$

$$n = b/2m; \quad k^2 = c/m; \quad W(t) = \omega_0^2 a \cos\omega_0 t.$$

Таким образом, уравнение, описывающее колебания механизма вблизи программного движения $\varphi = \omega_0 t$, оказалось неоднородным линейным дифференциальным уравнением с периодически меняющимися коэффициентами, явно зависящими от времени. Уравнение (21) показывает, что колебательная система помимо внешнего возбуждения $W(t)$ испытывает также воздействие в виде периодического изменения ее собственных параметров, т.е. могут возникнуть параметрические колебания.

Результаты

Амплитуды динамических ошибок на входе механизма превосходят амплитуды колебаний в продольном направлении шатуна. При резонансе системы ($\omega = k_1$) происходит существенный рост амплитуд динамических ошибок. Из графика амплитудно-частотной характеристики входного упругого элемента видно, что наибольшее значение имеет первый резонанс. При продольных колебаниях шатуна амплитуды колебаний при резонансах примерно одинаковы.

В особом положении рассматриваемого механизма $(\psi = 90^\circ \pm 180^\circ)$ имеем $\cos^2\psi = 0$; $-a\sin(\varphi + \psi) = \pm a\cos\varphi = \pm a(L/a) = \pm L$. Из частотного определителя

$$k^2\left(k^2 - c_1 + c_2 L^2/J\right) = 0,$$

находим $k_0 = 0$; $k_1 = \sqrt{c_1 + c_2 L^2/J}$, т.е. в этом положении одна из собственных частот становится равной нулю.

Заключение.

В рассматриваемой работе была сделана попытка определения динамических ошибок рычажного механизма. Для этого была выбрана простейшая расчетная модель кривошипно-ползунного механизма. Следует отметить, что усложнение физической модели, связанное с увеличением числа учитываемых упругих элементов, ведет к росту числа степеней свободы системы и существенному увеличению уравнений движения. В системах со многими деформациями составление уравнений Лагранжа второго рода и их решение является сложной задачей. Предлагается другой способ составления уравнений движения и их

решений, основанный на методе конечных элементов, и в определенной степени ориентированный на компьютерные технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Коловский М.З. Динамика машин-Л.:Машиностроение, 1989, 263 с.

[2] I.Vulfson. Dynamics of cyclic machines. Series: Foundations of Engineering Mechanics. Springer Verlag, 2015, 390 p.

[3] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000, 394 p.

[4] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. Theory of Machines and Mechanisms. Oxford University Press, 2010. 832 p.

[5] Dresig, H., Holzweißig, F.: Dynamics of Machinery. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010, 554 p.

[6] Beitelschmitd M., Dresig H. Machinendynamic. – Aufgaben und Beispiele. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. – 407 S.

[7] Harris, C. M., Crede, C. E.: Shock and Vibration Handbook, 6. Edition – New York: McGraw-Hill Book Company, 2010.

[8] Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Теория механизмов и машин в примерах и задачах. Часть 1 : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 284 с.

[9] Dresig, H.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. – 2. Aufl. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

[10] Semenov Yu.A., Semenova N.S., Egorova O.V. Dynamic Mesh in Accounting of the Time Variable Mesh Stiffness of a Gear Train. I.RE.M.E., Vol. 12, N.9, pp.736-741, 2018

[11] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Determination .of Dynamic Errors in Machines with Elastic Links. Springer, June 2019, pp. 163-174.

[12] Evgrafov A.N., KarazinV.I., Petrov G.N., Analysis of the self-braking effect of linkage mechanisms. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119-127

[13] Norton R.L. Design of Machinery,4 ed, McGraw Hill, 2007, p.860.

[14] Mabie H.H., Reinholz C.F. Mechanisms and Dynamics of Machinery. John Wiley and Sons, New York, 2011, p.644.

[15] Семенов Ю.А. Динамика машин. Изд-во Политехн. ун-та, 2010, 318 с.

[16] 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.

Yu. A. Semenov[1], N.S. Semenova[2]

DETERMINATION OF DYNAMIC ERRORS OF A LEVER MECHANISM WITH ELASTIC LINKS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Abstract

Solving a number of problems of the dynamics of modern machines requires the study of elastic vibrations of lever mechanisms. The causes of such fluctuations may be different, but their result is usually unfavorable – the appearance of alternating loads, a decrease in the accuracy qualities of the mechanism, increased wear in kinematic pairs, etc. The paper presents one of the dynamic models of the crank-slider mechanism and identifies dynamic errors caused by disturbing forces.

Keywords: lever mechanism, natural frequencies, dynamic errors.

REFERENCES

[1] Kolovsky M.Z. Dynamics of machines-L.: Mechanical Engineering, 1989, 263 p. (rus.)
[2] I. Wolfson. Dynamics of cyclic machines. Series: Fundamentals of Engineering Mechanics. . Springer Verlag, 2015, 390 p.
[3] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Sloush A.V. Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000, 394 p.
[4] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. Theory of machines and mechanisms. Oxford University Press, 2010. 832 p.
[5] Dresig H., Holzweisig F. Dynamics of cars. Springer- Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010, 554 p.
[6] Beitelschmitt M., Dresig H. Machine dynamics. – A Aufgaben and Beispile. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. – 407 p .
[7] Harris, K. M., Krede, K. E.: Handbook of Shocks and Vibrations, 6. Edition – New York: McGraw-Hill Book Company, 2010.
[8] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Theory of mechanisms and machines in examples and problems Part 1 : Publishing House of the Polytechnic University, 2015. – 284 p (rus.).

[9] Dresig H.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme. – 2. Aufl. – Berlin; Heidelberg: : Springer-Verlag, 2005. International Review of Mechanical Engineering.
[10] Semenov Yu.A., Semenova N.S., Egorova O.V. Dynamic mesh taking into account the time-varying rigidity of the gear mesh. I.RE.M.E., Volume 12, No. 9, pp.736-741, 2018
[11] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Determination .of Dynamic Errors in Machines with Elastic Links. Springer, June 2019, pp. 163-174.
[12] 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.
[13] Norton R.L. Design of Machinery,4 ed, McGraw Hill, 2007, p.860.
[14] Mabie H.H., Reinholz C.F. Mechanisms and Dynamics of Machinery. John Wiley and Sons, 2011, p.644.
[15] Semenov Yu.A. Dynamics of machines. Publishing house of the Polytechnic University, , 2010, 318 p. (rus.)
[16] 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.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича.- СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 531.53

А.С. Смирнов[1], Б.А. Смольников[2]

КОЛЕБАНИЯ ДВОЙНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА С ВНУТРЕННИМ ТРЕНИЕМ

[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 работе исследуется влияние сил внутреннего трения на колебания двойного математического маятника с идентичными параметрами звеньев и концевых грузов. Построена диссипативная функция внутреннего трения и получена математическая модель малых колебаний системы, в которой диссипативные эффекты имеют третий порядок малости. На основе метода усреднения строится приближенное решение рассматриваемой задачи, которое позволяет проанализировать затухание движений системы под действием внутреннего трения как по каждой из ее форм колебаний в отдельности при соответствующих начальных условиях, так и в общем случае при их одновременном наличии в решении. Полученные результаты представлены в виде наглядных графических иллюстраций и могут представлять определенный теоретический и практический интерес.

Ключевые слова: двойной маятник, внутреннее трение, диссипативная функция, метод усреднения.

Введение

Динамике двойного маятника и его многочисленных разновидностей в самых разнообразных условиях их функционирования посвящено большое количество работ [1-12]. Интерес к этой системе с каждым годом лишь возрастает по причине того, что она представляет собой простейший двухзвенный манипулятор, работающий в гравитационном силовом поле, поэтому на его примере можно качественно и количественно описать динамику многочисленных робототехнических конструкций. Однако при этом влияние диссипативных эффектов, которые неизбежно присутствуют во всех реальных системах и заметно усложняют динамическую картину поведения, принимается во внимание не столь часто. Например, в [13] обсуждается действие вязкого и сухого трения на динамику двойного маятника, в [14] рассматривается двойной маятник с движущейся точкой подвеса в среде с квадратичным трением, в [15] изучается двойной физический маятник с сухим трением в шарнирах. Наконец, в работах [16] и [17] рассматривается соответственно аналитическое и численное исследование колебаний пространственного двойного маятника с учетом вязкого трения. Несмотря на богатство представленных моделей трения, остается открытым вопрос об учете влияния внутреннего трения на колебания различных систем [18,19,20]. Настоящая статья посвящена построению математической модели малых колебаний двойного математического маятника при наличии внутреннего трения в его стержнях и ее приближенному аналитическому исследованию.

Консервативная модель малых колебаний двойного маятника

Рассмотрим двойной гравитационный маятник, состоящий из двух шарнирно соединенных одинаковых математических маятников длиной l и с концевыми грузами массой m (рис. 1).

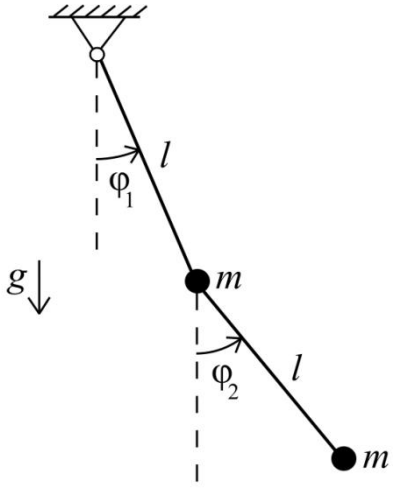


Рис. 1. Двойной математический маятник

Кинетическая и потенциальная энергии этой системы в квадратичной аппроксимации, т. е. для малых колебаний, имеют хорошо известный вид:

$$T=\frac{1}{2}ml^2\left(2\dot{\varphi}_1^2+2\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2+\dot{\varphi}_2^2\right)=\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\varphi}}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_0\dot{\boldsymbol{\varphi}},\quad \Pi=\frac{1}{2}mgl\left(2\varphi_1^2+\varphi_2^2\right)=\frac{1}{2}\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}_0\boldsymbol{\varphi},\ (1)$$

где $\boldsymbol{\varphi}=[\varphi_1,\varphi_2]^{\mathrm{T}}$ – столбец обобщенных координат, в качестве которых приняты углы отклонения звеньев маятника от вертикали φ_1 и φ_2, а $\mathbf{A}_0$ и $\mathbf{C}_0$ – соответственно симметричные постоянные матрицы инерционных и квазиупругих коэффициентов, которые определяются выражениями:

$$\mathbf{A}_0=ml^2\begin{bmatrix}2 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix},\ \mathbf{C}_0=mgl\begin{bmatrix}2 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Запишем также отвечающее им уравнение движения в матричной форме:

$$\mathbf{A}_0\ddot{\boldsymbol{\varphi}}+\mathbf{C}_0\boldsymbol{\varphi}=0. \qquad (3)$$

Частоты k_{10}, k_{20} и формы колебаний $\boldsymbol{\Phi}_{(1)}$, $\boldsymbol{\Phi}_{(2)}$ этой системы имеют вид:

$$k_{10}=k\sqrt{2-\sqrt{2}},\quad k_{20}=k\sqrt{2+\sqrt{2}},\quad \boldsymbol{\Phi}_{(1)}=\begin{bmatrix}1\\ \sqrt{2}\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{\Phi}_{(2)}=\begin{bmatrix}1\\ -\sqrt{2}\end{bmatrix}, \qquad (4)$$

где обозначено $k=\sqrt{g/l}$. Для дальнейших действий также понадобятся нормировочные коэффициенты, вычисляемые по следующим формулам:

$$H_1=\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_0\boldsymbol{\Phi}_{(1)}=2\left(2+\sqrt{2}\right)ml^2,\quad H_2=\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_0\boldsymbol{\Phi}_{(2)}=2\left(2-\sqrt{2}\right)ml^2. \qquad (5)$$

Построение диссипативной функции внутреннего трения

Перейдем теперь к построению диссипативной функции внутреннего трения в стержневых элементах маятника. Примем ее в виде [19,20]:

$$R=\frac{1}{2}b_0\left(\dot{N}_1^2+\dot{N}_2^2\right)=\frac{1}{2}b_0\dot{\mathbf{N}}^{\mathrm{T}}\dot{\mathbf{N}}, \qquad (6)$$

где b_0 – диссипативный коэффициент, а столбец внутренних усилий $\mathbf{N}=[N_1,N_2]^{\mathrm{T}}$ в стержнях двойного маятника определим, разделяя его по этим стержням на подсистемы и записывая для них уравнения динамики в проекциях на соответствующие направления в консервативной постановке:

$$\mathbf{N}=ml\begin{bmatrix}2\dot{\varphi}_1^2\\ \dot{\varphi}_2^2\end{bmatrix}+ml\begin{bmatrix}\dot{\varphi}_2^2\\ \dot{\varphi}_1^2\end{bmatrix}\cos(\varphi_2-\varphi_1)+ml\begin{bmatrix}\ddot{\varphi}_2\\ -\ddot{\varphi}_1\end{bmatrix}\sin(\varphi_2-\varphi_1)+mg\begin{bmatrix}2\cos\varphi_1\\ \cos\varphi_2\end{bmatrix}. \qquad (7)$$

Поскольку структура усилий (7) является весьма сложной, а при вычислении диссипативной функции их необходимо дифференцировать по времени, то ее выражение окажется весьма громоздким. С целью упрощения конечных уравнений для возможности их приближенного аналитического решения ограничимся в дальнейшем рассмотрением лишь малых отклонений звеньев маятника от положения равновесия $\varphi_1=0$,

$\varphi_2 = 0$, что позволит использовать несколько предположений. Во-первых, запишем столбец усилий (7) в квадратичной аппроксимации:

$$\mathbf{N} = \mathbf{N}_0 + ml\begin{bmatrix} 2\dot{\varphi}_1^2 \\ \dot{\varphi}_2^2 \end{bmatrix} + ml\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_2^2 \\ \dot{\varphi}_1^2 \end{bmatrix} + ml\begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_2 \\ -\ddot{\varphi}_1 \end{bmatrix}(\varphi_2 - \varphi_1) - \frac{1}{2}mg\begin{bmatrix} 2\varphi_1^2 \\ \varphi_2^2 \end{bmatrix}, \qquad (8)$$

где постоянный столбец $\mathbf{N}_0 = mg[2,1]^{\mathrm{T}}$, очевидно, представляет собой столбец усилий в положении равновесия $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 0$. Во-вторых, будем рассматривать диссипативную функцию на невозмущенном движении (3), т. е. на консервативном движении системы при малых отклонениях. Поэтому при вычислении производной столбца $\mathbf{N}$ можно исключить вторые и третьи производные обобщенных координат при помощи уравнения (3), из которого следует, что $\ddot{\boldsymbol{\varphi}} = -\mathbf{A}_0^{-1}\mathbf{C}_0\boldsymbol{\varphi}$, а также $\dddot{\boldsymbol{\varphi}} = -\mathbf{A}_0^{-1}\mathbf{C}_0\dot{\boldsymbol{\varphi}}$. В результате можно прийти к следующему выражению для $\dot{\mathbf{N}}$:

$$\dot{\mathbf{N}} = \mathbf{D}_0(\boldsymbol{\varphi})\dot{\boldsymbol{\varphi}}, \quad \mathbf{D}_0(\boldsymbol{\varphi}) = mg\begin{bmatrix} -14\varphi_1 + 8\varphi_2 & 8\varphi_1 - 8\varphi_2 \\ -8\varphi_1 + 5\varphi_2 & 7\varphi_1 - 7\varphi_2 \end{bmatrix}. \qquad (9)$$

Диссипативная функция внутреннего трения согласно (6) тогда представится в виде квадратичной формы столбца обобщенных скоростей

$$R = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\varphi}}^{\mathrm{T}}\mathbf{B}_0(\boldsymbol{\varphi})\dot{\boldsymbol{\varphi}} \qquad (10)$$

с симметричной матрицей $\mathbf{B}_0(\boldsymbol{\varphi}) = b_0\mathbf{D}_0^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{D}_0(\boldsymbol{\varphi})$, или в явном виде:

$$\mathbf{B}_0(\boldsymbol{\varphi}) = \beta\begin{bmatrix} 260\varphi_1^2 + 89\varphi_2^2 - 304\varphi_1\varphi_2 & 267\varphi_1\varphi_2 - 168\varphi_1^2 - 99\varphi_2^2 \\ 267\varphi_1\varphi_2 - 168\varphi_1^2 - 99\varphi_2^2 & 113\varphi_1^2 + 113\varphi_2^2 - 226\varphi_1\varphi_2 \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

где также введен новый диссипативный коэффициент $\beta = b_0 m^2 g^2$. Видно, что эта матрица имеет второй порядок малости. В результате матричное уравнение движения системы при малых отклонениях при наличии внутренней диссипации приобретет вид:

$$\mathbf{A}_0\ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{C}_0\boldsymbol{\varphi} = -\mathbf{B}_0(\boldsymbol{\varphi})\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{Q}, \qquad (12)$$

где диссипативные эффекты имеют третий порядок малости. Отметим, что в отличие от нелинейных диссипативных слагаемых, мы исключили здесь из рассмотрения нелинейные консервативные слагаемые, поскольку нас интересует характер затухания колебаний маятника, определяемый именно диссипативными слагаемыми.

Построение приближенного решения

Для получения приближенного решения матричного уравнения (12) воспользуемся методами усреднения для многочастотных систем [21, 22]. С этой целью будем разыскивать его решение в следующем виде:

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\Phi}_{(1)} a\cos\psi + \boldsymbol{\Phi}_{(2)} b\cos\theta,\ \ a = a(t),\ \ b = b(t),\ \ \psi_0 = \psi_0(t),\ \ \theta_0 = \theta_0(t),\ \ (13)$$

где $\psi = k_{10}t + \psi_0$, $\theta = k_{20}t + \theta_0$ – полные фазы колебаний, а $a(t)$, $b(t)$, $\psi_0(t)$, $\theta_0(t)$ – медленно меняющиеся функции времени. Поскольку вместо искомого столбца $\boldsymbol{\varphi}$, содержащего два элемента, мы ввели в рассмотрение четыре новые функции, то следует подчинить их дополнительным условиям, чтобы исключить свободу их выбора, а именно, положить

$$\dot{a}\cos\psi - a\sin\psi\dot{\psi}_0 = 0,\quad \dot{b}\cos\theta - b\sin\theta\dot{\theta}_0 = 0. \qquad (14)$$

Вычисляя теперь согласно (13) и (14) столбец обобщенных скоростей

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = -\boldsymbol{\Phi}_{(1)} a k_{10}\sin\psi - \boldsymbol{\Phi}_{(2)} b k_{20}\sin\theta, \qquad (15)$$

видим, что он имеет тот же вид, что и в линейной консервативной модели, где a, b, ψ_0, θ_0 постоянны. Находя далее столбец обобщенных ускорений

$$\ddot{\boldsymbol{\varphi}} = -\boldsymbol{\Phi}_{(1)} k_{10}\left[\dot{a}\sin\psi + a(k_{10} + \dot{\psi}_0)\cos\psi\right] - \boldsymbol{\Phi}_{(2)} k_{20}\left[\dot{b}\sin\theta + b(k_{20} + \dot{\theta}_0)\cos\theta\right], \qquad (16)$$

подставим (13), (15) и (16) в уравнение (12), учитывая, что формы колебаний $\boldsymbol{\Phi}_{(1)}$, $\boldsymbol{\Phi}_{(2)}$ и отвечающие им частоты k_{10}, k_{20} удовлетворяют уравнениям $\left(\mathbf{C}_0 - k_{10}^2\mathbf{A}_0\right)\boldsymbol{\Phi}_{(1)} = 0$ и $\left(\mathbf{C}_0 - k_{20}^2\mathbf{A}_0\right)\boldsymbol{\Phi}_{(2)} = 0$:

$$\mathbf{A}_0\left[\boldsymbol{\Phi}_{(1)} k_{10}\left(\dot{a}\sin\psi + a\cos\psi\dot{\psi}_0\right) + \boldsymbol{\Phi}_{(2)} k_{20}\left(\dot{b}\sin\theta + b\cos\theta\dot{\theta}_0\right)\right] = -\mathbf{Q}, \qquad (17)$$

где в столбец $\mathbf{Q}$ здесь и далее вместо $\boldsymbol{\varphi}$ и $\dot{\boldsymbol{\varphi}}$ подставлены выражения (13) и (15) соответственно. Домножая теперь (17) слева поочередно на $\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}$ и $\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}$ и используя условия ортогональности $\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_0\boldsymbol{\Phi}_{(2)} = 0$, $\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_0\boldsymbol{\Phi}_{(1)} = 0$, а также учитывая выражения (5), приходим к двум скалярным уравнениям:

$$\dot{a}\sin\psi + a\cos\psi\dot{\psi}_0 = -\frac{1}{H_1 k_{10}}\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q},\quad \dot{b}\sin\theta + b\cos\theta\dot{\theta}_0 = -\frac{1}{H_2 k_{20}}\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}. \qquad (18)$$

Объединяя далее системы (14) и (18) в одну единую систему уравнений и разрешая ее относительно производных $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{\psi}_0$, $\dot{\theta}_0$, получим:

$$\begin{cases} \dot{a} = -\dfrac{1}{H_1 k_{10}}\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\sin\psi \\ \dot{b} = -\dfrac{1}{H_2 k_{20}}\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\sin\theta \end{cases},\qquad \begin{cases} \dot{\psi}_0 = -\dfrac{1}{aH_1 k_{10}}\boldsymbol{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\cos\psi \\ \dot{\theta}_0 = -\dfrac{1}{bH_2 k_{20}}\boldsymbol{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\cos\theta \end{cases}, \qquad (19)$$

где уравнения для интересующих нас в первую очередь амплитуд $a(t)$ и $b(t)$ записаны отдельным блоком. Следует подчеркнуть, что до сих пор в данном пункте не делалось никаких приближений, так что полученные уравнения (19) эквивалентны исходному уравнению (12). Достоинство же системы (19) заключается в том, что она представляет собой систему для медленно меняющихся функций времени. Поэтому можно осуществить процедуру усреднения для этой системы, которая заключается в замене

правых частей уравнений (19) на их средние значения по обеим полным фазам ψ и θ (которые трактуются как быстрые фазы) и может быть проведена для нерезонансного случая (в нашей задаче рассматривается именно такой случай, т. к. частоты колебаний k_{10} и k_{20} согласно (4) являются несоизмеримыми). В результате придем к уравнениям:

$$\begin{cases} \dot{a} = -\dfrac{1}{4\pi^2 H_1 k_{10}} \displaystyle\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \sin\psi d\psi d\theta = -\dfrac{\beta}{2}\left(Aa^3 + Cab^2\right) \\ \dot{b} = -\dfrac{1}{4\pi^2 H_2 k_{20}} \displaystyle\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \sin\theta d\psi d\theta = -\dfrac{\beta}{2}\left(Ca^2 b + Bb^3\right) \end{cases}, \qquad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi}_0 = -\dfrac{1}{4\pi^2 a H_1 k_{10}} \displaystyle\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \cos\psi d\psi d\theta = 0 \\ \dot{\theta}_0 = -\dfrac{1}{4\pi^2 b H_2 k_{20}} \displaystyle\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \cos\theta d\psi d\theta = 0 \end{cases},$$

где значения числовых коэффициентов A, B и C есть:

$$A = \frac{918 - 645\sqrt{2}}{2} \approx 2.916, \quad B = \frac{918 + 645\sqrt{2}}{2} \approx 915.1, \quad C = 6. \qquad (21)$$

Отметим, что вторая система в (20) является очевидной, т. к. мы не учли нелинейные консервативные слагаемые в уравнении (12), поэтому никаких поправок к величинам частот и не должны были получить.

Прежде, чем строить решение первой системы в (20) для общего случая, рассмотрим сначала, как будет происходить затухание колебаний двойного маятника под действием внутреннего трения при задании начальных условий, отвечающих его формам колебаний $\mathbf{\Phi}_{(1)}$ или $\mathbf{\Phi}_{(2)}$ по отдельности. Ясно, что в этих ситуациях целесообразно использовать обычный одночастотный метод усреднения. Так, при задании начальных условий по первой форме колебаний $\mathbf{\Phi}_{(1)}$ необходимо изначально положить $b = 0$, начиная с формулы (13), и проделать аналогичные действия, в результате чего у нас останутся лишь первые уравнения систем (19). Усредняя их лишь по одной быстрой фазе ψ, получим:

$$\dot{a} = -\frac{1}{2\pi H_1 k_{10}} \int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \sin\psi d\psi = -\frac{\beta}{2} Aa^3, \quad \dot{\psi}_0 = -\frac{1}{2\pi a H_1 k_{10}} \int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(1)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \cos\psi d\psi = 0. \qquad (22)$$

Если же начальные условия задаются по второй форме колебаний $\mathbf{\Phi}_{(2)}$, то следует изначально положить $a = 0$, вследствие чего по аналогии получим:

$$\dot{b} = -\frac{1}{2\pi H_2 k_{20}} \int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \sin\theta d\theta = -\frac{\beta}{2} Bb^3, \quad \dot{\theta}_0 = -\frac{1}{2\pi a H_2 k_{20}} \int_0^{2\pi} \mathbf{\Phi}_{(2)}^{\mathrm{T}} \mathbf{Q} \cos\theta d\theta = 0.$$

(23)

Нетрудно видеть, что полученные уравнения (22) и (23) для определения функций $a(t)$ и $b(t)$ вытекают как частные случаи и из первой системы уравнений (20) для общего случая соответственно при $b=0$ и $a=0$. Решения указанных уравнений имеют следующий вид:

$$a(t)=\frac{1}{\sqrt{a_0^{-2}+\beta At}},\quad b(t)=\frac{1}{\sqrt{b_0^{-2}+\beta Bt}}. \tag{24}$$

Видно, что зависимости (24) аналогичны формулам, полученным в [19] для случая обычного математического маятника с внутренней диссипацией. Кроме того, поскольку B существенно больше, чем A, то затухание колебаний по второй форме будет более ощутимым, чем по первой форме.

Возвращаясь к первой системе в (20), построим теперь ее общее решение. Для этого умножим первое из ее уравнений на a, а второе на b, а также осуществим замену переменных $x=a^2$, $y=b^2$. В результате этих действий получим более простую систему:

$$\begin{cases}\dot{x}=-\beta\left(Ax^2+Cxy\right)\\ \dot{y}=-\beta\left(Cxy+By^2\right)\end{cases}. \tag{25}$$

Покажем, что система (25) допускает построение решения в квадратурах. С этой целью получим сначала уравнение интегральных кривых данной системы, разделив второе ее уравнение на первое:

$$\frac{dy}{dx}=\frac{Cxy+By^2}{Ax^2+Cxy}=\frac{C(y/x)+B(y/x)^2}{A+C(y/x)}. \tag{26}$$

Полученное уравнение имеет вид $y'=f(y/x)$, где штрихом здесь и далее обозначается производная по переменной x. Как известно, уравнения подобного вида сводятся к уравнению с разделяющимися переменными посредством введения новой переменной u следующим образом:

$$y=ux,\quad u=\frac{y}{x},\quad y'=u'x+u. \tag{27}$$

Тогда уравнение (26) после преобразований примет вид:

$$\frac{(A+Cu)du}{(B-C)u^2+(C-A)u}=\frac{dx}{x}. \tag{28}$$

В результате его интегрирования находим:

$$\frac{A}{C-A}\ln u+\frac{C^2-AB}{(C-A)(B-C)}\ln\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]=\ln cx, \tag{29}$$

где $c=\text{const}$ – константа интегрирования. Потенцируя (29), получим:

$$x=\frac{1}{c}u^m\ln\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]^n, \tag{30}$$

где показатели степеней m и n имеют следующие значения:

$$m=\frac{A}{C-A}=\frac{430\sqrt{2}-19}{623}\approx 0.946,\quad n=\frac{C^2-AB}{(C-A)(B-C)}=-\frac{585}{623}\approx -0.939. \quad (31)$$

Таким образом, согласно формулам (27) и (30) приходим к следующим параметрическим уравнениям интегральных кривых:

$$x(u)=\frac{1}{c}u^m\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]^n,\quad y(u)=\frac{1}{c}u^{m+1}\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]^n, \quad (32)$$

где u выступает в роли параметра. Константа c определяется здесь через начальные условия движения следующим образом:

$$c=\frac{u_0^m}{x_0}\left[C-A+\left(B-C\right)u_0\right]^n,\quad u_0=\frac{y_0}{x_0}, \quad (33)$$

где u_0 – начальное значение параметра u. После этого можно перейти непосредственно к составлению искомой квадратуры. Обращаясь к выражениям (27), вычислим $\dot{u}$, принимая во внимание уравнения (25):

$$\dot{u}=\frac{\dot{y}x-\dot{x}y}{x^2}=-\beta\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]ux. \quad (34)$$

Подставляя теперь сюда зависимость (32) для $x(u)$, приходим к уравнению с разделяющимися переменными, которое и приводит к квадратуре:

$$\int_{u_0}^{u}\frac{du}{u^{m+1}\left[C-A+\left(B-C\right)u\right]^{n+1}}=-\frac{\beta}{c}t. \quad (35)$$

Из этого соотношения можно определить зависимость $t=t(u)$, обращая которую, получим зависимость $u=u(t)$. Подставляя ее в параметрические уравнения (32), можно определить зависимости $x=x(t)$, $y=y(t)$, а, стало быть, и исходные амплитуды $a=a(t)$ и $b=b(t)$ в решении (13).

Обсуждение результатов

Перейдем теперь к обсуждению полученных результатов. Для оценки работоспособности использованных в работе методов усреднения, которые и представляют наибольший интерес, зададим сначала начальные условия, отвечающие первой форме колебаний, а затем и второй форме колебаний. Для первого варианта проинтегрируем первые уравнения систем (19), вследствие чего найдем функцию $a=a(t)$, а для второго – вторые уравнения систем (19), которые дадут функцию $b=b(t)$. На эти численные зависимости, которые приведены на рис. 2, наложим соответствующие аналитические зависимости, отвечающие формулам (24) (здесь красные линии – численные результаты, а синие линии – аналитические). По рис. 2 отчетливо прослеживается сущность одночастотного метода усреднения и его корректная работа. Затем проведем еще один эксперимент, задавая

теперь начальные условия, не отвечающие какой-либо форме колебаний, и проинтегрируем численно уже все уравнения (19), после чего сравним полученные численные зависимости $a = a(t)$ и $b = b(t)$ с построенными выше приближенными аналитическими решениями первой системы (20) на основе двухчастотного метода усреднения. Графики, представленные на рис. 3 для этого случая, демонстрируют адекватную работу двухчастотного метода усреднения и определяют ценность полученных в работе формул.

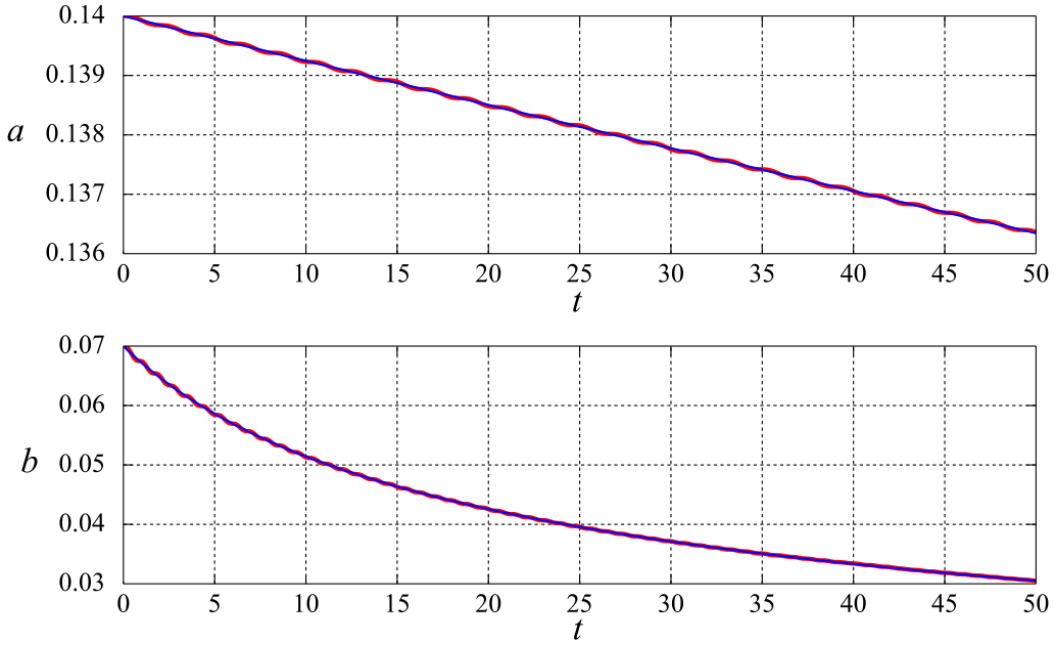


Рис. 2. Зависимость амплитуд a и b от времени t при затухании по каждой из форм колебаний в отдельности

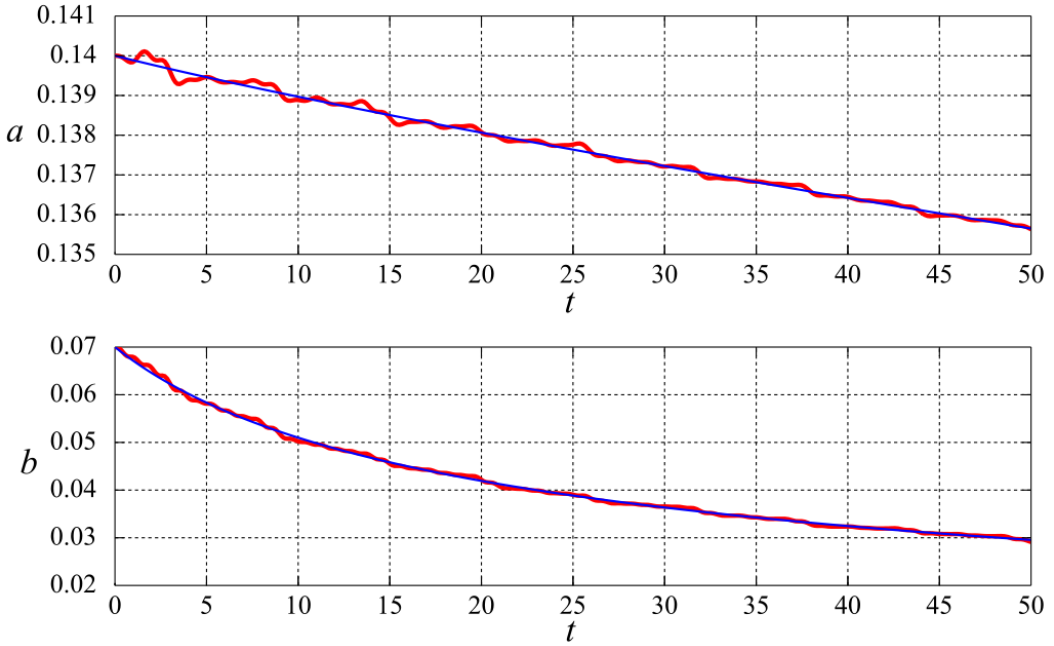


Рис. 3. Зависимость амплитуд a и b от времени t в общем случае затухания

Заключение

В настоящей работе была рассмотрена математическая модель малых колебаний двойного математического маятника, который испытывает действие внутреннего трения в обоих своих стержневых элементах. На основе принятой диссипативной функции были получены уравнения движения с нелинейными диссипативными эффектами и построено их приближенное аналитическое решение как для случая затухания по каждой из форм колебаний в отдельности, так и для общего случая. Для этого были применены соответственно одночастотный и двухчастотный методы усреднения, использование которых оказалось достаточно эффективным. В результате этих действий удалось адекватно оценить постепенный дрейф величин, которые характеризуют амплитуды каждой из форм колебаний, с течением времени. Все это позволяет лишний раз рекомендовать подобные методы для построения приближенных решений и в других задачах прикладной теории колебаний, а предложенная модель внутреннего трения может быть использована для описания процессов затухания колебательных движений в самых разнообразных механических системах с несколькими степенями свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Lavrovskii E.K., Formalskii A.M. The optimal control synthesis of the swinging and damping of a double pendulum. 2001. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 65(2), pp. 219-227.

[2] Reshmin S.A. Decomposition method in the problem of controlling an inverted double pendulum with the use of one control moment. 2005. Journal of Computer and Systems Sciences International. 44(6), pp. 861-877.

[3] Cross R. A double pendulum swing experiment: In search of a better bat. 2005. American Journal of Physics. 73(4), pp. 330-339.

[4] Formalskii A.M. On stabilization of an inverted double pendulum with one control torque. 2006. Journal of Computer and Systems Sciences International. 45(3), pp. 337-344.

[5] Stachowiak T., Okada T. A numerical analysis of chaos in the double pendulum. 2006. Chaos, Solitons and Fractals. 29(2), pp. 417-422.

[6] Kholostova O.V. On the motions of a double pendulum with vibrating suspension point. 2009. Mechanics of Solids. 44(2), pp. 184-197.

[7] Rafat M., Wheatland M., Bedding T. Dynamics of a double pendulum with distributed mass. 2009. American Journal of Physics. 77(3), pp. 216-223.

[8] Awrejcewicz J., Wasilewski G., Kudra G., Reshmin S.A. An experiment with swinging up a double pendulum using feedback control. 2012. Journal of Computer and Systems Sciences International. 51(2), pp. 176-182.
[9] Bulanchuk P.O., Petrov A.G. Suspension point vibration parameters for a given equilibrium of a double mathematical pendulum. 2013. Mechanics of Solids. 48(4), pp. 380-387.
[10] Maiti S., Roy J., Mallik A.K., Bhattacharjee J. Nonlinear dynamics of a rotating double pendulum. 2015. Physics Letters. 380(3), pp. 408-412.
[11] Elbori A., Abdalsmd L. Simulation of Double Pendulum. 2017. Journal of Software Engineering and Simulation. 3(7), pp. 1-13.
[12] Luo A.C.J., Guo C. A Period-1 Motion to Chaos in a Periodically Forced, Damped, Double-Pendulum. 2019. Journal of Vibration Testing and System Dynamics. 3(3), pp. 259-280.
[13] Sawant K.R., Shrikanth V. Energy dissipation and behavioral regimes in an autonomous double pendulum subjected to viscous and dry friction damping. 2021. European Journal of Physics. 42(5), 055008.
[14] Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: ГИФМЛ, 1961. 824 с.
[15] Вильнит Л.Н. Дифференциальные уравнения движения механических систем с сухим трением. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2004. 30 с.
[16] Смирнов А.С., Смольников Б.А. Диссипативная модель двойного математического маятника с неколлинеарными шарнирами. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 179-191.
[17] Bendersky S., Sandler B. Investigation of a spatial double pendulum: an engineering approach. 2006. Discrete Dynamics in Nature and Society. pp. 1–22.
[18] Смольников Б.А., Смирнов А.С. Колебания струны с внутренним трением. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 192-203.
[19] Смольников Б.А. Эволюционная динамика маятниковых систем. Теория механизмов и машин. 2008. Т. 6. 1 (11). С. 41-47.
[20] Смирнов А.С., Смольников Б.А. О соответствии эволюционной и классической моделей внутренней диссипации. Неделя науки СПбПУ. ИПММ. 2017. С. 142-144.
[21] Скубов Д.Ю. Основы теории нелинейных колебаний. СПб.: Лань, 2013. 320 с.
[22] Красильников П.С. Прикладные методы исследования нелинейных колебаний. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 528 с.

A.S. Smirnov[1,2], B.A. Smolnikov[1,2]

OSCILLATIONS OF DOUBLE MATHEMATICAL PENDULUM WITH INTERNAL FRICTION

[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 investigates the influence of internal friction forces on the oscillations of a double mathematical pendulum with identical parameters of links and end loads. A dissipative function of internal friction is constructed and a mathematical model of small oscillations of the system is obtained, in which dissipative effects have the third order of smallness. An approximate solution of the problem is constructed based on the averaging method. It allows to analyze the fading of system motions under the action of internal friction both for each of its oscillation modes separately under the appropriate initial conditions and in the general case with their simultaneous presence in the solution. The obtained results are presented in the form of visual graphic illustrations and may be of certain theoretical and practical interest.

Key words: double pendulum, internal friction, dissipative function, averaging method.

REFERENCES

[1] Lavrovskii E.K., Formalskii A.M. The optimal control synthesis of the swinging and damping of a double pendulum. 2001. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 65(2), pp. 219-227.
[2] Reshmin S.A. Decomposition method in the problem of controlling an inverted double pendulum with the use of one control moment. 2005. Journal of Computer and Systems Sciences International. 44(6), pp. 861-877.
[3] Cross R. A double pendulum swing experiment: In search of a better bat. 2005. American Journal of Physics. 73(4), pp. 330-339.
[4] Formalskii A.M. On stabilization of an inverted double pendulum with one control torque. 2006. Journal of Computer and Systems Sciences International. 45(3), pp. 337-344.
[5] Stachowiak T., Okada T. A numerical analysis of chaos in the double pendulum. 2006. Chaos, Solitons and Fractals. 29(2), pp. 417-422.
[6] Kholostova O.V. On the motions of a double pendulum with vibrating suspension point. 2009. Mechanics of Solids. 44(2), pp. 184-197.

[7] Rafat M., Wheatland M., Bedding T. Dynamics of a double pendulum with distributed mass. 2009. American Journal of Physics. 77(3), pp. 216-223.
[8] Awrejcewicz J., Wasilewski G., Kudra G., Reshmin S.A. An experiment with swinging up a double pendulum using feedback control. 2012. Journal of Computer and Systems Sciences International. 51(2), pp. 176-182.
[9] Bulanchuk P.O., Petrov A.G. Suspension point vibration parameters for a given equilibrium of a double mathematical pendulum. 2013. Mechanics of Solids. 48(4), pp. 380-387.
[10] Maiti S., Roy J., Mallik A.K., Bhattacharjee J. Nonlinear dynamics of a rotating double pendulum. 2015. Physics Letters. 380(3), pp. 408-412.
[11] Elbori A., Abdalsmd L. Simulation of Double Pendulum. 2017. Journal of Software Engineering and Simulation. 3(7), pp. 1-13.
[12] Luo A.C.J., Guo C. A Period-1 Motion to Chaos in a Periodically Forced, Damped, Double-Pendulum. 2019. Journal of Vibration Testing and System Dynamics. 3(3), pp. 259-280.
[13] Sawant K.R., Shrikanth V. Energy dissipation and behavioral regimes in an autonomous double pendulum subjected to viscous and dry friction damping. 2021. European Journal of Physics. 42(5), 055008.
[14] Lurie A.I. Analytical Mechanics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 846 p.
[15] Vilnit L.N. Differential equations of mechanical systems motion with dry friction. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2004. 30 p. (rus.)
[16] Smirnov A.S., Smolnikov B.A. Dissipative model of double mathematical pendulum with noncollinear joints. 2021. Modern mechanical engineering: Science and education. pp. 179-191. (rus.)
[17] Bendersky S., Sandler B. Investigation of a spatial double pendulum: an engineering approach. 2006. Discrete Dynamics in Nature and Society. pp. 1–22.
[18] Smolnikov B.A., Smirnov A.S. String oscillations with internal friction. Modern mechanical engineering: Science and education. pp. 192-203. (rus.)
[19] Smolnikov B.A. Evolutionary dynamics of pendulum systems. 2008. Theory of mechanisms and machines. V. 6, 1(11), pp. 41-47. (rus.)
[20] Smirnov A.S., Smolnikov B.A. On the correspondence of evolutionary and classical models of internal dissipation. 2017. Week of Science SPbPU. IAMM. pp. 142-144. (rus.)
[21] Skubov D.Yu. Fundamentals of the nonlinear oscillations theory. St. Petersburg: Lan', 2013. 320 p. (rus.)
[22] Krasilnikov P.S. Applied methods for studying nonlinear oscillations. Moscow, Izhevsk: Institute for Computer Research, 2015. 528 p. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

А.Н.Евграфов[1], Д.П.Козликин[2], Г.Н.Петров[3], В.А.Терешин[4,]
П.А.Андриенко[5]

ДВИЖЕНИЕ СВЕРХМАНЕВРЕННОГО САМОЛЕТА В ПЛОСКОМ ШТОПОРЕ

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

[2]Денис Петрович Козликин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com

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

[4]Валерий Алексеевич Терешин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-48-45, E-mail: terva@mail.ru.

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

Аннотация

Работа посвящена определению параметров движения самолета с управляемым вектором тяги двигателей. Высокоманевренные летательные аппараты способны выполнять фигуры высшего пилотажа, список которых

постоянно пополняется. Это связано с развитием технологии, совершенствованием конструкции самолета, системы управления и мастерства летчиков. Прежде чем приступить к выполнению сложных маневров на истребителях летный состав проходит обучение на спортивных самолетах. Приобретенные навыки выполнения фигур высшего пилотажа необходимы военным летчикам, хотя большинству самолетов даже пятого поколения многие из этих фигур недоступны. Летательные аппараты с отклоняемым вектором тяги демонстрируют свои возможности на многочисленных авиашоу. Однако, следует отметить, что в реальной боевой обстановке выполнение фигур высшего пилотажа бесполезно, так как снижает скорость и увеличивает вероятность поражения. Энергичное маневрирование эффективно только в ближнем бою или при отрыве от ракеты противника. Определению параметров движения самолета именно в этих условиях посвящена данная работа.

Ключевые слова: сверхманевренный самолет, управляемый вектор тяги, пилотаж, тяговооруженность.

Введение

К современным высокоманевренным летательным аппаратам предъявляются высокие требования по выполнению фигур высшего пилотажа [1]. В реальной боевой обстановке выполнение фигур высшего пилотажа бесполезно, так как снижает скорость и увеличивает вероятность поражения. Энергичное маневрирование эффективно только в ближнем бою или при отрыве от ракеты противника [2]. При этом возникают значительные динамические нагрузки, действующие на летательный аппарат [3]. Движение летательного аппарата определяется его аэродинамическими свойствами, обуславливающими взаимодействие с воздушной средой, тягой двигателей и силой тяжести [4]. Динамика высокоманевренного движения и наземное воспроизведение параметров такого движения обсуждаются в работах [5-11]. Математическое моделирование динамики полета возможно только отдельно для каждого самолета. В данной статье предлагается простой универсальный метод расчета движения самолета в специально выбранном режиме, допускающем такой расчет.

Методы

На рис. 1 показана схема движения летательного аппарата в плоском штопоре.

На первый взгляд полет кажется хаотическим с большим скольжением вплоть до движения «хвостом вперед», с переменными линейной и угловой скоростями. Однако, в дальнейшем будет показано, что при

аккуратном пилотировании на грани сваливания такое движение может быть достаточно хорошо сосчитано.

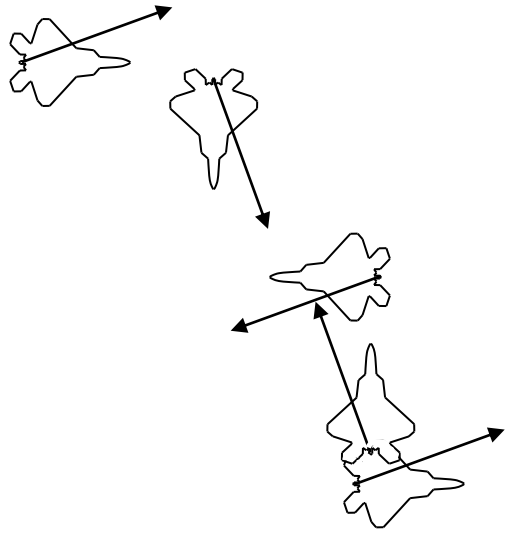


Рис. 1. Схема движения самолета в плоском штопоре с указанием вектора тяги

В работе исследуется полет летательного аппарата под действием постоянного вектора силы, смещенного относительно центра тяжести и значительно превосходящего сопротивление воздуха. Рассматривается движение летательного аппарата с тяговооруженностью больше единицы. Из-за значительного тягового усилия и создаваемого им момента на рысканье возникают линейное и угловое ускорения самолета, приводящие к большим перегрузкам и, как будет показано ниже, к сложным траекториям. Безусловно, речь здесь идет о перспективных самолетах, способных выполнять маневры в основном за счет двигателей, а не аэродинамических свойств. В настоящее время летательные аппараты практически не используют разнотягу, как малоэффективную для рысканья и крена [2]. При дальнейшем развитии конструкций сверхманевренных самолетов, уменьшении их инерционных параметров и совершенствовании управления обтеканием воздушными массами, особенно на сверхзвуковых скоростях, может оказаться необходимым концептуальное изменение применения двигателей. От них потребуется не только создание необходимой для полета скорости, но и обеспечение энергичного маневрирования при недостаточном или плохо управляемом воздействии воздуха. Уже сейчас в геометрии планера учитывается влияние исходящих из сопел газов на формирование обтекающего потока [1]. В данном исследовании рассматривается движение летательного аппарата с постоянным относительно корпуса вектором силы, лежащим в координатной плоскости главных осей инерции.

Математическая модель

В данной постановке задача динамики летательного аппарата сводится к описанию плоского движения абсолютно твердого тела под действием постоянного, смещенного относительно центра масс, вектора силы. На рис. 2 показана расчетная схема движения летательного аппарата.

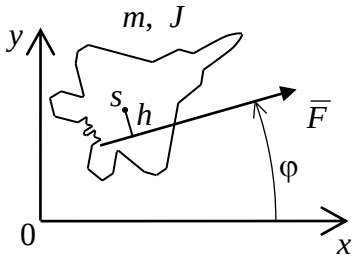


Рис. 2. Расчетная схема движения летательного аппарата со смещенным вектором силы

Описывающие его уравнения имеют вид (1) [1].

$$\begin{cases} J\varepsilon = Fh \\ mW_x = F\cos(\varphi) \\ mW_y = F\sin(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) применены следующие обозначения инерционных и геометрических параметров тела: m и J – масса и момент инерции; ε и φ – абсолютные угловое ускорение самолета и угол направления вектора тяги; W_x и W_y – проекции ускорения центра тяжести s на неподвижные оси x и y. Определим траекторию летательного аппарата и закон его вращения, решив систему уравнений (1) при постоянной силе F, смещенной относительно центра тяжести на расстояние h. Для этого из первого уравнения системы (1) выразим постоянное угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{Fh}{J} = \text{const} \quad (2)$$

и определим угол поворота φ как второй интеграл от ε при заданных начальных условиях φ_0 по углу и ω_0 по угловой скорости.

$$\varphi = \frac{\varepsilon}{2}t^2 + \omega_0 t + \varphi_0 = \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}t + \frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2 + \varphi_0 - \left(\frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2 = \xi^2 + \alpha, \quad (3)$$

где t – время, $\xi = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}t + \frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}$, $\xi_0 = \frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}$, $\alpha = \varphi_0 - \xi_0^2$. Подставим закон равноускоренного вращательного движения (3) во второе и третье уравнения системы (1) и проинтегрируем их по времени с начальными условиями V_{x0}, V_{y0}.

$$\begin{cases} W_x = \frac{F}{m}\cos(\frac{\varepsilon}{2}t^2 + \omega_0 t + \varphi_0) \\ W_y = \frac{F}{m}\sin(\frac{\varepsilon}{2}t^2 + \omega_0 t + \varphi_0) \end{cases}; \quad \begin{cases} V_x = V_{x0} + \frac{F}{m}\int_0^t \cos(\frac{\varepsilon}{2}t^2 + \omega_0 t + \varphi_0)dt \\ V_y = V_{y0} + \frac{F}{m}\int_0^t \sin(\frac{\varepsilon}{2}t^2 + \omega_0 t + \varphi_0)dt \end{cases} \tag{4}$$

Системы уравнений (4) описывают годографы абсолютных ускорений и скоростей центра масс самолета. Годограф ускорения представляет собой окружность с радиусом F/m и центром в точке нулевого ускорения. Годограф скорости имеет более сложный вид [3]. Для его получения выполним замену переменной t на ξ в соответствии с обозначениями к уравнению (3).

$$\begin{cases} V_x = V_{x0} + \frac{F}{m}\int_0^t \cos\left[\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}t + \frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2 + \varphi_0 - \left(\frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2\right]dt = V_{x0} + \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}\frac{F}{m}\int_{\xi_0}^{\xi}\cos\left(\xi^2 + \alpha\right)d\xi \\ V_y = V_{y0} + \frac{F}{m}\int_0^t \sin\left[\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}t + \frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2 + \varphi_0 - \left(\frac{\omega_0}{\sqrt{2\varepsilon}}\right)^2\right]dt = V_{x0} + \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}\frac{F}{m}\int_{\xi_0}^{\xi}\sin\left(\xi^2 + \alpha\right)d\xi \end{cases} \tag{5}$$

или

$$\begin{cases} V_x = V_{x0} + \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}\frac{F}{m}\left[\cos(\alpha)\left(C(\xi) - C(\xi_0)\right) - \sin(\alpha)\left(S(\xi) - S(\xi_0)\right)\right] \\ V_y = V_{y0} + \sqrt{\frac{2}{\varepsilon}}\frac{F}{m}\left[\cos(\alpha)\left(S(\xi) - S(\xi_0)\right) + \sin(\alpha)\left(C(\xi) - C(\xi_0)\right)\right] \end{cases}, \tag{6}$$

где $C(\xi) = \int_0^{\xi}\cos\left(\tau^2\right)d\tau$, $S(\xi) = \int_0^{\xi}\sin\left(\tau^2\right)d\tau$ – интегралы Френеля [12].

Следовательно, годограф скорости является спиралью Корню (клотоидой, спиралью Эйлера). Так как интегралы Френеля имеют равные пределы $\sqrt{\pi/8}$ при $\xi \to \infty$, то система уравнений (6) позволяет оценить среднее направление движения летательного аппарата в исследуемом режиме. Не составляет труда пересчитать его в систему координат наблюдателя, определив радиальную и трансверсальную составляющие скорости.

Система уравнений (6) описывает скорость тела, а ее интеграл – траекторию.

Горизонтальный плоский штопор при смещенном векторе тяги

Для описания движения самолета в горизонтальном штопоре примем следующие исходные данные:

$$F = 10^5 \text{Н}, m = 2 \cdot 10^4 \text{ кг}, \varepsilon = 5 \cdot 10^{-2} c^{-2}, \omega_0 = 0, \varphi_0 = 0.$$

На рис. 3 представлен в масштабе результат расчета траектории и угла поворота через каждые две секунды. Траектория показана в системе координат невращающегося наблюдателя, движущегося равномерно со скоростью самолета в момент начала маневрирования $V_x = V_{x0}$; $V_y = 0$. Из расчета видно, что разворот на 180^0 будет выполнен за 11 секунд. К концу разворота угловая скорость достигнет 32^0/с. В момент окончания полного оборота на шестнадцатой секунде угловая скорость летательного аппарата может достигнуть 45^0/с. В таблице 1 представлена зависимость от времени отхода центра тяжести самолета с линии прямолинейного движения.

Таблица 1. Смещение самолета при разнотяге двигателей

t, с	0	3	4	5	6
y(*t*), м	0	0,8	2,7	6,4	13,1

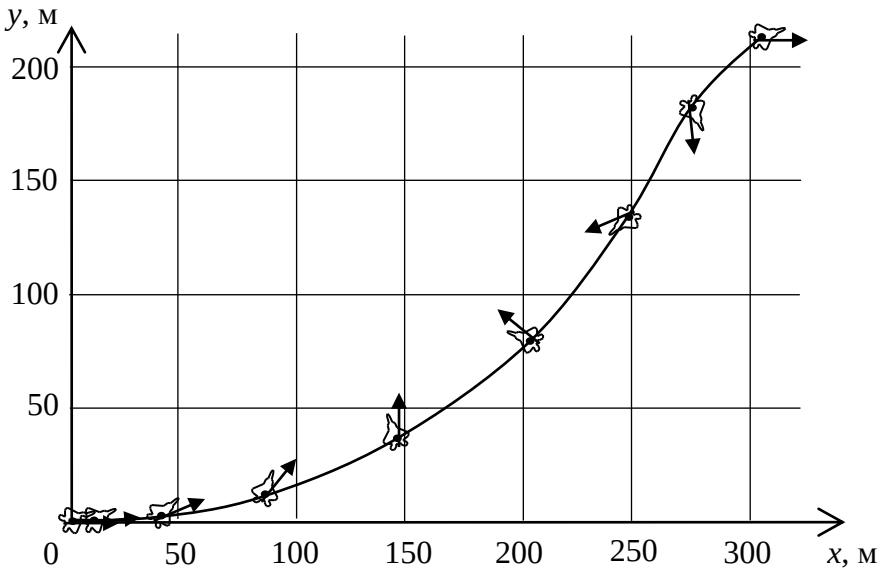


Рис. 3. Результат расчета движения самолета в горизонтальном плоском штопоре при смещенном векторе тяги

На рис. 4 показан годограф скорости центра тяжести самолета. Стрелки соответствуют положениям летательного аппарата в те же моменты времени, что и на рис. 3.

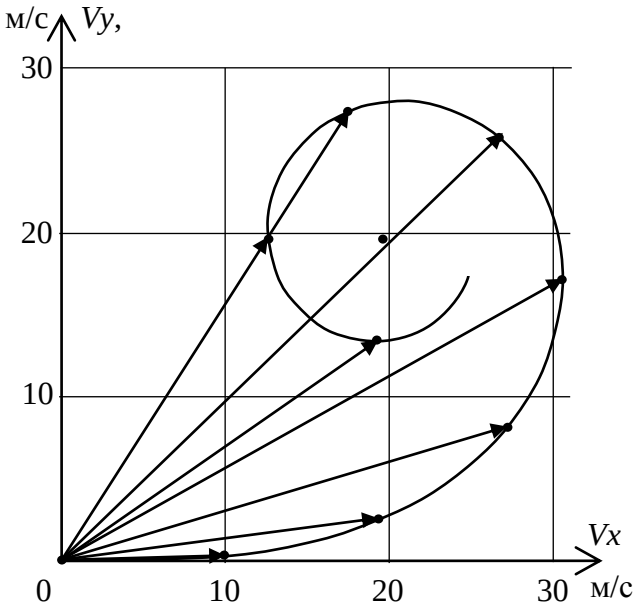


Рис. 4. Применение интегралов Френеля для построения годографа скорости самолета при смещенном векторе тяги

Пределы скоростей $\lim\limits_{t\to\infty} V_x = \lim\limits_{t\to\infty} V_y = \dfrac{F}{m}\sqrt{\dfrac{\pi}{4\varepsilon}} = 19{,}8$ м/с указаны на рис. 4 точкой в центре спирали.

Горизонтальный плоский штопор при центральном векторе тяги

В случае прохождения линии силы через центр масс тела угловая скорость будет неизменной. Система уравнений (4) легко интегрируется при $\varphi = \omega_0 t$

$$\begin{cases} W_x = \dfrac{F}{m}\cos(\omega_0 t) \\ W_y = \dfrac{F}{m}\sin(\omega_0 t) \end{cases}; \quad \begin{cases} V_x = \dfrac{F}{m}\int\limits_0^t \cos(\omega_0 t)dt = \dfrac{F}{m\omega_0}\sin(\varphi) \\ V_y = \dfrac{F}{m}\int\limits_0^t \sin(\omega_0 t)dt = \dfrac{F}{m\omega_0}\left(1-\cos(\varphi)\right) \end{cases}; \quad \begin{cases} x = \dfrac{F}{m\omega_0^2}\left(1-\cos(\varphi)\right) \\ y = \dfrac{F}{m\omega_0^2}\left(\varphi-\sin(\varphi)\right) \end{cases} \tag{7}$$

Очевидно, что годограф вектора скорости является окружностью, а траектория – циклоидой. Определим траекторию самолета при следующих исходных данных:

$$F = 10^5\,\text{Н}, m = 2\cdot 10^4\,\text{кг}, \varepsilon = 0\,\text{с}^{-2}, \omega_0 = 20^0/\text{с}, \varphi_0 = 0.$$

Результат расчета показан на рис.5 при тех же условиях, что и на рис. 3.

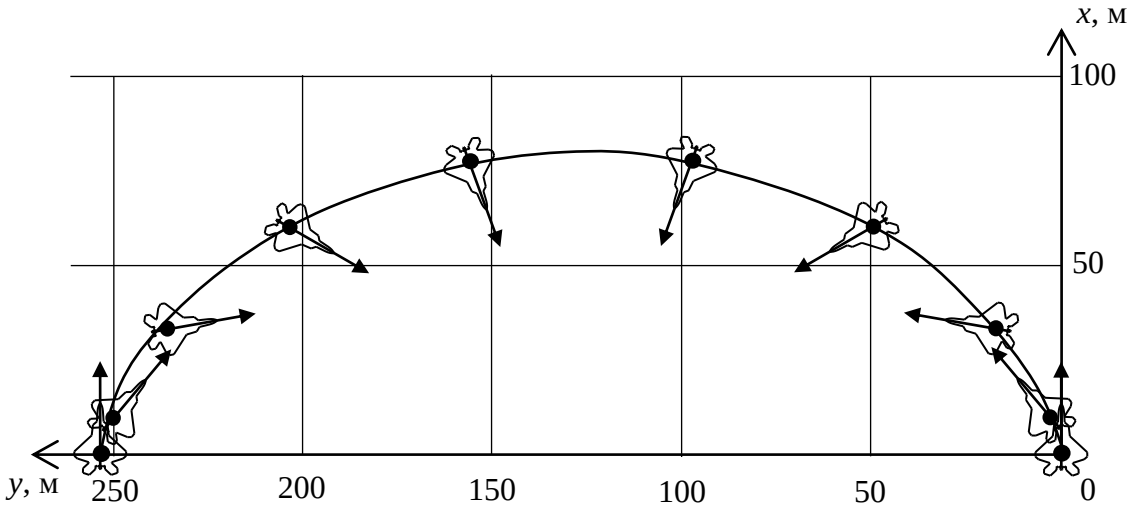


Рис. 5. Движение самолета в горизонтальном плоском штопоре при центральном векторе тяги и постоянной скорости рысканья

Продолжительность смещения летательного аппарата с линии первоначального движения показана в таблице 2. При дальнейшем полете волны циклоиды будут повторяться.

Таблица 2. Смещение самолета при центральной тяге

t, с	0	1	2	3	4
y(*t*), м	0	0,3	2,3	7,4	16,9

Таким образом, траектория летательного аппарата описывается точкой на окружности с радиусом $\frac{F}{m\omega_0^2} = 41\text{м},$ центр которой движется равномерно со скоростью $\frac{F}{m\omega_0} = 14,3\,\text{м/с}.$ Скорость центра тяжести всегда направлена по касательной к траектории и достигает своего максимума $\max_t |V_y| = 28,6\,\text{м/с}$ в средней точке при t = 9 с. Сила тяги двигателя при этом остается постоянной, направленной вдоль оси самолета.

Заключение

В работе получено простое математическое описание движения сверхманевренного самолета с тяговооруженностью не меньше единицы при выполнении фигуры высшего пилотажа «горизонтального плоского штопора». Показано, что в случае аккуратного пилотирования, не допускающего заметные перемещения по тангажу и крену, при применении разнотяги двигателей траектория представима интегралом от спирали Корню, а при центральном векторе тяги – циклоидой. Для математического описания других фигур высшего пилотажа таких, как петля Нестерова, чакра Фролова, кобра Пугачева и тому подобных не удается построить простые физические модели. Для них необходимо учитывать изменение тяги двигателей, силу тяжести и, что особенно сложно, индивидуальные особенности воздействия воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бюшгенс Г.С. (ред.) Динамика полета / А.В. Ефремов [и др.]; под ред. Г.С.Бюшгенса. – М.: Машиностроение, 2011. – 776 с.: ил. – ISBN 978-5-94275-580-5.

[2] Желнин Ю. Полет хвостом вперед. Наука и жизнь. №3 март 2022 г.

[3] Нигматуллина Ф.Р., Терешин В.А. Российские оптические автоматические трехосные телескопы. Динамика электропривода. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbruecken, Germany. 2015, с.130. ISBN: 978-3-659-76118-8

[4] Пашковский И.М. Устойчивость и управляемость самолета. – М.: Машиностроение, 1975.

[5] Алещенко В., Зданович С. Сверхманевреность самолетов / Авиация и космонавтика. Вчера. Сегодня. Завтра. №9. 2000.

[6] Рябов К. Сверхманевренность истребителей и её преимущества [Электронный ресурс] // Военное обозрение. 2019. URL: https://topwar.ru/155135-sverhmanevrennost-istrebitelej.html. (дата обращения: 10.03.2022)

[7] Gal-Or, Benjamin (2013). Vectored Propulsion, Supermaneuverability and Robot Aircraft. Springer Science+Business Media. p. 92. ISBN 9781461389613. Retrieved February 21, 2019.

[8] Sweetman, Bill (June 24, 2013). Sukhoi Test Pilot Explains 'Supermaneuverability'. Aviation week. Penton. Retrieved February 23, 2014.

[9] Russian Air Force to get supermaneuverable aircraft. Russia Beyond The Headlines. April 13, 2012.

[10] Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Influence of the Control Object Mass on the Stability Region. In: Advances in Mechanical Engineering. Cham, 2022. C. 9-17.
[11] Some Characteristics of Linear Acceleration Reproduction with Flexible Harmonical Component / Evgrafov A.N., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. In: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2018. C. 71-81.
[12] Смирнов В.И. Курс высшей математики, Т.3. Ч.2: СПб : БХВ-Петербург, 2010.

A.N.Evgrafov, D.P.Kozlikin, G.N.Petrov, V.A.Tereshin, P.A.Andrienko

THE MOVEMENT OF A SUPERMANOEUVRABLE AIRCRAFT IN A FLAT CORKSCREW

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This paper is concerned with determining the movement parameters of an aircraft with a controlled thrust vectoring engine. Highly maneuverable aircraft are capable of performing aerobatics, the list of which is constantly growing. This is due to advances in technology, aircraft design, control systems and pilot skills. Prior to performing complex maneuvers on fighter aircraft, pilots are trained on sport airplanes. The acquired skills to perform aerobatics are essential for military pilots, although most aircraft, even fifth generation aircraft, cannot perform many of these maneuvers. Deflectable thrust vectoring aircraft demonstrate their capabilities at numerous air shows. However, it should be noted that performing aerobatics is useless in a real combat situation, as it reduces speed and increases the likelihood of being hit. Vigorous maneuvering is effective only in close combat or when the enemy missile is blown away. It is under these conditions that this paper is devoted to determining the aircraft's movement parameters.

Key words: supermaneuverable aircraft, controllable thrust vector, aerobatics, thrust armament.

REFERENCES

[1] Büschgens G.S. (ed.) Flight dynamics / A.V. Efremov [et al]; ed. by G.S. Büschgens. - Moscow: Mashinostroenie Publisher, 2011. - 776 p.: ill. - ISBN 978-5-94275-580-5. (in Russian)
[2] Zhelnin Y. Flying with the tail forward. Science and Life. No.3 March 2022. (in Russian)

[3] Nigmatullina F.R., Tereshin V.A. Russian Optical Automatic Triaxial Telescopes. Electric Drive Dynamics. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbruecken, Germany. 2015, c.130. ISBN: 978-3-659-76118-8. (in Russian)
[4] Pashkovsky I.M. Stability and controllability of aircraft. - Moscow: Mashinostroenie, 1975. (in Russian)
[5] Aleshchenko V., Zdanovich S. Supermaneuverability of aircraft / Aviation and Cosmonautics. Yesterday. Today. Tomorrow. №9. 2000. (in Russian)
[6] Ryabov K. Super maneuverability of fighters and its advantages [Electronic resource] // Military Review. 2019. URL: https://topwar.ru/155135-sverhmanevrennost-istrebitelej.html. (date of reference: 10.03.2022).
[7] Gal-Or, Benjamin (2013). Vectored Propulsion, Supermaneuverability and Robot Aircraft. Springer Science+Business Media. p. 92. ISBN 9781461389613. Retrieved February 21, 2019.
[8] Sweetman, Bill (June 24, 2013). Sukhoi Test Pilot Explains 'Supermaneuverability'. Aviation week. Penton. Retrieved February 23, 2014.
[9] Russian Air Force to get supermaneuverable aircraft. Russia Beyond The Headlines. April 13, 2012.
[10] Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Influence of the Control Object Mass on the Stability Region. In: Advances in Mechanical Engineering. Cham, 2022. C. 9-17.
[11] Some Characteristics of Linear Acceleration Reproduction with Flexible Harmonical Component / Evgrafov A.N., Karazin V.I., Kozlikin D.P., Khlebosolov I.O. In: Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, 2018. C. 71-81.
[12] Smirnov V.I. Course of Higher Mathematics, Volume 3. Part 2: SPb : BHV-Peterburg, 2010. (in Russian).

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК: 621.833.61

В. М. Третьяков

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ

Владимир Михайлович Третьяков, акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «СИГНАЛ»
Россия, г. Ковров
Тел.: (49232) 9-04-31, E-mail: mail@vniisignal.ru

Аннотация

В работе представлен матричный метод анализа структурных свойств механизма и модификации его устройства, который основан на описании подвижностей кинематических пар, звеньев, кинематических цепей, механизмов с помощью матриц подвижностей и использовании матричных уравнений. Показаны возможности матричного подхода при решении задач создания рациональных конструкций механизмов. В отличие от алгебраического метода матричный метод позволяет не только найти местные и общие подвижности, определить число избыточных связей, но и установить каких именно подвижностей не хватает, с привязкой к выбранной системе координат. Полученные результаты его использования для устранения избыточных связей рычажных механизмов, гидроцилиндра, планетарных передач позволяют выявить основы методики проведения структурной модификации многоконтурного изделия. Приведенное в работе исследование показывает, что матричный метод структурного анализа - эффективное средство выявления избыточных связей и инструмент конструктора, упрощающий поиск технических решений для их устранения.

Ключевые слова: структура механизма, избыточные связи, матричный метод, матрицы подвижностей.

Введение

Многие механизмы и конструкции, не являющиеся механизмами, имеют избыточные связи. Это приводит к значительному повышению требований к точности изготовления деталей, росту процента брака и, как следствие, значительно увеличивает стоимость изделий. Кроме того, избыточные связи снижают нагрузочную способность, уменьшают ресурс и КПД машины.

Задача разработки механизмов без избыточных связей (статически определимых механизмов) и подходы к ее решению были озвучены профессором Л.Н. Решетовым [1] более пятидесяти лет назад. Это позволило перейти от метода мысленной сборки к научно обоснованному выбору кинематических пар с применением алгебраических структурных формул. Алгебраический метод плюс метод мысленной сборки и есть тот инструмент, которым преимущественно оперируют отечественные инженеры при проектировании рациональных конструкций шарнирных механизмов [2], манипуляторов [3], механизмов с параллельной структурой [4, 5], планетарных механизмов [6 - 8] и прочего оборудования [9, 10].

Для структурного анализа используют и модели, основанные на применении теории графов [11]. Однако, для конструктора привычнее кинематическая схема механизма и основанные на ней структурные формулы, чем абстрактная структурная модель в виде графа. При применении теории винтов для структурного анализа механизмов с параллельной кинематикой также используются алгебраические структурные формулы [12].

Алгебраические структурные формулы, не позволяют выявить избыточные связи и подвижности в отдельности. Они показывают их разность, а это может привести к ошибкам при выборе классов кинематических пар [13]. В.В. Соломин предложил табличный метод (Соломин В.В. Новый метод выбора рациональных структурных схем механизмов. Известия вузов. Машиностроение. 1967. №8 см. [1]), который дает возможность отделить избыточные связи от подвижностей, но его не удобно применять при структурном анализе и синтезе сложных изделий. Это связано с тем, что таблица подвижностей, предложенная В.В. Соломиным, показывает суммы подвижностей кинематических пар механизма, отнесенных к осям выбранной системы координат $H = \begin{vmatrix} t_x & r_x \\ t_y & r_y \\ t_z & r_z \end{vmatrix}$, где t_x, t_y, t_z – поступательные подвижности вдоль осей X, Y, Z, а r_x, r_y, r_z – вращательные подвижности вокруг осей X, Y, Z. Если ввести матричное описание подвижностей для каждой кинематической пары [14],

то появляется возможность использовать матричные структурные формулы, что значительно повышает содержательность результатов структурных исследований [15, 16].

Зарубежные авторы также уделяют внимание задачам разработки статически определимых технических устройств [17, 18].

Для упрощения структурного анализа в [19] предложен вариант матричного уравнения, позволяющий последовательно проводить структурный анализ независимых замкнутых контуров сложных механизмов. В отличие от алгебраического метода с помощью матричного подхода можно не только найти подвижности и определить число избыточных связей, но и установить каких именно подвижностей не хватает с привязкой к единой системе координат. Использование данного подхода для устранения избыточных связей в рычажном механизме [20], гидроцилиндре двойного действия [21], планетарных передачах [19] показало, что матричный метод упрощает решение задачи определения и устранения избыточных связей в механизмах и является эффективным инструментом решения конструкторских задач разработки рациональных изделий. В данной работе матричный метод иллюстрируется процессом модернизации гидроцилиндра двойного действия.

Методы

Матричное уравнение, предложенное в [15, 16] для определения структурных свойств (подвижностей и избыточных связей) многоконтурных механизмов, удобнее представить в виде:

$$WQ_m = W_{m-1} + W^u_{M(m-1)} + H_{\Sigma m} - W^u_{Mm} - W_{Mm} - F, \qquad (1)$$

где WQ_m – матрица структурных свойств кинематической цепи, полученной формированием -го замкнутого контура, она содержит описание подвижностей всего механизма, возникающего при замыкании всех контуров начиная с первого, включая и контур с номером m, и избыточных связей 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 звеньями 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;

$p^m = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5$ - число кинематических пар, образованных вновь введенными звеньями при формировании замкнутого контура под номером m, где p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 - число кинематических пар разных классов;

$W^u_{M(m-1)}$ - матрица местных подвижностей в составе начального механизма звена u, к которому будут присоединены звенья, вновь вводимые при формировании -го замкнутого контура механизма;

W^u_{Mm} - матрица местных подвижностей звена u, к которому присоединены звенья, введенные при формировании -го замкнутого контура механизма;

$W_{Mm} = \sum_{j=1}^{n_m} W_{Mj}$ – суммарная матрица местных подвижностей звеньев, вновь введенных при формировании -го замкнутого контура механизма;

$W_{Mj} = \begin{vmatrix} w_M^{tx} & w_M^{rx} \\ w_M^{ty} & w_M^{ry} \\ w_M^{tz} & w_M^{rz} \end{vmatrix}$ - матрица местных подвижностей j -ого звена,

где w_M^{tx}, w_M^{ty}, w_M^{tz} – переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых поступательных движений -го звена вдоль осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае;

w_M^{rx}, w_M^{ry}, w_M^{rz}– переменные, принимающие значение 1 при наличии независимых вращательных движений -го звена вокруг осей X, Y, Z и значение 0 в противном случае;

n_m - число подвижных звеньев, 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).

Результаты

В качестве примера использования матричного метода структурного анализа рассмотрим процесс выявления и устранения избыточных связей гидроцилиндра двойного действия, приведенного на рис. 1 (патент RU № 2422685 C1, опубл. 27.06.2011). Он содержит цилиндр 1, поршень 2, шток 3, контршток 4, поршневую полость I, штоковую полость II, воздушную полость III, кинематические пары: A (цилиндр 1 – поршень 2), B (цилиндр 1 – шток 3), C (поршень 2 – контршток 4). Матрицы их подвижностей: $H_A = H_B = H_C = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$.

Будем считать цилиндр 1 и жестко связанный с ним контршток 4 неподвижным звеном («цилиндр 1 и контршток 4»). Одно подвижное звено состоит из поршня 2 и штока 3 («поршень 2 и шток 3») и образует три кинематические пары с неподвижным звеном. В устройстве два замкнутых контура. Первый содержит оба звена и кинематические пары A и B. Это обычный гидроцилиндр (рис. 2). Второй контур возникает при замыкании третьей кинематической пары C.

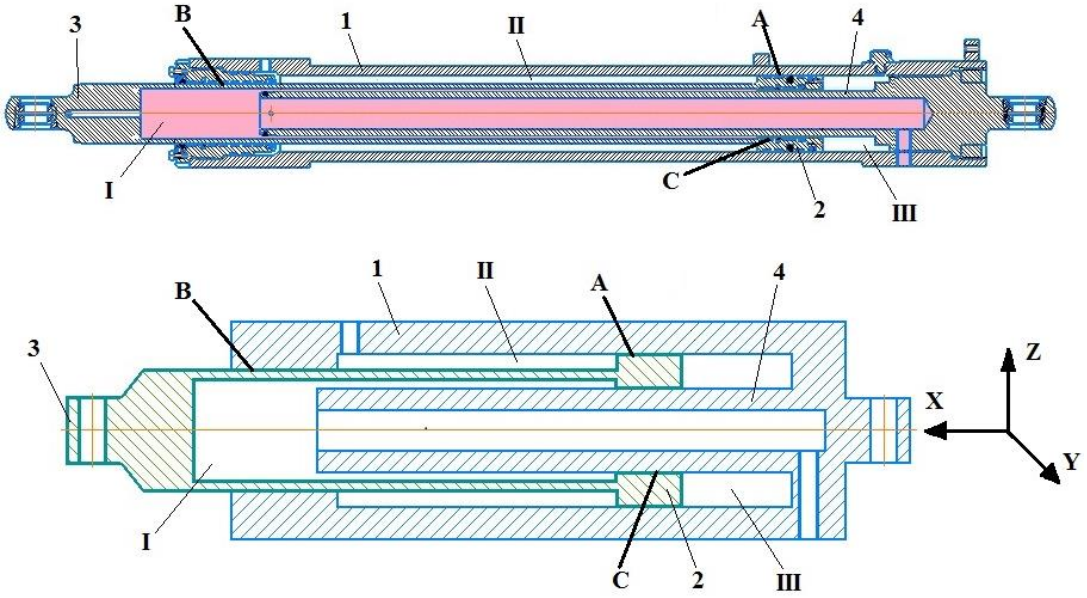


Рис. 1. Гидроцилиндр двойного действия

Пусть подвижность начального механизм первого замкнутого контура определяется кинематической парой A и $W_0 = H_A$. Уравнение (1) для данного контура будет иметь вид:

$$WQ_I = H_A + H_B - F. \tag{2}$$

$$WQ_I = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{vmatrix}. \tag{3}$$

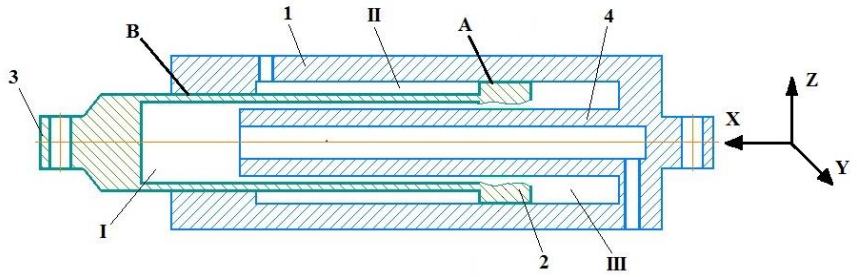


Рис. 2. Первый замкнутый контур гидроцилиндра двойного действия

В данном механизме не возможно заменить отсутствующие поступательные подвижности вдоль осей Y или Z вращательной подвижностью вокруг оси X. При вращении звена «поршень 2 – шток 3»

вокруг этой оси отсутствует перемещение вдоль осей координат его элементов, образующих кинематические пары.

Преобразуем матрицу структурных свойств первого замкнутого контура (3) в матрицу подвижностей первого контура механизма $W_I = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$, обнулив ее отрицательные элементы, а обнулив положительные элементы, получим матрицу избыточных связей: $Q_I = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{vmatrix}$.

Избыточные связи вызваны отсутствием необходимых поступательных подвижностей вдоль осей Y и Z, а также отсутствием вращательных подвижностей вокруг тех же осей. Для уменьшения их влияние на работоспособность механизма оси симметрии цилиндрических поверхностей кинематических пар A и B должны быть строго соосны и параллельны.

Уравнение (1) для второго контура:

$$WQ_{II} = W_I + H_C - F. \qquad (4)$$

$$WQ_{II} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{vmatrix}.$$

Подвижность устройства не изменилась, а число избыточных связей удвоилось.

Устранение избыточных связей первого контура приведет к значительному усложнению конструкций входящих в него звеньев. Поскольку технология изготовления обычных гидроцилиндров отработана, то избыточные связи первого контура оставляем без изменения. Избыточные связи, возникающие во втором замкнутом контуре необходимо устранить. Именно они являются причиной более жестких требований к точности изготовления деталей, ухудшают технические характеристики и снижают долговечность устройства.

Для устранения избыточных связей во втором замкнутом контуре воспользуемся уравнением (4). Во втором контуре не должно быть избыточных связей. Тогда матрица его структурных свойств должна иметь вид $WQ_{II} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$. Найдем требуемые подвижности кинематической пары C, преобразовав уравнение (4) к виду: $H_C = WQ_{II} - W_I + F$.

Требуемая матрица подвижности (*результат очевиден: этой кинематической пары не должно быт*ь):

$$H_C = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Кинематическая пара может иметь не более пяти подвижностей, а необходимы шесть. Значит, во второй контур требуется ввести еще одну кинематическую пару. Это можно осуществить, добавив в него звено 5, образующее кинематическую пару D с контрштоком 4 и E с штоком 3 (рис. 3). Уравнение (1) для нового варианта второго контура примет вид:

$$WQ_{II} = W_I + H_D + H_E - F. \quad (5)$$

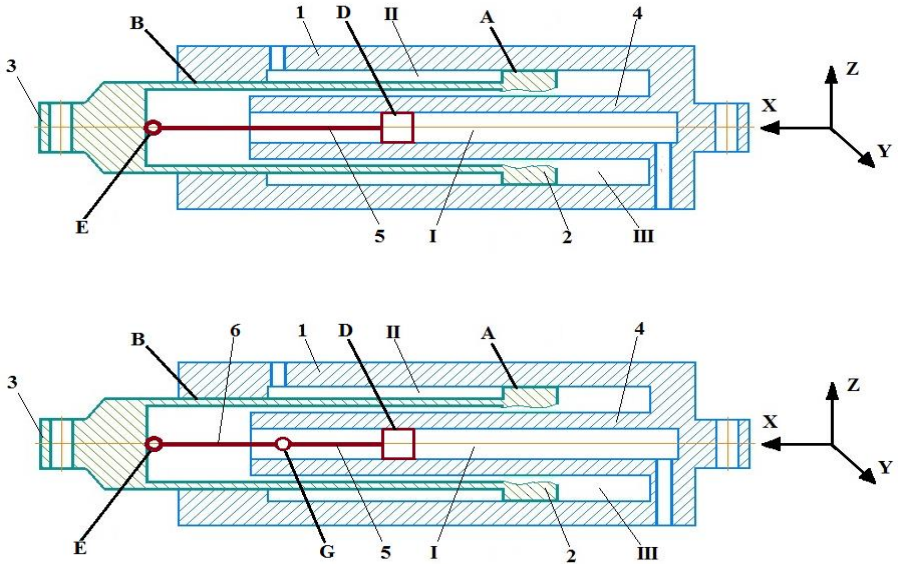


Рис. 3. Этапы преобразования схемы гидроцилиндра

Функциональность кинематической пары D должна быть такой же, как и функциональность кинематической пары C в модернизируемом механизме. Она должна воспринимать действие рабочей жидкости, обеспечивая поступательное движения штока 3, поэтому ее матрица подвижностей $H_D = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$ такая же, как у кинематической пары С.

Найдем требуемые подвижности кинематической пары E из уравнения (5):

$$H_E = WQ_{II} - W_I - H_D + F, \quad (6)$$

$$H_E = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Четыре подвижности имеют только высшие кинематические пары. Для повышения грузоподъемности в гидроцилиндре необходимо использовать низшие кинематические пары, поэтому вводим еще одно дополнительное звено 6 и еще одну кинематическую пару G, связывающую звенья 5 и 6. Уравнение (6) примет вид:

$$H_E + H_G = WQ_{II} - W_I - H_D + F,$$

$$H_E + H_G = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Поступательные кинематические пары менее надежны и долговечны, чем вращательные, поэтому заменим в матрице (7) поступательные подвижности вращательными Кинематические пары выполним одинаковыми, имеющими по две вращательные подвижности у каждой:

$$H_E + H_D = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Конструктивно их проще выполнить сферическими с тремя вращательными подвижностями: $H_E = H_G = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$. Две лишние вращательные подвижности вокруг оси X, приводят к местным подвижностям звеньям 5 и 6 $W_{M5} = W_{M6} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$. Это не отражается на функционировании гидроцилиндра.

На рис. 4 показана одна из двух возможных конструкций гидроцилиндра двойного действия [21] без избыточных связей во втором замкнутом контуре.

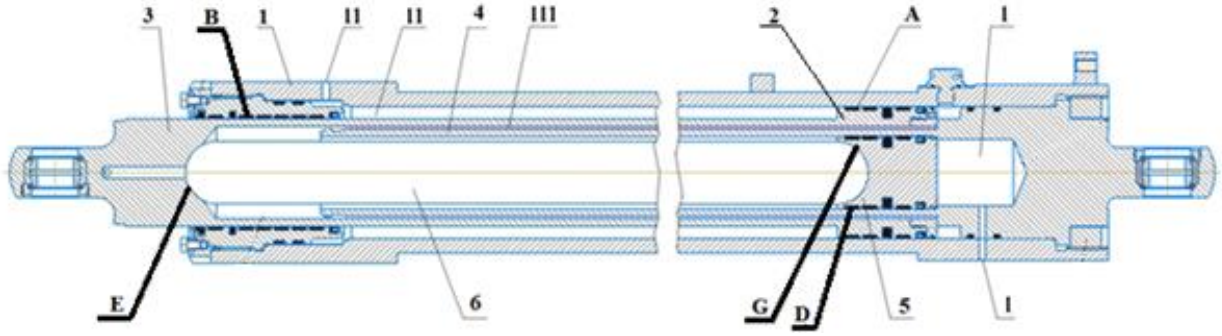


Рис. 4. Конструкция гидроцилиндра двойного действия

Второй поршень 5, размещен в контрштоке 4. Второй шток 6 связан с торцом второго поршня 5 и с торцевой поверхностью штока 3 сферическими кинематическими парами E и G. Устранение четырех избыточных связей привело к увеличению на 10% диаметра и массы гидроцилиндра. Осевые и присоединительные размеры не изменяются. Диаметр цилиндра можно уменьшить, увеличив рабочее давление.

Обсуждение

Полученные результаты использования матричного подхода к устранению избыточных связей конструкций позволяют выявить общее в методике проведения требуемой модификации многоконтурного изделия. Для устранения избыточных связей в замкнутом контуре с номером m

исходного механизма задается желаемая матрица его структурных свойств WQ_m и определяются или задаются матрицы местных подвижностей W_{Mm}^u и W_{Mm} входящих в него звеньев. Из уравнений вида (1), (2) и (4) получаем суммарную матрицу $H_{\Sigma m}$ подвижностей в кинематических парах, образованных звеньями, используемыми при формировании замкнутых контуров. Если требуемый набор подвижностей имеющимися кинематическими парами получить нельзя, то в замкнутый контур добавляются дополнительные кинематические пары за счет введения новых звеньев. При синтезе механизма с нуля задается требуемый набор его подвижностей. Он учитывается в матрицах подвижностей и матрицах структурных свойств при рассмотрении каждого замкнутого контура механизма. В качестве исходного механизма можно использовать механизм с минимальным количеством звеньев, например, по одному в каждом контуре (рис. 5). В процессе синтеза число звеньев увеличивается до получения требуемых подвижностей механизма и устранения избыточных связей. На рис. 5 использованы следующие обозначения: стойка (0), выходное звено (4), звенья исходного механизма (1 – 3), вновь добавленные звенья (5 – 7 и т.д.). Рядом с обозначениями кинематических пар показаны допускаемые ими подвижности. В правой части рис. 5 показан полученный по предложенной методике вариант двухконтурного механизма с подвижностями: $W = W_{II} = WQ_{II} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$. Второй контура замыкается присоединением звеньев 3 и 7. Задаваемая подвижность первого контура должна иметь больше подвижностей, чем весь механизм в целом. Для показанного примера: $WQ_I = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$. При выборе подвижностей кинематических пар может помочь расширенная таблица базовых наборов подвижностей кинематических пар. Минимальный вариант такой таблицы приведен в [16].

Чаще всего при определении матриц местных подвижностей звеньев достаточно использовать метод мысленной сборки. При возникновении сложностей поможет упрощенный вариант уравнения (1) см., например, [19] или [20]. Сложности могут возникнуть, когда звено имеет более одной местной подвижности [19]. При проблемах с отнесением подвижностей к осям выбранной системы координат, помогут расширенные матрицы подвижностей и матрицы преобразования систем координат [22].

Для плоских механизмов матрицы подвижностей будут иметь вид: $H_i = \begin{vmatrix} t_x & \boxtimes \\ t_y & \boxtimes \\ \boxtimes & r_z \end{vmatrix}$. В них заблокированы три лишних элемента. Можно

наоборот сделать анализ более детальным и различать положительные и отрицательные направления осей координат и вращения по и против часовой стрелки. Для этого матрица должна содержать 12 элементов [15].

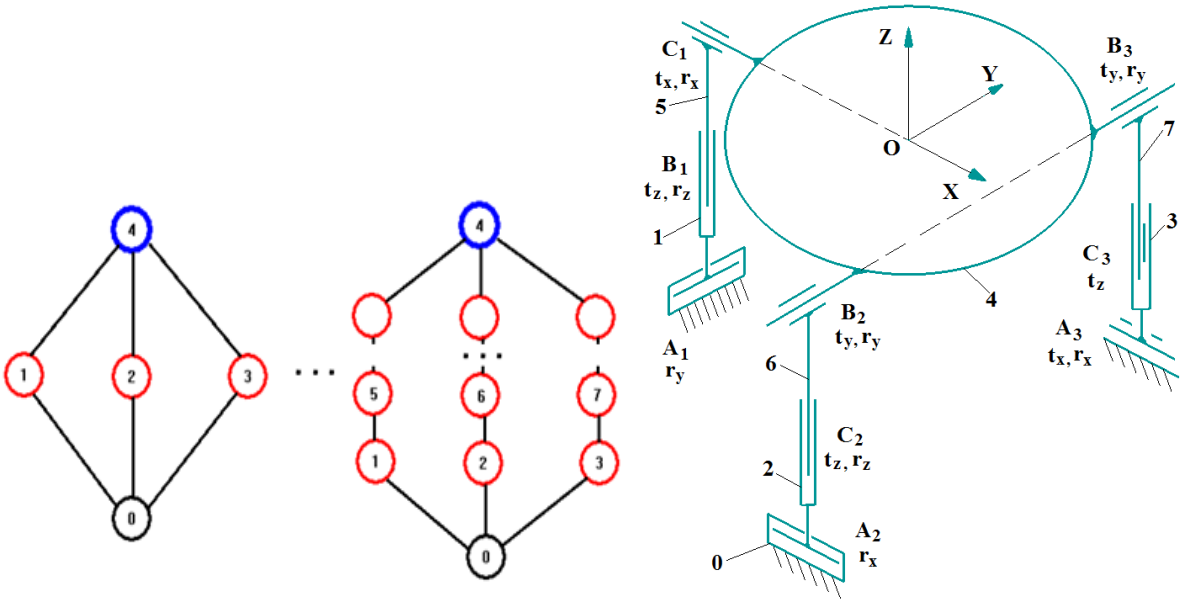


Рис. 5. Синтез механизма параллельной структуры

Заключение.

Матричный метод структурного анализа упрощает решение задачи определения и устранения избыточных связей в механизмах. В отличие от алгебраического метода он позволяет определить имеющиеся подвижности звеньев и не только найти число избыточных связей, но и установить каких именно подвижностей не хватает для их устранения в выбранной системе координат. Матричный метод это инструмент, позволяющий усилить возможности конструктора, применяющего метод мысленной сборки. Просматриваются возможности его применения и при синтезе механизмов. Он применим, как при исследовании механизмов, так и для работы с конструкциями, не имеющими подвижностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 256 с.

[2] Гудимова Л.Н., Дворников Л.Т. Проблемы исключения избыточных связей в плоских шарнирных механизмах. Фундаментальные исследования. 2013. №6–1. С. 24–32.

[3] Шахмутдинов А.Х., Пирогова Н.Л. Структурный синтез кинематических пар для оригинальной части пространственного манипулятора. Наука и военная безопасность. 2016. №2(5). С. 79-82.
[4] Календарев А.В., Лысогорский А.Е., Глазунов В.А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 3. С. 7-10.
[5] Егоров О.Д. Структурный анализ механизмов параллельной структуры. Вестник МГТУ "Станкин". 2019. № 1 (48). С. 89-92.
[6] Пивоваров А.О., Шевчук В.П. Разработка рациональных конструкций планетарных механизмов, применяемых в трансмиссиях гусеничных тракторов. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №11. С. 577–580.
[7] Дворников Л. Т., Дмитриев В.В. Теория структурного синтеза зубчатых механизмов как плоских кинематических цепей с высшими парами. М.: ООО «Эдитус», 2014. 116 с. ISBN 978-5-00058-081-3.
[8] Патент № 2342573 Российская Федерация, МПК F16H 1/48 (2006.01). Планетарный механизм: № 2007126434: заявл. 11.07.2007: опубл. 27.12.2008 // Дворников Л.Т., Дмитриев В.В., Бондаренко В.С.; заявитель СГИУ. 6 с.
[9] Гудимова Л.Н., Дворников Л.Т., Макаров А.В., Живаго Э.Я.Создание структурной схемы щековой дробилки нового поколения без избыточных связей. Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 30-36. DOI: 10.17513/snt.38611
[10] Джомартов А.А., Соснин В.А. Анализ конструкции, структуры и определение избыточных связей боевого механизма станка СТБ. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 1 (385). С.189 – 192.
[11] Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Структурный анализ планетарного механизма с двумя плавающими звеньями. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 6 (687). С. 18-27.]
[12] Shuwei Qu, Ruiqin Li, Chunsheng Ma, Hong Li. Type synthesis for lower-mobility decoupled parallel mechanism with redundant constraints. Journal of Mechanical Science and Technology 35 (6) 2021. P.2657-2666. DOI 10.1007/s12206-021-0536-x.
[13] Пономаренко Д.И., Свечников А.А. Проблемы, возникающие при выборе структурных схем механизмов. Наука и образование транспорту. 2015. № 1. С. 30–32.
[14] Kandikjan T., Dukovski V. Assembly model with integrated kinematic context. Proceedings of the 9th World Congress on the IFToMM, Milano, 1995. P. 2976-2980.
[15] Третьяков В.М. Матричный метод определения избыточных связей и

подвижностей в механизмах. Известия вузов. Машиностроение. 1996. №10–12. С. 3–8.
[16] Третьяков В.М. Формирование простых кинематических пар на основе узла сопряжения «точка». Теория механизмов и машин. 2015. Т. 13. № 26. С. 46–61. DOI 10.5862.26.6.
[17] Urinova S.I., Djuraev A.D., Madrahimov Sh.H. Reduucing method of the redundant links in the kinematic pairs of batten lever mechanism of weaving looms. European Science Review. 2016. № 11-12. P. 136-138.
[18] Zdanevich S.S., Pogrebnyak R.P., Zdanevich S.V. Structural analysis and rational design of mechanisms of cross-roll tube straightening machines // Наука та прогрес транспорту. 2018. № 5 (77). С. 65-73.
[19] Третьяков В.М. Построение рациональных планетарных механизмов на основе матричного метода структурного анализа. Транспортное машиностроение. №4(4). 2022. С. 4-16. DOI.org/10.30987/2782-5957-2022-4-4-16.
[20] Третьяков В.М., Потапов С.И., Пискарев М.Ю. Применение матричного метода для оптимизации структурных свойств бесшатунного поршневого двигателя. Транспортные системы. 2021. №2(20). С. 43 -62.
[21] Патент на полезную модель № 209062 Российская Федерация, МПК F16H 1/48 (2006.01). Гидроцилиндр: № 2021125794: заявл. 31.08.2021: опубл. 31.12.2021. Третьяков В.М., Бабкина А.В., Прошина А.И., Парфенова Ю.А., Буянова Д.А., Тимониной Н.В.; заявитель АО «ВНИИ«СИГНАЛ».
[22] Третьяков В.М. Применение матричного метода для определения подвижностей сложных кинематических пар. Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. №5. С. 264-275.

V.M. Tretyakov

A MATRIX METHOD OF MECHANISM STRUCTURAL ANALYSIS AND SYNTHESIS

“All-Russian Scientific Research Institute “Signal” Joint Stock Company, Kovrov, Russia

Abstract

The paper describes a matrix method designated for the analysis of a mechanism structure and its elements modification. This method is based on description of mobilities of kinematic pairs, links, chains and mechanisms using

mobilities matrices and matrix equations. The matrix method is highlighted in terms of its application for the analysis of structural properties and development of rational mechanism structures. Unlike the algebraic method, the matrix one allows not only locating local and general mobilities and determining the number of redundant constraints, but also locating missing mobilities with reference to the selected coordinate system. The results obtained in the course of the matrix method application for elimination of redundant constraints of such structures as lever mechanisms, a hydraulic cylinder and planetary transmissions form the basis for a modification technique of a multiloop system. The research presented in this paper proves that the matrix method of structural analysis is not only an effective means for revealing redundant constraints, but also a good design tool that helps seeking technical solutions for elimination of these constraints.

Key words: mechanism structure, redundant constraints, matrix method, mobilities matrices.

References:

[1] Reshetov, L.N., Konstruirovanie ratsional'nykh mekhanizmov (Rational Mechanisms Design), Moscow, Mashinostroenie, 1972, second edition. (rus.)

[2] Gudimova, L.N., Dvornikov, L.T., The Issues of Eliminating Redundant Constraints in Flat Hinge Mechanisms, Fundamental'nye issledovaniya, 2013, no. 6–1, pp. 24–32. (rus.)

[3] Shakhmutdinov, A.Kh., Pirogova, N.L., Structural Synthesis of Kinematic Pairs for a Genuine Spare Part of a Spatial Manipulator, Nauka i voennaya bezopasnost', 2016, no. 2(5), pp. 79-82. (rus.)

[4] Kalendarev, A.V., Lysogorskii, A.E., Glazunov, V.A., Structural Analysis of Strut-Type Structure Mechanisms with Four or Five Degrees of Freedom, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Mashinostroenie, 2013, no. 3, pp. 7-10. (rus.)

[5] Egorov, O.D., Structural Analysis of Strut-Type Structure Mechanisms, Vestnik MSTU "Stankin", 2019, no. 1 (48), pp. 89-92. (rus.)

[6] Pivovarov, A.O., Shevchuk, V.P., Development of Rational Constructions of Planetary Mechanism Used in Transmission of Crawler Tractors, International Journal of Applied and Fundamental Research, 2014, no. 11, pp. 577–580. (rus.)

[7] Dvornikov, L. T., Dmitriev, V.V., Theory of Structural Synthesis of Gear Mechanisms as Planar Kinematic Chains with Higher Pairs, Moscow, Publ. house "Editus", 2014, p. 116. (rus.)

[8] Dvornikov, L. T., Dmitriev, V.V., Bondarenko, V.S., Self-Aligning Planetary Gear, RF Patent № 2342573, 2008. (rus.)

[9] Gudimova, L.N., Dvornikov, L.T., Makarov, A.V., Zhivago, E.Ya., Creation of the Structural Diagram of a New Generation Jaw Crusher

Without Excessive Connections, Sovremennye naukoyomkie tekhnologii, 2021, no. 4, pp. 30-36. (rus.)
[10] Jomartov, A.A., Sosnin, V.A., Analysis of Construction, Structure and Determination of Redundant Constraints of Picking Mechanism of STB Loom, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhologiya tekstil'noi promyshlennosti, 2020, no. 1 (385), pp.189 – 192. (rus.)
[11] Timofeev, G.A., Samoilova, M.V., Structural Analysis of a Planetary Gear Mechanism with Two Floating Links, Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Mashinostroenie, 2017, no. 6 (687), pp. 18-27. (rus.)
[12] Shuwei Qu, Ruiqin Li, Chunsheng Ma, Hong Li, Type Synthesis for Lower-Mobility Decoupled Parallel Mechanism with Redundant Constraints, Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, no. 35 (6), pp.2657-2666.
[13] Ponomarenko, D.I., Svechnikov, A.A., Difficulties in Choice of Mechanism Structural Diagrams, Nauka i obrazovanie transportu, 2015, no. 1, pp. 30–32. (rus.)
[14] Kandikjan, T., Dukovski, V., Assembly Model with Integrated Kinematic Context, Proceedings of the 9th World Congress on the IFToMM, Milano, 1995, pp. 2976-2980.
[15] Tretyakov, V.M., Matrix Method of Definition of Redundant Constraints and Mobility in Mechanisms, Izvestiya vuzov, Mashinostroenie, 1996, no. 10–12, pp. 3–8. (rus.)
[16] Tretyakov, V.M., Formation of Simple Kinematic Pairs on the Basis of an Interface Node "Point", Teoriya mekhanizmov i mashin, 2015, vol. 13, no. 26, pp. 46–61. (rus.)
[17] Urinova, S.I., Djuraev, A.D., Madrahimov, Sh.H., Reducing Method of the Redundant Links in the Kinematic Pairs of Batten Lever Mechanism of Weaving Looms, European Science Review, 2016, no. 11-12, pp. 136-138.
[18] Zdanevich, S.S., Pogrebnyak, R.P., Zdanevich, S.V., Structural Analysis and Rational Design of Mechanisms of Cross-Roll Tube Straightening Machines, Nauka ta Progres Transportu, 2018, no. 5 (77), pp. 65-73.
[19] Tretyakov, V.M., Construction of Efficient Planetary Gears Based on the Matrix Method of Structural Analysis, Transportnoe mashinostroenie, 2022, no. 4(4), pp. 4-16. (rus.)
[20] Tretyakov, V.M., Potapov, S.I., Piskarev, M.Yu., Application of a Matrix Method for Optimization of Free Piston Engine Structural Performance, Transportnye sistemy, 2021, no. 2(20), pp. 43 -62. (rus.)
[21] Tretyakov, V.M., Babkin, A.V., Proshin, A.I., Parfenov, Yu.A., Buyanov, D.A., Timonina, N.V., Hydraulic Cylinder, RF Patent № 209062, 2021. (rus.)
[22] Tretyakov, V.M., Application of a Matrix Method for Determination of Compound Kinematic Pairs Mobilities, Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie, 2016, no. 5, pp. 264-275. (rus.)

ДЕТАЛИ МАШИН. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

И. М. Егоров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ НАРЕЗАЕМОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Иван Михайлович Егоров,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 225-13-34, E-mail: egrov@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены основные погрешности процесса зубофрезерования и их влияние на точность нарезаемого зубчатого колеса. Для нахождения функции кинематической погрешности предложен метод, основанный на определении проекций векторов первичных погрешностей процесса зубофрезерования на профильную нормаль в станочном зацеплении заготовки с производящей рейки. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными при моделировании процесса формирования профилей зубьев следами режущих кромок инструмента с последующим моделированием зацепления нарезанного колеса с измерительным колесом. Практическое совпадение полученных результатов служит подтверждением состоятельности обоих методов.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано для оценки влияния погрешностей процесса зубофрезерования на кинематическую точность нарезаемого колеса или при назначении параметров технологического процесса для нарезания зубчатого колеса заданной точности.

Ключевые слова: погрешности процесса зубофрезерования, станочное зацепление, производящая рейка, кинематическая погрешность.

Введение

Основная масса зубчатых колес нарезается на зубофрезерных станках с применением червячных фрез. Процесс формирования рабочих поверхностей зубьев основан на методе огибания, при котором имитируется станочное зацепление заготовки с производящей рейкой [1,2]. Режущие кромки производящей рейки в каждом ее положении – это линии пересечения стружечных канавок с винтовой поверхностью фрезы.

Анализ и синтез зубчатых передач, полученных методом огибания, рассмотрен в работах [3 - 6] и др. В их основу положено решение систем уравнений, описывающих станочное зацепление колес с производящей поверхностью инструмента и их зацепление в передаче. Включение в эти уравнения описание погрешностей процесса зубофрезерования, даже если это выполнимо, вызывает большие трудности.

Всесторонний анализ влияния погрешностей процесса зубофрезерования на точность нарезаемых зубчатых колес возможен при моделировании процесса формирования профилей зубьев следами режущих кромок инструмента с последующим моделированием зацепления нарезанного зубчатого колеса, профили зубьев которого получены в виде координатами ряда точек, с измерительным зубчатым колесом. Разработанная автором методика, реализующая этот подход, и результаты ее применения изложены в работе [7].

В данной работе приводится метод оценки точности зубчатого колеса, в основу которой положен метод определения ошибки положения высшей кинематической пары путем суммирования проекций векторов первичных ошибок на профильную нормаль в точке контакта [8 - 10].

Определение кинематической погрешности зацепления нарезаемого колеса

На практике, функция кинематической погрешности зубчатого колеса определяется при его зацеплении с измерительным колесом, которое считается абсолютно точным.

В основу предлагаемого метода положено предположение, что при нарезании измерительного и контролируемого зубчатых колес, см. рис. 1, они одновременно находятся в станочном зацеплении с единой производящей рейкой и расположены по разные стороны от ее производящей поверхности. То есть, они получены по первому способу Оливье образования сопряженных поверхностей [3-5]. Зубчатые колеса зацепляются между собой так же, как и при измерении кинематической погрешности нарезаемого колеса. Станочное зацепление для измерительного колеса является абсолютно точным. В зацеплении

контролируемого колеса с производящей рейкой присутствуют все погрешности процесса зубофрезерования. В следствие этого, кинематическая погрешность нарезаемого колеса может быть определена как кинематическая погрешность зацепления колеса с производящей рейкой.

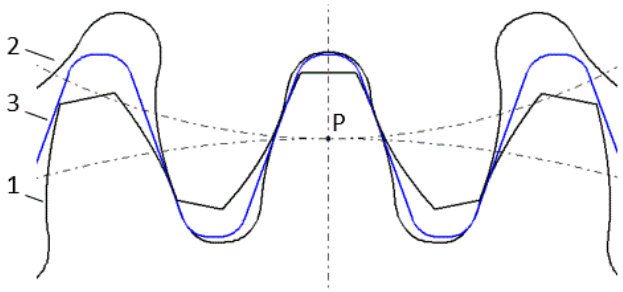


Рис. 1. Формирование сопряженных профилей измерительного и контролируемого зубчатых колес по первому способу Оливье: 1 – контролируемое зубчатое колесо; 2 – измерительное зубчатое колесо; 3 – единая производящая рейка

Векторы первичных ошибок зацепления нарезаемого колеса с производящей рейкой представлены на рис. 2.

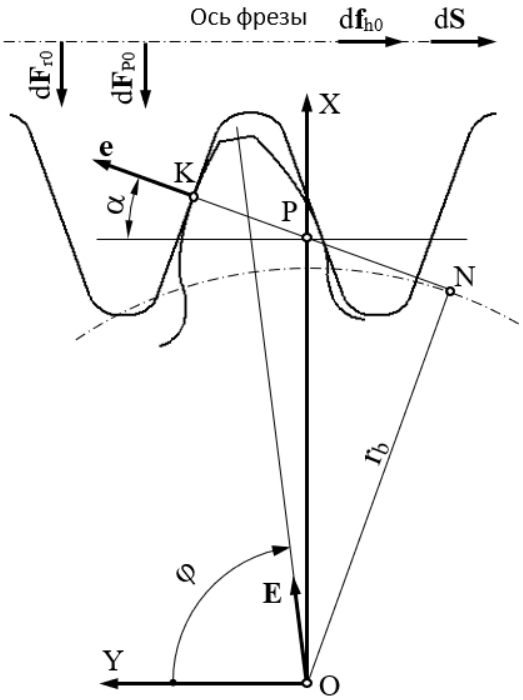


Рис. 2. Первичные ошибки зацепления нарезаемого колеса с производящей рейкой: d$\mathbf{F}_{r0}$ –радиальное биение фрезы на оправке станка; d$\mathbf{F}_{P0}$ – радиальное биение реек затылованной фрезы вследствие погрешности окружного шага стружечных канавок; d$\mathbf{f}_{h0}$ – погрешность винтовой линии фрезы; d**S** – погрешность цепи деления станка, приведенная к погрешности положения рейки; **E** – эксцентриситет заготовки на столе станка; φ – угол поворота заготовки

В системе координат XOY орт профильной нормали, **e**, и векторы первичных ошибок станочного зацепления (см. рис.2) имеют следующее представление:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix}\sin(\alpha)\\ \cos(\alpha)\end{bmatrix}; \qquad d\boldsymbol{E} = E \cdot \begin{bmatrix}\sin(\varphi + \psi_E)\\ \cos(\varphi + \psi_E)\end{bmatrix};$$

$$d\boldsymbol{F}_{r0} = 0.5 \cdot F_{r0} \cdot \begin{bmatrix}-\sin\left(\varphi_0 + \psi_{F_{r0}}\right)\\ 0\end{bmatrix};$$

$$d\boldsymbol{F}_{P0} = 0.5 \cdot F_{P0} \cdot \tan\alpha_0 \cdot \begin{bmatrix}-\sin\left(\varphi_0 + \psi_{F_{P0}}\right)\\ 0\end{bmatrix};$$

$$d\boldsymbol{f}_{h0} = 0.5 \cdot f_{h0} \cdot \begin{bmatrix}0\\ -\sin\left(\varphi_0 + \psi_{f_{h0}}\right)\end{bmatrix};$$

$$d\boldsymbol{S} = 0.5 \cdot r \cdot \begin{bmatrix}0\\ -a \cdot \sin(\varphi + \psi_a) + 0.5 \cdot b \cdot \sin(\varphi \cdot u_{cm} + \psi_b)\end{bmatrix},$$

где E – эксцентриситет заготовки; F_{r0} – радиальное биение фрезы; f_{h0} – накопленная погрешность винтовой линии фрезы; F_{P0} – накопленная погрешность окружного шага стружечных канавок фрезы; α_0 – задний угол фрезы; r – делительный радиус нарезаемого колеса; a, b – накопленная и периодическая погрешности поворота стола зубофрезерного станка; u_{cm} – передаточное число червячной делительной пары стола станка; φ_0 – угол поворота фрезы ($\varphi_0 = \varphi \cdot z$).

Погрешности фрезы (F_{P0}, f_{h0}) нормируются ГОСТ 9324. Погрешности станка (a, b) нормируются ГОСТ 659. Погрешности установки заготовки и фрезы на станке (E, F_{r0}) нормируются технологической картой операции зубофрезерования. Все погрешности аппроксимируются синусоидами. Углы ψ с соответствующими индексами задают начальные фазы погрешностей. При необходимости, метод позволяет табличное задание погрешностей.

При нарезании косозубой передачи в формулах вместо угла профиля надо применять угол торцового профиля:

$$\alpha_t = \tan^{-1}\frac{\tan\alpha}{\cos\beta} \text{ и вместо погрешности } f_{h0} - \text{применять } f_{h0} \cdot \cos\beta,$$

где β – угол наклона зубьев.

В соответствии методом расчета погрешности механизма с высшей кинематической парой, ошибка положения ведомого звена равна сумме проекций векторов первичных ошибок на профильную нормаль, деленой на плечо нормали относительно оси вращения звена:

$$\Delta\varphi = \frac{\mathbf{\Delta} \cdot \mathbf{e}}{h},$$

где $\mathbf{\Delta}$ – сумма векторов первичных ошибок; $\mathbf{e}$ – орт профильной нормали; h – плечо профильной нормали ($h = r_b$). При суммировании векторов первичных ошибок те вектора, которые относятся к ведущему звену (к производящей рейке), берутся со знаком «-». Для получения кинематической погрешности в величинах длины дуги делительной окружности, как требует ГОСТ 1643, ее значения надо умножать на радиус делительной окружности колеса.

Результаты математического эксперимента

Приведенный метод реализован в виде Matlab программы [11].

На рис. 3 показан результат расчёта функции кинематической погрешности колеса с теми же параметрами, что и в работе [7]: z = 14; m = 2.5 мм; x = 0.3. Класс точности станка П: a = 80″; b = 25″. Класс точности фрезы АА: $f_{h0} = 8$ мкм; $F_{P0} = 32$ мкм. Радиальное биение фрезы F_{r0} = 20 мкм. Эксцентриситет заготовки E = 17 мкм. Далее метод, приведенный в данной работе, называется метод 1, приведенная в работе [7] – метод 2.

На рис. 4 приведены результаты расчёта по методу 2, по которому функция кинематической погрешности колеса определяется на основании моделирования процесса формирования профилей зубьев следами режущих кромок инструмента с последующим моделированием зацепления измерительного колеса с нарезанным колесом, профили зубьев которого определены на предыдущем шаге в виде координат ряда точек [7].

Отличие полученных результатов обусловлено тем, что метод 1 не учитывает огранку профилей зубьев, связанную с ограниченным числом стружечных канавок червячной фрезы. Кроме этого, кинематическая погрешность передачи при расчете по методу 1 определяется, как погрешность положения, а при расчете по методу 2 – как погрешность перемещения ведомого звена.

Последнее приводит к сдвигу по фазе и по началу отсчета графиков функций на рис. 3 и рис. 4. Для оценки кинематической точности передачи обе кривые фактически идентичны. Это подтверждает результат их наложения, приведенный на рис. 5. Для большей наглядности совпадения кривых, огранка профилей при расчете по методу 2 уменьшена за счет увеличения числа стружечных канавок фрезы с 12 до 22.

Рис. 3. Функция кинематической погрешности колеса, рассчитанная по методу 1

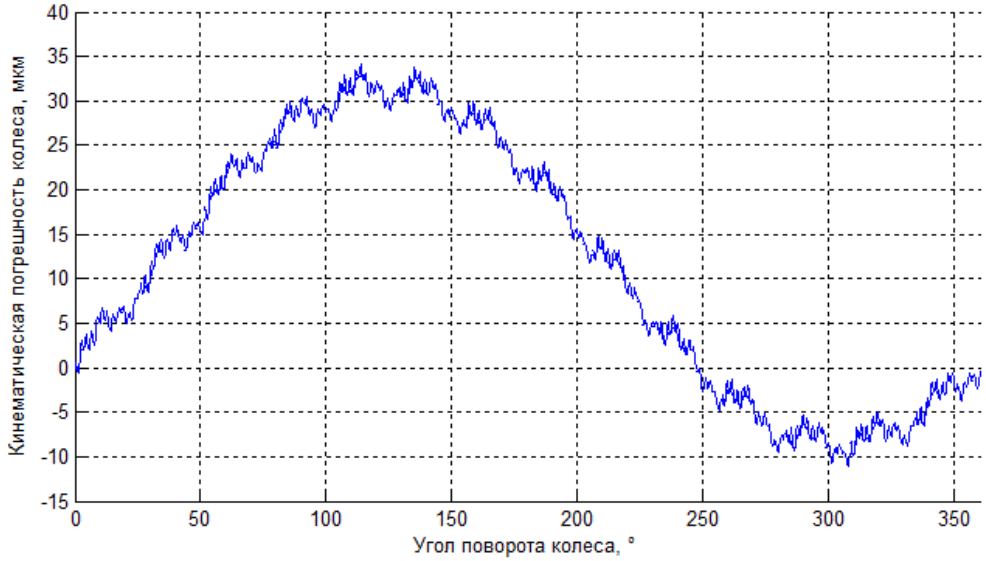


Рис. 4. Функция кинематической погрешности колеса, рассчитанная по методу 2

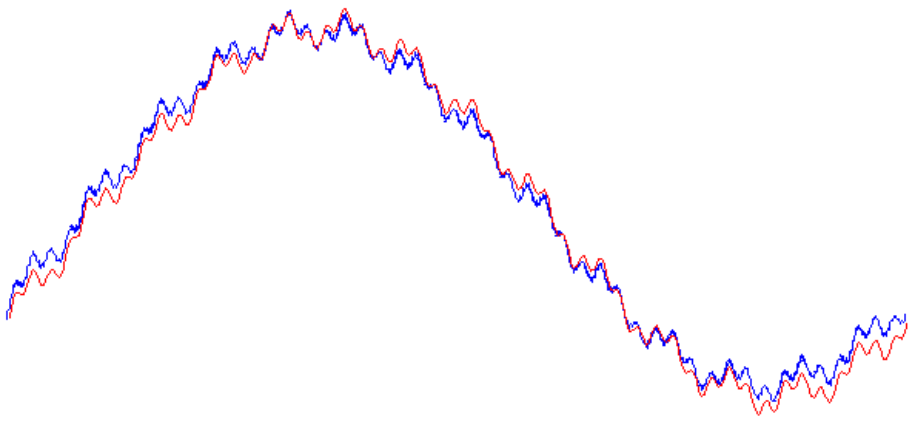


Рис. 5. Сравнение результатов расчета по методам 1 и 2

Заключение

Практическое совпадение результатов расчетов по методам 1 и 2, в основу которых положены принципиально разные способы моделирования влияния погрешностей процесса зубофрезерования на точность нарезаемого зубчатого колеса, подтверждает состоятельность обоих методов.

Одновременно, подтверждена состоятельность предложенного метода определения кинематической погрешности колеса как погрешности станочного зацепления заготовки с производящей рейкой.

Разработанный метод и его программная реализация являются мощным инструментом для исследования влияния погрешностей технологического процесса на точность зубчатого колеса. Они позволяют оценить возможность нарезания колеса заданной точности с применением имеющегося оборудования и инструмента, а также сформулировать требования к точности оборудования и инструмента, необходимых для нарезания колеса заданной точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Производство зубчатых колес: Справочник // Калашников С.Н., Калашников А.С., Коган Г.И. и др.; под общ. ред. Тайца Б.А. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение. 1990. – 464 с.

[2] Зубчатые передачи: Справочник // Гинзбург Е.Г., Голованов Н.Ф.,Фирун Н.Б., Халебский Н.Т.; под общ. Ред Гинзбург Е.Г. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Л.: Машиностроение. 1980. – 416 с.

[3] Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука. 1968. – 584 с.

[4] Litvin, F.L., 2004. Gear geometry and applied theory. Cambridge University Press: p. 800.

[5] Radzevich, S.P., 2018. Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis. CRC Press, 2nd edition: p. 934.

[6] Бабичев Д.Т., Лебедев С.Ю., Бабичев Д.А. Основы проектирования цилиндрических передач при первоначальном синтезе оптимальной линии зацепления в торцовом сечении // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 7-й Международ. научно-практич. конф.- СПб.: Изд-во политех. ун-та, - 2018. 681-692 с.

[7] Егоров И.М. Влияние погрешностей процесса зубофрезерования на точность прямозубых зубчатых колес // Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 10-й Международ. научно-практич. конф.- СПб.: ПОЛИТЕХ_ПРЕСС, - 2021. 126-136 с.

[8] Бруевич Н.Г. Точность механизмов М.; Л.: ГИТТЛ, 1946. 332 с.

[9] Литвин Ф.Л. Проектирование механизмов и деталей приборов. — Ленинград: Машиностроение, 1973 .— 695 с.

[10] Егоров И. М. , Алексанин С. А. , Федосовский М. Е. , Кряжева Н. П. Математическое моделирование погрешностей изготовления элементов цевочной передачи планетарного редуктора. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. Выпуск 6 (94). С. 171-176.
[11] Attaway S. Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Publisher : Butterworth-Heinemann; 4th edition, 2016. 600 p.

I. M. Egorov

MODELING OF THE INFLUENCE OF THE ERRORS OF THE GEAR HOBBING PROCESS ON THE ACCURACY OF THE GEAR BEING CUT

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers the main errors of the gear hobbing process and their influence on the accuracy of the gear being cut. To find the function of the kinematic error, a method is proposed based on determining the projections of the vectors of the primary errors of the gear hobbing process on the profile normal in the machine engagement of the workpiece with the producing rail. The obtained results are compared with the results obtained by modeling the process of forming tooth profiles by traces of the cutting edges of the tool and the engagement of this wheel with the measuring wheel. The practical coincidence of the results obtained confirms the effectiveness of both methods.

The developed software can be used to assess the influence of errors in the gear hobbing process on the kinematic accuracy of the cut wheel and to assign process parameters for cutting a gear wheel of a given accuracy.

Key words: errors of the gear hobbing process, machine gearing, producing rack, kinematic error.

REFERENCES

[1] Manufacture of gears: Reference book // Kalashnikov S. N., Kalashnikov A. S., Kogan G. I. et al.; under total. Ed. by Taits B. A.-3rd ed., reprint. and supplement. - M.: Mechanical Engineering. 1990 – - 464 p.
[2] Gearing: Reference book / / Ginzburg E. G., Golovanov N. F., Firun N. B., Halebsky N. T.; under the total. Ed. Ginzburg E. G.-2nd ed., reprint. and supplement-L.: Mechanical Engineering. 1980 – - 416 p.
[3] Litvin F. L. Theory of toothed gearing. - M.: Nauka. 1968. – 584 p.

[4] Litvin, F.L., 2004. Gear geometry and applied theory. Cambridge University Press: p. 800.
[5] Radzevich, S.P., 2018. Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis. CRC Press, 2nd edition: p. 934.
[6] Babichev D.T., Lebedev S.Y., Babichev D.A. Basics of designing cylindrical gears during the initial synthesis of the optimal gearing line in the end section / Modern mechanical engineering: Science and education / - SPb .: Polytechnical Publishing House. University, 2018. p. 681-692. ISSN 2223-0807.
[7] Egorov I. M. Influence of gear milling process errors on the accuracy of a spur gears/ Modern mechanical engineering: Science and education / - SPb .: Polytechnical Publishing House. University, 2021. p. 126-136. ISSN 2223-0807.
[8] Bruevich N. G. Accuracy of mechanisms M.; L.: GITTL, 1946. 332 p.
[9] Litvin F. L. Design of mechanisms and parts of devices. - Leningrad: Mashinostroenie, 1973 .— 695 p
[10] Egorov I. M., Aleksanin S. A., Fedosovsky M. E., Kryazheva N. P. Mathematical modeling of manufacturing errors of elements of a planetary gear pinion transmission. // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2014. Issue 6 (94). pp. 171-176.
[11] Attaway S. Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Publisher : Butterworth-Heinemann; 4th edition, 2016. 600 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.165

К. В. Елисеев[1], В.Ю.Махнов[2]

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИИ, ВЫЗВАННОЙ РАЗРУШЕНИЕМ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

[1]Кирилл Валентинович Елисеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)740-1134, E-mail: k.eliseev@spbstu.ru

[2]Василий Юрьевич Махнов
АО «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)326-7531, E-mail: Makhnov_VY@power-m.ru

Аннотация

В работе рассмотрен вероятностный анализ аварии, связанной с отрывом фрагмента рабочей лопатки паровой турбины. Предложен подход, позволяющий получить вероятностную оценку попадания фрагмента в «мишени» – системы, важные для безопасности станции. Четырёхэтапная процедура состоит из детерминистических расчетов методом конечных элементов и вероятностных с использованием метода Монте-Карло.

Ключевые слова: обоснование безопасности, атомная станция, паровая турбина, вылет фрагмента, метод Монте-Карло, многоцикловая усталость, оценка вероятности.

Введение

Обеспечение безаварийной работы атомной станции – одна из главных целей генерального проектировщика. Разработка всех компонентов станции подчинена этой цели, что достигается проведением расчетных и экспериментальных работ, учетом опыта эксплуатации.

Проектировщик должен доказать соответствие станции нормативным требованиям страны-эксплуатанта станции, для чего формируется пакет документации – отчет обоснования безопасности атомной станции (ООБ АС) [2]. В ООБ должны входить детерминистические и вероятностные анализы безопасности. Детерминистические анализы аварий должны выполняться на основе консервативного подхода.

Целевыми ориентирами безопасности АС являются непревышение суммарной вероятности тяжелых аварий для каждого блока АС на интервале в один год, равной 10^{-5}; непревышение суммарной вероятности большого аварийного выброса для каждого блока АС на интервале в один год, равной 10^{-7}[1].

Разработкой нормативной документацией, содержащей требования к отчету, занимаются различные международные и национальные организации, например:

- Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Россия) [1]
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (США)
- Atomic Energy Regulatory Board (Индия) [8]
- Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ)

Сравнение требований, предъявляемых к турбине, содержащихся в этих нормах, показывает наличие сходных подходов к обоснованию безопасности. Они определяются спецификой оборудования – вал турбины с рабочими лопатками представляет собой вращающееся с достаточно большой скоростью (3000об/мин для быстроходных и 1500об/мин для тихоходных машин) массивное тело. Общие инженерные представления и опыт эксплуатации показал, что основное внимание следует обратить на возможные аварийные ситуации, связанные с вылетом различных фрагментов с пробиванием корпуса турбины [3, 6]. Фрагменты могут рассматриваться двух основных типов:

- относительно небольшие, но обладающие высокой начальной скоростью – фрагменты лопаток;
- относительно массивные – фрагменты ротора.

Образование фрагментов может быть вызвано дефектами материала и изготовления, аварийным разгоном турбины выше расчетной скорости, ухудшением свойств материалов в процессе эксплуатации и др.

В случае выхода за пределы корпуса фрагменты не должны попадать в оборудование машинного зала, важное для безопасности станции (так называемый вылет по низким траекториям, прямые попадания), а также в соседние здания (вылет по высоким траекториям). На рисунке 1 показан пример разлета фрагментов ротора турбины ТЭС.

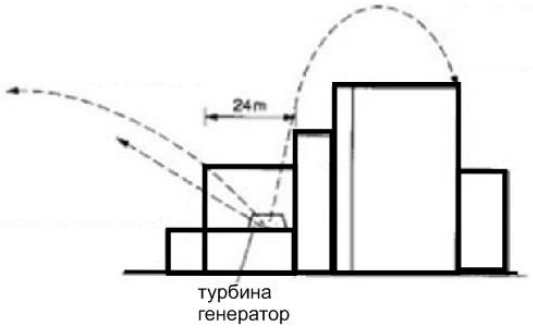


Рис. 1. Разлет обломков на ТЭС Вакаяма

Обычно цель анализа – показать, что вероятность аварии на станции в течении года мала. Вероятность аварии вычисляется на основе вероятностей событий, которые могут к ней привести [4]. Необходимо оценить вероятность отделения фрагмента ротора или рабочей лопатки, вероятность проникновения их через корпус турбины и, наконец, вероятность попадания в мишени и их разрушения. Вероятность аварии вычисляется по формуле $P=P_1\times P_2\times P_3$, где

- P_1 – вероятность выхода фрагмента ротора турбины из корпуса;
- P_2 – вероятность попадания в мишени – оборудование, важное для безопасности станции;
- P_3 – вероятность того, что оборудование перестанет выполнять свои функции после попадания.

Требуется обеспечить оценку $P\leq 10^{-7}$ в год. Предпочтительно обеспечить выполнение этого условия за счет снижения P_1 [8]. Вероятность P_2 может быть существенно снижена при благоприятной ориентации турбины (оси) относительно реактора, рисунок 2. В этом случае маловероятно попадание фрагментов непосредственно в здание реактора.

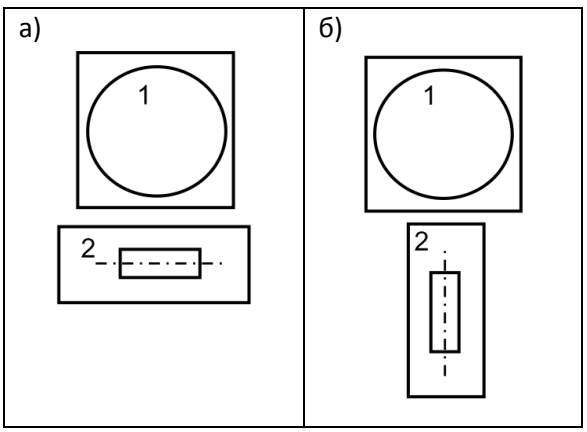


Рис. 2. Неблагоприятный (а) и благоприятный (б) варианты взаимной ориентации здания реактора (1) и турбины (2).

Методы

Далее рассматривается вариант оценки вероятности аварии, связанной с вылетом фрагмента рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления. Выбор именно этой ступени как объекта анализа объясняется следующим:

- проточная часть турбины такова, что именно за последней ступенью нет внутренних преград и основной удар фрагмента происходит непосредственно о корпус турбины;
- рабочие лопатки последней ступени являются самыми нагруженными ввиду наибольшей длины, например, типовая лопатка в быстроходных турбинах АЭС производства АО «СМ» имеет длину 1200мм) периферийная область лопаток последней ступени подвергается ударному воздействию капель влаги, что приводит к эрозионному износу поверхности и появлению поверхностных дефектов, снижающих усталостную прочность [15];
- опыт эксплуатации, отраженный в нормативах, показал, что чаще наблюдаются повреждения именно последних ступеней.

Анализ предлагается разбить на несколько этапов в порядке возникновения событий, которые могут привести к аварии:

1. Образование фрагмента
2. Движение фрагмента до выхода из корпуса турбины
3. Проникновение деформированных фрагментов через корпус
4. Движение фрагментов внутри машинного зала.

В связи с ограниченным объемом статьи, подробности анализа будут опущены.

Этап 1.

Рабочие лопатки работают в условиях действия центробежных сил, паровых сил. Действие первых приводит к возникновению растягивающих напряжений, достигающих максимальных значений у корневого сечения. В паровых силах имеется непостоянная составляющая, которая является одной из причин возникновения вибраций лопаток малых амплитуд. Основной механизм повреждения лопаток – многоцикловая усталость, возможно в сочетании дополнительными эксплуатационными факторами (эрозия, коррозия).

Для анализа рабочей лопатки на многоцикловую усталость используется уравнение Баскина-Морроу [13]

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varepsilon_a = \left[\frac{\sigma_f^{'} - \sigma_m}{E}\right](2\,\mathrm{N}_f)^b, \text{ где} \qquad (1)$$

ε_a - амплитуда деформаций на цикле,

σ_m - среднее напряжение

$\sigma_f^{'}$ - коэффициент усталостной прочности,

b - экспонента усталостной прочности,

N_f - число циклов до разрушения,

E - модуль Юнга.

Значения ε_a и σ_m являются расчетными величинами, полученными в результате анализа ступени методом конечных элементов. При наличии данных контроля вибрационного состояния ступени во время эксплуатации, позволяющих определить характерные формы колебаний и амплитуды вибрации, производится корректировка ε_a. .

Значения b и $\sigma_f^{'}$ подобраны таким образом, чтобы учесть эрозионное повреждение поверхности, которое может привести к появлению трещиноподобных дефектов снижающих усталостную прочность Используются известные данные об эксплуатации агрегатов похожей конструкции ранних дизайнов.

Для получения вероятностной оценки времени до образования трещины применяется метод Монте-Карло [9, 11, 16]. Все величины в формуле (1) принимаются случайными с нормальным законом распределения. Проводится серия расчетов, в каждом получаем оценку времени до разрушения.

Проведя статистический анализ полученных времен, можно получить вероятность разрушения P_{11} на выбранной временной базе. Типичный график кривой вероятности разрушения показан на рисунке 3.

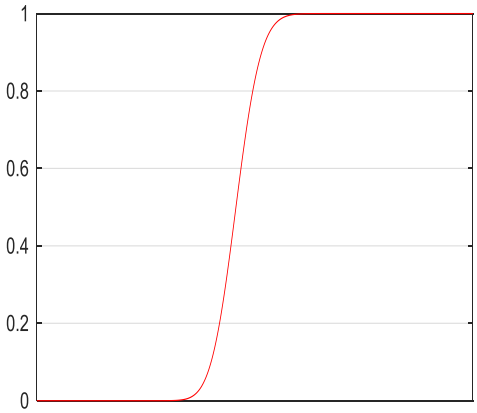


Рис. 3. Кривая вероятности разрушения одной лопатки в зависимости от времени (добавить обозначения осей).

Этап 2.

На втором этапе анализа проводится серия расчётов вылета отделившегося фрагмента. Данные расчеты являются детерминистическими, проводятся с использованием метода конечных элементов в пакете расчёта высокоскоростных процессов, например, LS-Dyna [7]. Модели включают несколько рабочих (и направляющих) лопаток,

козырек и диафрагму – рисунок 4. Для учета неопределенности геометрических параметров фрагмента, свойств материалов (например, сплава титана ВТ6) [5, 14] проведены серии расчетов с разными начальными длинами фрагментов, критериями разрушения.

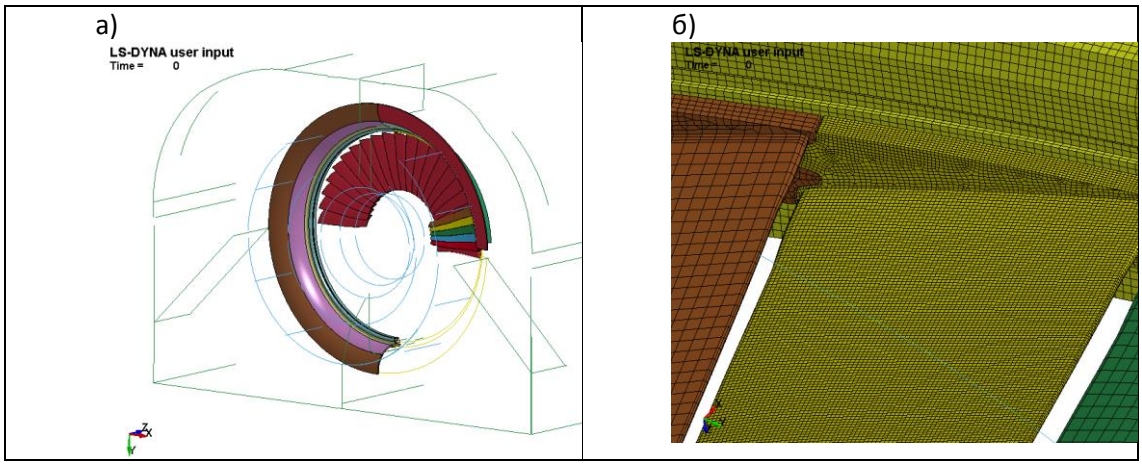


Рис. 4. Типичные составляющие модели (а) и фрагмент конечно-элементной сетки(б).

Для каждого варианта проводится расчет, охватывающий первый этап вылета фрагмента, во время которого происходит контакт с козырьком, диафрагмой и соседними рабочими лопатками, при этом происходит изменение формы фрагмента вплоть до разделения на несколько частей, рисунок 5.

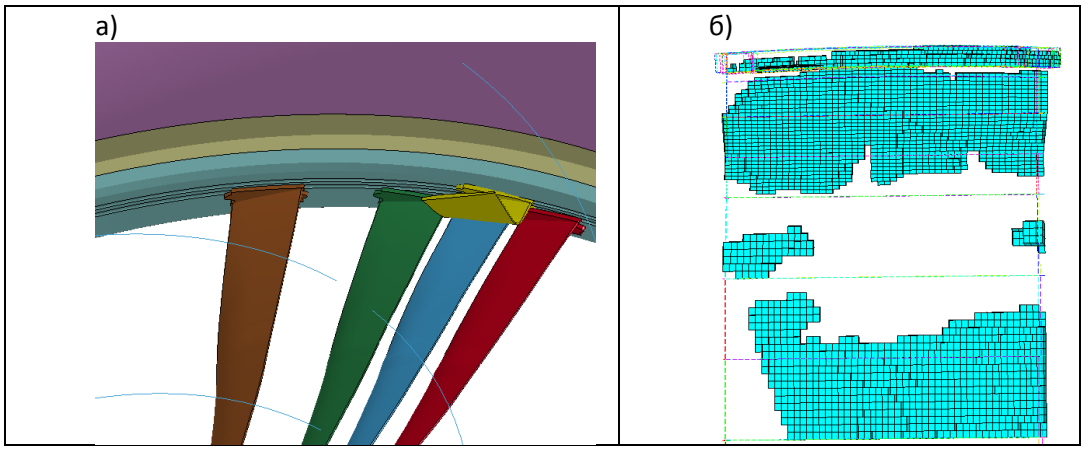


Рис. 5. Деформированное состояние в процессе вылета (а) и характерные фрагменты после удара о козырек (б).

Основными результатами в каждом расчете являются размеры (и масса) фрагментов, их скорость и направление движения, кинетическая энергия. Наихудшие варианты используются для последующего анализа. Вероятностной оценки здесь нет, но результаты для следующего этапа выбираются консервативно.

Этап 3.

На третьем этапе проводится анализ проникновения фрагментов через корпус турбины. Предполагается, что ориентация фрагмента перед ударом произвольна, вектор и значение скорости получены на втором этапе.

Геометрия фрагмента при ударе меняется, скорость, масса и кинетическая энергия уменьшаются. Результатом расчетов третьего этапа становится вероятность проникновения фрагмента через корпус P_{13}, параметры фрагмента на выходе из корпуса, вектор скорости, диаграмма разлета в привязке к схеме машинного зала.

Этап 4.

Далее необходимо провести анализ машинного зала на наличие в области возможного разлета «мишеней» – объектов, важных для безопасности (обеспечивающих нормальное функционирование или безопасный останов реактора). Зная углы вылета, скорости и массы фрагментов можно оценить вероятности попадания в них фрагментов P_2.

В случае наличия методик расчета, можно оценить вероятность разрушения целей, в противном случае консервативно принимается $P_3=1$.

Итоговая вероятность аварии, связанной с вылетом фрагмента, может быть получена как

$P_1= (P_{11} \times P_{13}) \times P_2 \times P_3$.

Результаты

Предложенная методика вероятностного анализа развития аварийной ситуации, связанной с образование фрагмента рабочей лопатки, позволяет получить оценку вероятности аварии согласно требования нормативных документов.

Обсуждение

При выполнении анализа аварии, связанной с образованием фрагментов рабочей лопатки, возникают следующие объективные трудности.

Турбину можно отнести к уникальному оборудованию, т.к. в эксплуатации обычно находится ограниченное количество аналогичных агрегатов. Случаи разрушения элементов часто отсутствуют или их количество мало. База для статистического анализа существенно ограничена.

В случае проведения расчетного обоснования необходимо создание моделей, учитывающих поведение материалов при динамическом

высокоскоростном воздействии, применение критериев разрушения во время ударов. Экспериментальные данные ограничены.

Анализ многоцикловой усталости в условиях эрозионного воздействия затруднен ввиду ограниченности экспериментальных данных.

Также можно констатировать ограниченность данных мониторинга состояния эксплуатируемых турбин на больших временных базах.

Учитывая эти неопределенности, некоторые параметры приходится принимать «в запас», чтобы обеспечить консервативность оценки. Представляется, что в случае расширения экспериментальной базы предложенная методика и вероятностные оценки аварии могут быть уточнены, с уменьшением итоговой вероятности аварии.

Заключение

Предложена методика оценки вероятности аварии, вызванной вылетом фрагмента рабочей лопатки. Использованы вероятностные и детерминистические подходы, экспериментальные данные и результаты численных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001-15, Федеральная служба по экологическому, технологическому надзору, Москва 2016

[2] Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности АС с реактором типа ВВЭР НП-006-98 (ПНАЭ Г-01-036-95), Госатомнадзор России Москва 2005

[3] Методические указания по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций РД 153-34.1-17.424-2001 ОАО «ВТИ» М. 2002

[4] А.Н.Бирбраер, А.Ю.Роледер Экстремальные воздействия на сооружения. СПб., Издательство Политехнического университета, 2009

[5] М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, О.Л. Любчик, И.Л. Гладкий Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава ВТ6. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 13, №4(4), 2011

[6] А.Н. Трухний Стационарные паровые турбины. М. Энергоатомиздат 1990

[7] К. Шах LS-DYNA для начинающих. Palmarium Academic Publishing, 2019 160с

[8] PROTECTION AGAINST INTERNALLY GENERATED MISSILES IN NUCLEAR POWER PLANTS Atomic Energy Regulatory Board
Mumbai-400 094 India March 2013
[9] Aleksander Karolczuk, Marta Kurek, Fatigue life uncertainty prediction using the Monte Carlo and Latin hypercube sampling techniques under uniaxial and multiaxial cyclic loading, International Journal of Fatigue, Volume 160, 2022, 106867, ISSN 0142-1123
[10] Di, J., Wang, S., Yan, X., Jiang, X., Lian, J., Zhang, Z., & Xie, Y. (2020). Experimental Research on Water Droplet Erosion Resistance Characteristics of Turbine Blade Substrate and Strengthened Layers Materials. *Materials (Basel, Switzerland)*, *13*(19), 4286
[11] Huiying Gao, Xiaoqiang Zhang, Xiaoqiang Yang, Bo Zheng, A Novel Probabilistic Fatigue Life Prediction Method for Welded Structures Based on gPC, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, Article ID 5534643, 10 pages, 2021.
[12] M. Jane£eka, F. Nový́b, P. Harcubaa, J. Stráskýa, L. Trkoc, M. Mhaeded and L. Wagnerd The Very High Cycle Fatigue Behaviour of Ti_6Al_4V Alloy ACTA PHYSICA POLONICA A Vol. 128 (2015) No 4. p 497-502
[13] Morrow, J. Fatigue design handbook. Advances in Engineering / J. Morrow. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. – 1968. – Vol. 4. – P. 21–29.
[14] Patricio E. Carrion, Nima Shamsaei, Steven R. Daniewicz , Robert D. Moser Fatigue behavior of Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects International Journal of Fatigue 99 (2017) 87–100 p87-100
[15] Qulan Zhou, Na Li Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications. Materials Transactions, Vol. 49, No. 7 (2008) pp. 1606 to 1615
[16] Xiao-Peng Niu, Run-Zi Wang, Ding Liao, Shun-Peng Zhu, Xian-Cheng Zhang, Behrooz Keshtegar, Probabilistic modeling of uncertainties in fatigue reliability analysis of turbine bladed disks, International Journal of Fatigue,Volume 142, 2021, 105912, ISSN 0142-1123

K. V. Eliseev[1], V.Y.Makhnov[2]

PROBABILITY ANALYSIS OF AN ACCIDENT CAUSED BY THE DESTRUCTION OF A STEAM TURBINE BLADE

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport” (JSC “Power machines”), Russia

Abstract

The paper considers a probabilistic analysis of an accident associated with the flight of a fragment of a steam turbine rotor blade. An approach has been proposed that makes it possible to obtain a probabilistic estimate of a fragment hitting targets – systems important for plant safety. The four-step procedure consists of deterministic finite element calculations and probabilistic calculations using the Monte Carlo method.

Key words: safety justification, nuclear power plant, steam turbine, fragment, Monte Carlo method, high-cycle fatigue, probability estimation.

REFERENCES

[1] General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants NP-001-15, Federal Service for Environmental and Technological Supervision, Moscow 2016
[2] Requirements for the content of the safety analysis report for NPPs with a VVER type reactor NP-006-98 (PNAE G-01-036-95), Gosatomnadzor of Russia Moscow 2005
[3] Guidelines for investigating the causes of damage to parts of the rotors of steam turbines of power plants, Gosatomnadzor of Russia Moscow 2005 РД 153-34.1-17.424-2001 JSC "VTI" M. 2002
[4] A.N.Birbraer, A.J.Roleder Extreme impacts on structures. St. Petersburg, Polytechnic University Publishing House, 2009
[5] M.Sh. Nikhhamkin, L.V. Voronov, O.L. Lyubchik, I.L. Smooth Experimental verification of models of deformation behavior and high-speed fracture of titanium alloy VT6. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, volume, 13, №4(4), 2011
[6] A.N. Truhnii Stationary steam turbines. M. Energoatomizdat, 1990
[7] K. Shakh LS-DYNA for beginners. Palmarium Academic Publishing, 2019 160c
[8] PROTECTION AGAINST INTERNALLY GENERATED MISSILES IN NUCLEAR POWER PLANTS Atomic Energy Regulatory Board Mumbai-400 094 India March 2013
[9] Aleksander Karolczuk, Marta Kurek, Fatigue life uncertainty prediction using the Monte Carlo and Latin hypercube sampling techniques under uniaxial and multiaxial cyclic loading, International Journal of Fatigue, Volume 160, 2022, 106867, ISSN 0142-1123
[10] Di, J., Wang, S., Yan, X., Jiang, X., Lian, J., Zhang, Z., & Xie, Y. (2020). Experimental Research on Water Droplet Erosion Resistance Characteristics of Turbine Blade Substrate and Strengthened Layers Materials. *Materials (Basel, Switzerland)*, *13*(19), 4286

[11] Huiying Gao, Xiaoqiang Zhang, Xiaoqiang Yang, Bo Zheng, A Novel Probabilistic Fatigue Life Prediction Method for Welded Structures Based on gPC, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, Article ID 5534643, 10 pages, 2021.
[12] M. Janeɬeka, F. Novýb, P. Harcubaa, J. Stráskýa, L. Trkoc, M. Mhaeded and L. Wagnerd The Very High Cycle Fatigue Behaviour of Ti_6Al_4V Alloy ACTA PHYSICA POLONICA A Vol. 128 (2015) No 4. p 497-502
[13] Morrow, J. Fatigue design handbook. Advances in Engineering / J. Morrow. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. – 1968. – Vol. 4. – P. 21–29.
[14] Patricio E. Carrion, Nima Shamsaei, Steven R. Daniewicz , Robert D. Moser Fatigue behavior of Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects International Journal of Fatigue 99 (2017) 87–100 p87-100
[15] Qulan Zhou, Na Li Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications. Materials Transactions, Vol. 49, No. 7 (2008) pp. 1606 to 1615
[16] Xiao-Peng Niu, Run-Zi Wang, Ding Liao, Shun-Peng Zhu, Xian-Cheng Zhang, Behrooz Keshtegar, Probabilistic modeling of uncertainties in fatigue reliability analysis of turbine bladed disks, International Journal of Fatigue,Volume 142, 2021, 105912, ISSN 0142-1123

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.179.01

Е. Ю. Нефедьев[1], Л. О. Стояновский[2]

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

[1]Евгений Юрьевич Нефедьев,
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)241-1988, E-mail: ne246@ya.ru.

[2]Стояновский Лев Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905)230-4149, E-mail: sto-lev@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены методические вопросы применения машинного обучения с целью выявления дефектов методом акустической эмиссии при выполнении сварных швов конструкций ответственного назначения непосредственно в момент сварки (in-situ).

Полученный подход дает возможность идентифицировать скопления однородных сигналов акустической эмиссии автоматически в реальном времени, что повышает точность метода и позволяет стандартизировать результат обработки сигналов. Это способствует своевременному обнаружению и устранению дефектов при сварке конструкций ответственного назначения, что дает возможность варить бездефектные швы. Применение данного подхода повысит надежность готовых изделий при одновременном снижении себестоимости их изготовления.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, машинное обучение, кластеризация, дефекты сварки.

Введение

Одним из способов повышения гарантии надёжности сварных соединений является разработка и дальнейшее использование средств

неразрушающего контроля и технической диагностики, которые используются для обнаружения дефектов, концентраторов напряжений, а также анализа степени их опасности на работающих объектах.

Наиболее важной задачей диагностики является распознавание состояния диагностируемого объекта. В случае неразрушающего контроля бездефектности сварных соединений, в основном, используют радиографический, токовихревой, капиллярный и ультразвуковые методы [20].

Данные методы имеют ряд недостатков, которые затрудняют использование их в некоторых случаях. Например, радиографический метод, который предназначен для того, чтобы обнаруживать трещины и непровары сварного шва (несплавления основного металла по длине шва), не гарантирует выявление дефектов, расположение которых не совпадает с направлением измерений. Капиллярный метод обладает высокой чувствительностью при обнаружении поверхностных дефектов, но не пригоден для выявления внутренних. Использование ультразвукового метода для обеспечения выявления трещин приводит к необходимости обеспечения чистоты обработки поверхности околошовной зоны, в местах установки датчиков. При этом все перечисленные методы не позволяют получить информацию о кинематике повреждений и связанной с ней степенью опасности дефектов, а также требуют большего времени для оценки (для использования методов необходимо, чтобы деталь остыла), что может затруднять принятие заключений о состоянии объекта.

Кроме приведенных выше существует метод акустической эмиссии (АЭ), заключающийся в регистрации ультразвуковых волн, порождаемых самим материалом при образовании и развитии дефектов в нем [4, 6, 8-11, 13-16, 18, 19, 21-22]. Поэтому всё чаще для контроля сварных соединений привлекается метод акустической эмиссии (АЭ) [5-7, 17.], так как он позволяет избежать описанных проблем. В настоящее время существенным ограничением для применения АЭ является необходимость ручной обработки данных при контроле сварки. Поэтому весьма актуален вопрос разработки и внедрения методов автоматической классификации дефектов.

Цель исследования – разработать автоматизированный метод для выявления дефектов в реальном времени при изготовлении сварных конструкций ответственного назначения с использованием анализа данных акустической эмиссии.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- разработать программную реализацию поиска дефектов на основе данных, относящихся к холодным трещинам;

- провести тестирование программной реализации разработанного метода;
- проанализировать результаты.

Методы

АЭ система контроля позволяет представлять данные в псевдо-трехмерном виде, когда по оси абсцисс отложена координата зарегистрированного источника АЭ в миллиметрах, по оси ординат отложено время регистрации в секундах, а цветом показана степень опасности зарегистрированного источника в градации от фиолетового к красному, что соответствует опасности от 0 до 1000. Таким образом, получается картина последовательности появления во времени и пространстве сигналов АЭ, сопровождаемая информацией о степени опасности данного источника.

Система АЭ мониторинга регистрирует ультразвуковые сигналы в диапазоне частот от 100кГц до 1000кГц, представляющие собой излучение от различных процессов: образование трещин, фазовые превращения, растрескивание шлака, электромагнитные наводки и другие явления [17]. На фоне многочисленных сигналов, которые можно считать шумом, необходимо выделить те сигналы, которые связаны с образованием и развитием трещин, непроваров, растрескиванием шлаковых включений. Такая задача выполняется в несколько этапов: определение сварочной дорожки, выделение сигналов от ручной механической зачистки сварщиком шлаковой корки и выявление дефектных мест в сварном шве после каждого прохода. При большой толщине ответственных деталей они свариваются за десятки проходов. Каждый проход добавляет шву валик эквивалентным диаметром 2-3 мм. Важно выявить и удалить дефект сразу после нанесения очередного валика, чтобы далее продолжить варить бездефектный шов.

В качестве примера возьмём набор данных с дефектом (рис. 1). Сварная дорожка выделена зеленым контуром (она характеризуется наибольшей плотностью сигналов акустической эмиссии). Механическая зачистка была произведена начиная с 290 секунды (фиолетовый контур на рисунке, выглядит как горизонтальное уплотнение в шуме). Дефект был заложен в предыдущих проходах на координате 320-330 мм (шум с повышенным вертикальным уплотнением в пределах красного контура), остальные точки относятся к фоновым шумам. В данном примере также содержится реальный, незаложенный искусственно дефект на координатах 220-240 мм. Наличие данного дефекта было подтверждено позднее при анализе шва методом ультразвукового контроля.

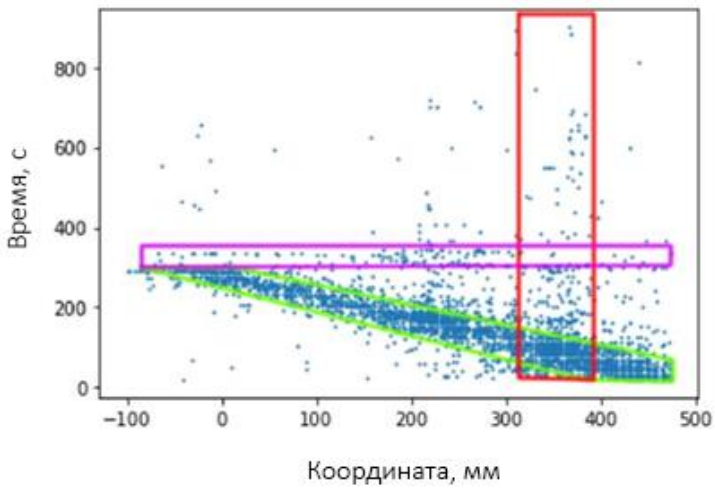


Рис. 1. Пример акустико-эмиссионных данных

Для выявления зон концентрации дефектов в данной работе используются несколько известных математических методов обработки данных и машинного обучения, а именно кластеризации. Приведем краткий анализ методов кластеризации, которые показали наилучший результат по выделению отдельных объектов в данных.

Кластеризация точек на основе регулярной сети

Входными данными для метода являются: координаты точек в пространстве, R - пороговое расстояние между точками в кластере [3].

Суть алгоритма состоит в том, чтобы объединять точки, находящиеся на расстоянии меньшем, чем R друг от друга. При этом для оптимизации используется регулярная сеть, которая делит пространство объектов на ячейки размером $R \times R$. Это позволяет сократить количество вычислений за счет того, что для каждого объекта обрабатывается только объекты, принадлежащие небольшой область вокруг него ($3R \times 3R$) вместо полного набора данных.

Данный алгоритм, его модификации и использование его совместно с алгоритмами кластеризации по плотности являются эффективными способами решения задач выявления источников АЭ при испытании сосудов давления и контроля сварки.

Пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности (Density-based spatial clustering of applications with noise или DBSCAN) [1]

Данный алгоритм является алгоритмом кластерного анализа, основанным на плотности точек. Кластерный анализ используется для обработки данных АЭ [12], он позволяет работать с данными, в которых есть шумы.

DBSCAN крайне эффективен для задачи по обнаружению кластеров при анализе АЭ данных сварки, так как в них имеется множество шумов

(получение ложных сигналов или неточное месторасположение), а также объектов, отличающихся по плотности, что позволяет легко отделить их.

На основе описанных данных алгоритмов авторами был создан новый алгоритм кластеризации по плотности, использующий регулярную сеть для оптимизации. Результаты работы вновь созданного алгоритма близки к результатам алгоритма DBSCAN, отличия лежат в области объединения кластеров. На рисунке 2 приведён пример работы алгоритма (в данном случае результат полностью идентичен работе DBSCAN). На рисунке можно видеть, что алгоритм успешно отделил данные, которые относятся к сварной дорожке (обозначены красным цветом).

Основное отличие от DBSCAN заключается в том, что при рассмотрении новой точки алгоритм проходится только по уже обработанным точкам. Для этого каждая точка хранит в себе дополнительную метку, указывающую имеет ли данная точка достаточную плотность объектов вокруг или нет. До тех пор, пока точка не имеет достаточной плотности вокруг (числа точек равного P), в неё заносится информация об окружающих объектах в радиусе R. После превышения указанного порога точка меняет свою метку, объединяя кластеры вокруг неё в один, и из неё удаляется информация об окружающих объектах для экономии памяти.

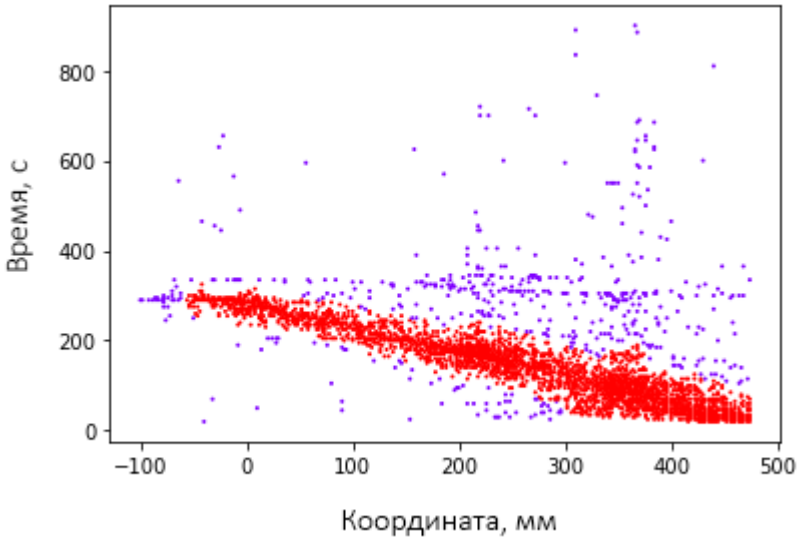


Рис. 2. Результат работы алгоритма кластеризации на основе плотности

Такой подход позволяет добавлять новые объекты анализа без необходимости пересчитывать все данные заново, что значительно ускоряет алгоритм при работе в режиме реального времени. Это в том числе позволяет хранить историю объединения кластеров, что делает алгоритм более универсальным для задач АЭ контроля, например, при испытании сосудов давления (так как можно отслеживать процесс образования дефектов).

Для дальнейшей работы алгоритма данные, относящиеся к сварной дорожке, удаляются т. к. их наличие затрудняет процесс поиска зачисток и дефектов.

Затем определяются непосредственно уплотнения в данных, относящиеся к зачисткам и дефектам.

Для определения зачисток задаются пороги количества объектов на горизонтальных участках. Те участки, на которых количество объектов превышает данный порог, помечаются как зачистки и затем удаляются из анализа (т. к. зачистки затрудняют процесс поиска дефектов).

Аналогично находятся вертикальные уплотнения в данных, которые относятся к дефектам. Результат описанных шагов алгоритма приведён на рисунке 3.

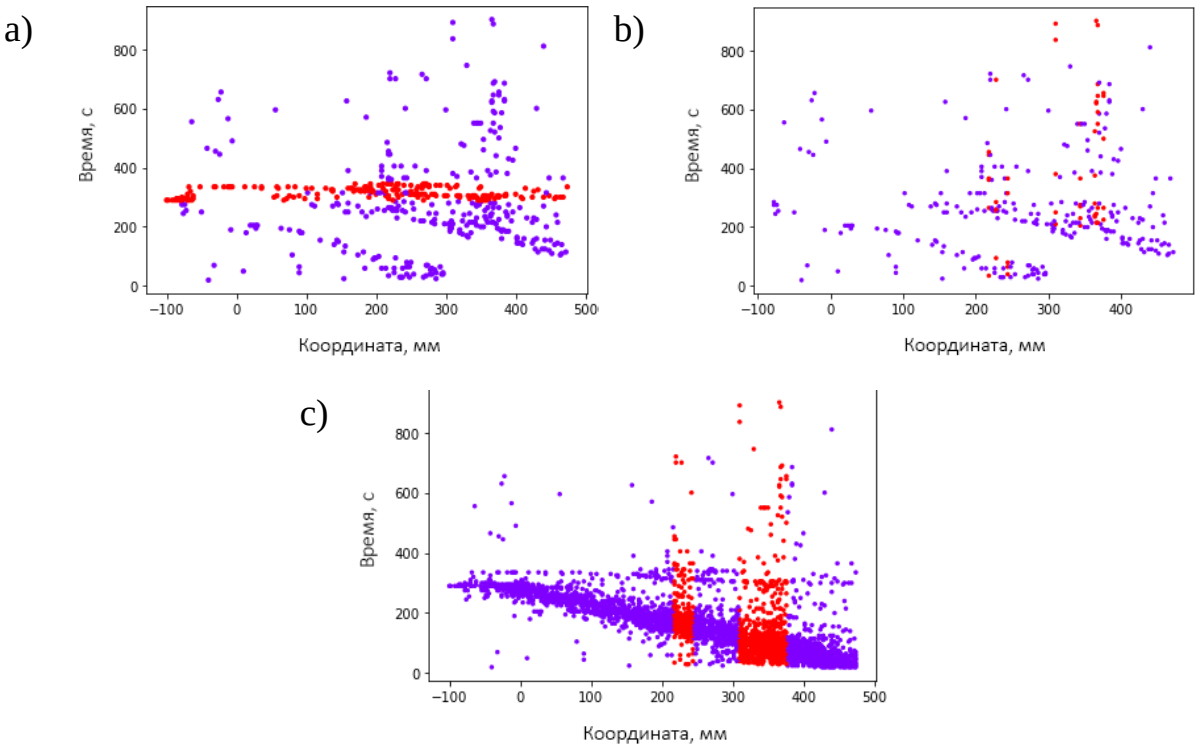


Рис. 3. Пример результата выделения уплотнений: *a*) зачистки; *b*) дефекты; *c*) конечный результат работы алгоритма

Результаты

Оценка скорости работы алгоритма производилась на процессоре Intel Core™ i5 9600k при тактовой частоте 4.2 ГГц с помощью пакета «BenchmarkDotNet 0.11.3.0» с автоматическим выбором числа итераций для реализации на языке C#.

В качестве данных использовались результаты отработки технологии АЭ контроля на экспериментальных стальных пробах толщиной 50 мм.

Ниже в таблице 1. приведен фрагмент результатов тестирования.

Таблица 1. Результаты тестирования времени работы алгоритма кластеризации по плотности

Тест	Число источников, ед	R, ед	P, ед	Среднее время работы, мс
Равномерный шум	100000	1	1	263.8±4.5
			2	213.3±4.5
		33	1	478.3±2.9
			8	444.8±2.5
			15	439.1±1.8
		65	1	481.2±3.6
frame_20_1	1853	5	20	3.5±0.02
frame_20_2	2357			4.5±0.04
frame_20_3	2271			4.4±0.02
frame_20_4 (рисунок 2)	2675			5.4±0.02
frame_20_5	2217			4.3±0.03

Обсуждение

Исходя из результатов тестирования, можно сделать вывод о том, что есть возможность применять полученный алгоритм в режиме реального времени: скорость работы алгоритмов в несколько раз превышает промежуток, между поступлениями данных. Также важно отметить, что для всех данных алгоритм корректно определил месторасположение дефектов.

Данные таблицы 1 показывают, что процесс обработки всех данных не превышает 0,5 секунды, а процесс сварки занимает время на три порядка больше. Это показывает, что алгоритм позволяет обрабатывать данные в реальном времени, т. к. данные объёмом в 100 тысяч источников АЭ обрабатываются менее, чем за секунду. При этом реальные данные представляют собой выборку меньшего объёма, а сам процесс сбора данных во время сварки занимает несколько сотен секунд.

Разработанный алгоритм работает примерно в 20 раз быстрее, чем DBSCAN на реальных данных (в качестве реализации алгоритма DBSCAN для сравнения был выбран пакет «DBSCAN 2.0.12» [2]). Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что применение оптимизации в виде регулярной сети дает значительный прирост

производительности в сравнении с исходным алгоритмом. При этом важно отметить, что оптимизацию в виде регулярной сети можно применить и к алгоритму DBSCAN, но при этом его использование всё равно будет менее эффективно, так как в отличие от разработанного алгоритма при обновлении данных придётся проводить кластеризацию с нуля.

Данное исследование является продолжением работ разных авторов [5, 6, 17]. Оно развивает признанные актуальные подходы к обработке АЭ-данных сварки.

Заключение

Метод акустической эмиссии является современным методом диагностики дефектов при сварке, для него актуальна задача автоматизация процесса анализа полученных данных.

Для решения данной проблемы был разработан метод автоматического поиска дефектов в процессе сварки, основанный на выделении уплотнений в данных.

В ходе тестирования и анализа результатов работы алгоритма было выявлено, что алгоритм позволяет достоверно обрабатывать данные в режиме реального времени с большим запасом по производительности.

Практическая значимость работы заключается в автоматизации процесса акустико-эмиссионного контроля. Применение результатов данного исследования будет способствовать стандартизации и оптимизации поиска дефектов в процессе сварки конструкций ответственного назначения методом акустической эмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. / Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. // In Proc. of International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 1996. — P. 226—231.

[2] NuGet Gallery | DBSCAN 2.0.12. — URL: https://www.nuget.org /packages/ DBSCAN/ (visited on 20.05.2022).

[3] Кластеризация точек на основе регулярной сети / Хабр. — URL: http://habrahabr.ru/post/138185/ (дата обращения: 20.05.2022).

[4] Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing, Barat, V., Marchenkov, A., Ivanov, V., Elizarov, S., Machikhin, A., Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(20), 9429

[5] Inspection of welded joints of new pressure vessels using the acoustic emission method capabilities, Gomera, V.P., Smirnov, A.D., Nefedyev,

E.J., Grigorieva, A.V., Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, P. 21–34
[6] On the possibility of producing defect-free welds under acoustic emission monitoring, Gomera, V.P., Nefedyev, E.J., Smirnov, A.D., International Review of Mechanical Engineering, 2017, 11(5), P. 343–349
[7] The advanced acoustic emission technique for condition monitoring of industrial facilities, Petersen, T.B., Shemyakin, V.V., Samokhvalov, A.B., Chernigovsky, V., WCCM 2017 - 1st World Congress on Condition Monitoring 2017, 2017
[8] Review on structural health evaluation with acoustic emission, Ono, K., Applied Sciences (Switzerland), 2018, 8(6), 958
[9] Health monitoring of reinforced concrete structures with hysteretic dampers subjected to dynamical loads by means of the acoustic emission energy, Cortés, G., Suarez, E., Gallego, A., Benavent-Climent, A., Structural Health Monitoring, 2019, 18(5-6), P. 1836–1850
[10] Structural health monitoring of large structures using acoustic emission-case histories, Ono, K., Applied Sciences (Switzerland), 2019, 9(21), 4602
[11] Иванов В. И., Барат В. А. Акустико-эмиссионная диагностика, Издательский дом «Спектр», 2017.-368с
[12] Степанова, Л. Н. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта. Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27–35.
[13] Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Левин В. П., Солдатенков А. П., Просвирнин Д.В. Остаточная прочность, микротвердость и акустические свойства циклически деформированной малоуглеродистой стали. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 6. С. 44-53.
[14] Schofield B. H. Research on the sources and characteristics of acoustic emission. / B. H. Schofield // ASTM STP 505. 1972. pp. 11-19
[15] Мерсон Д.Л., Виноградов А. Ю., Данюк А.В. Природа акустической эмиссии при деформационных процессах в металлах и сплавах. В сборнике: Прочность неоднородных структур - ПРОСТ 2018 Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции. 2018. С. 138.
[16] Ohtsu M Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering (2008). P. 11-18 Springer Berlin Heidelberg.
[17] Гуменюк В.А., Сульженко В. А., Казанови В.А. и др. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс оценки состояния объекта на основе нечетной логики // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. 2003. № 1. С. 14–23.

[18] Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. М.: Наука, 2010. 415 с.
[19] А.Е. Андрейкив, Н. В. Лысак Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения; АН УССР, Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко. - Киев: Наук. думка, 1989. - 172с
[20] Сварка. Резка. Контроль: Справочник В 2-х томах/ Под общ. Ред. Н.П.Алешина, Г.Г.Чернышева. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 1 – 624 с.
[21] Acoustic emission in I-214 poplar wood under compressive loading, Rescalvo, F.J., Morillas, L., Valverde-Palacios, I., Gallego, A., European Journal of Wood and Wood Products, 2020, 78(4), P. 723–732.
[22] Мониторинг развития расслоения в корпусе сосуда давления при его периодической инспекции. / Гомера В. П., Нефедьев Е. Ю., Стояновский Л. О. и др. // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 391—404.

E.Yu.Nefedyev[1], L.O.Stoyanovskiy[2]

THE USE OF MACHINE LEARNING TO DETECT DEFECTS BY ACOUSTIC EMISSION DURING WELDING OF RESPONSIBLE PURPOSE STRUCTURES

[1]Krylov State Research Center, Russia;
[2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The article considers methodological issues of the use of machine learning in order to identify defects by acoustic emission when performing welds of structures of responsible purpose directly at the time of welding (in-situ).

The resulting approach makes it possible to identify clusters of homogeneous acoustic emission signals automatically in real time, which increases accuracy and allows standardizing the result of signal processing, simplifying the search for defects in welding structures of responsible purpose.

Key words: acoustic emission, machine learning, clustering, welding defects.

REFERENCES

[1] A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. / Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. // In Proc. of International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 1996. — P. 226—231.

[2] NuGet Gallery | DBSCAN 2.0.12. — URL: https://www.nuget.org /packages/ DBSCAN/ (visited on 20.05.2022).

[3] Point clustering based on regular grid / Habr. — URL: http://habrahabr.ru/post/138185/ (visited on: 20.05.2022).

[4] Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing, Barat, V., Marchenkov, A., Ivanov, V., ...Elizarov, S., Machikhin, A., Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(20), 9429

[5] Inspection of welded joints of new pressure vessels using the acoustic emission method capabilities, Gomera, V.P., Smirnov, A.D., Nefedyev, E.J., Grigorieva, A.V., Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, стр. 21–34

[6] On the possibility of producing defect-free welds under acoustic emission monitoring, Gomera, V.P., Nefedyev, E.J., Smirnov, A.D., International Review of Mechanical Engineering, 2017, 11(5), P. 343–349

[7] The advanced acoustic emission technique for condition monitoring of industrial facilities, Petersen, T.B., Shemyakin, V.V., Samokhvalov, A.B., Chernigovsky, V., WCCM 2017 - 1st World Congress on Condition Monitoring 2017, 2017

[8] Review on structural health evaluation with acoustic emission, Ono, K., Applied Sciences (Switzerland), 2018, 8(6), 958

[9] Health monitoring of reinforced concrete structures with hysteretic dampers subjected to dynamical loads by means of the acoustic emission energy, Cortés, G., Suarez, E., Gallego, A., Benavent-Climent, A., Structural Health Monitoring, 2019, 18(5-6), P. 1836–1850

[10] Structural health monitoring of large structures using acoustic emission-case histories, Ono, K., Applied Sciences (Switzerland), 2019, 9(21), 4602

[11] Ivanov V.I., Barat V.A. Acoustic emission diagnostics, Publishing house "Spectrum", 2017.-368 p.

[12] Stepanova, L. N. Clustering of acoustic emission signal sources by the rate of the leading-edge rise. Flaw detection. – 2009. – № 10. – P. 27–35.

[13] Botvina L.R., Tyutin M.R., Petersen T.B., Levin V. P., Soldatenkov A.P., Prosvirnin D.V. Residual strength, microhardness and acoustic properties of cyclically deformed low-carbon steel. Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2018. № 6. P. 44-53.

[14] Schofield B. H. Research on the sources and characteristics of acoustic emission. / B. H. Schofield // ASTM STP 505. 1972. P. 11-19

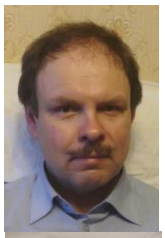
[15] Merson D.L., Vinogradov A. Yu., Danyuk A.V. The nature of acoustic emission during deformation processes in metals and alloys. In the collection: Strength of heterogeneous structures - SIMPLE 2018 Proceedings of the IXth Eurasian Scientific and Practical Conference. 2018. P. 138.
[16] Ohtsu M. Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering (2008) P. 11-18 Springer Berlin Heidelberg
[17] Gumenyuk V.A., Sulzhenko V.A., Kazanov V.A., etc. The system of classification of the degree of danger of acoustic emission sources and criteria for rapid assessment of the state of the object based on odd logic // Tech. diagnostics and non-destructive testing. 2003. № 1. P. 14–23.
[18] Bigus G.A., Daniev Yu.F. Technical diagnostics of hazardous production facilities. M.: Nauka, 2010. 415 p.
[19] A.E. Andreykiv, N. V. Lysak Acoustic emission method in the study of destruction processes; Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Phys.-mech. Institute named after G. V. Karpenko. - Kiev: Nauk. dumka, 1989. – 172 p.
[20] Welding. Cutting. Control: Handbook In 2 volumes/ Under the general Editorship of N.P.Aleshin, G.G.Chernyshev. – M.: Mashinostroenie, 2004. T. 1 – 624 p.
[21] Acoustic emission in I-214 poplar wood under compressive loading, Rescalvo, F.J., Morillas, L., Valverde-Palacios, I., Gallego, A., European Journal of Wood and Wood Products, 2020, 78(4), P. 723–732.
[22] Monitoring of the development of delamination in the pressure vessel body during its periodic inspection. / Gomera V. P., Nefedyev E. Yu., Stoyanovskiy L. O. et al. // Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Materials of the 8th International Scientific and Practical Conference / Edited by A. N. Evgrafov and A. A. Popovich. – St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2019. – P. 391-404.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 531.391

М.Ю.Платовских[1], Н. В. Чернышева[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЕ



[1]Платовских Михаил Юрьевич,
Санкт-Петербургский горный университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (8)981-953-8672, E-mail: mplat.63@gmail.com

[2]Чернышева Наталия Вячеславовна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (8)981-771-3236, E-mail: chernat0000@mail.ru

Аннотация

В работе исследуется динамика двухмассовой системы, в которой возможно возникновение фрикционных автоколебаний при действии на одно из тел сил вязко-сухого трения. Определяются параметры, а также области существования и устойчивости различных режимов этих колебаний.

Ключевые слова: фрикционные автоколебания, кубическая характеристика трения, метод усреднения, области притяжения стационарных режимов.

Введение

Целью исследования является определение областей существования и устойчивости различных режимов фрикционных колебаний двухмассовой системы при воздействии вязко-сухого трения. Методика исследования колебаний систем с конечным числом степеней свободы описывается в [1-3, 8]. Постановки аналогичных задач колебаний фрикционных систем ранее рассматривались в работах [4-7, 9, 14, 15]. В результате определен диапазон частот, с которыми могут происходить колебания, возможности регулировки амплитуды колебаний, показана невозможность в этом случае эффекта «динамического гашения» колебаний.

Методы

Будем рассматривать систему двух упругосвязанных тел, одно из которых (I) протягивается через упругий элемент по шероховатой горизонтальной плоскости – точка *A* перемещается со скоростью *V* (рисунок 1).

Уравнения движения системы имеют вид:

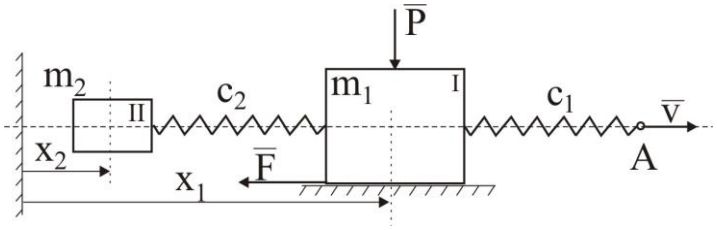


Рис. 1. Схема системы

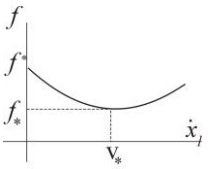


Рис. 2. Характеристика трения

$$m_1\ddot{x}_1 = -c_1(x_1 - Vt) - c_2(x_1 - x_2) - F(\dot{x}_1),$$
$$m_2\ddot{x}_2 = c_2(x_1 - x_2).$$

Считая колебания при проскальзывании безостановочными, зависимость коэффициента трения от скорости скольжения (характеристика трения) массы m_2 $\dot{x}_2$ будем предполагать кубической (рис. 2)

$$F(\dot{x}_1) = f(\dot{x}_1)P = f^*\left(1 - 3\frac{f^* - f_*}{2f^*}\frac{\dot{x}_1}{v_*} + \frac{f^* - f_*}{2f^*}\frac{\dot{x}_1^3}{v_*^3}\right)P.$$

Такой подход часто применяется при рассмотрении колебаний фрикционных систем [2 - 3]. Смысл параметров f^*, f_*, v_* ясен из рис. 2.

Перейдем с помощью замены переменных:

$$x_1 = x_{10} + \tilde{x}_1 - vt,\ x_2 = x_{20} + \tilde{x}_2 - vt$$

к автономной системе:

$$\ddot{\tilde{x}}_1 = -\lambda_1^2\tilde{x}_1 + \lambda^2\tilde{x}_2 - \varepsilon\frac{f^*}{m_1}\tilde{F}(\dot{\tilde{x}}_1),$$
$$\ddot{\tilde{x}}_2 = \lambda_2^2\tilde{x}_1 - \lambda_2^2\tilde{x}_2, \qquad (1)$$

(x_{10}, x_{20} – координаты I-го и II –го тела в положении равновесия, $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ – переменные во времени составляющие координат).

Здесь $\lambda_1^2 = \frac{c_1 + c_2}{m_1}, \lambda_2^2 = \frac{c_2}{m_2}$ - парциальные частоты, $\lambda^2 = \frac{c_2}{m_1}$, $\varepsilon = \frac{f^* - f_*}{2f^*}$ -малый параметр, характеризующий изменение коэффициента трения, $\tilde{F}$ – переменная во времени часть функции трения *F*.

Исследуя устойчивость положения равновесия x_{10}, x_{20} линеаризованной системы, соответствующей (1), несложно получить условие устойчивости:

$$\sigma > 1,$$

где $\sigma = \frac{V}{v_*}$ - безразмерная скорость скольжения. Наоборот, при $\sigma < 1$ ($V < v_*$) положение равновесия неустойчиво и могут возникнуть автоколебания. Таким образом, автоколебания возможны лишь на спадающем участке характеристики трения (рис. 2). Перейдем к нормальным координатам ξ, η с помощью замены:

$$\tilde{x}_1 = u + v, \tilde{x}_2 = n_1 u + n_2 v. \qquad (2)$$

Тогда уравнения (1) примут вид:

$$\begin{aligned} \ddot{u} + \omega_1^2 u &= -\varepsilon \frac{n_2}{n_2 - n_1} \frac{f^*}{m_1} \tilde{F}(\dot{u} + \dot{v}), \\ \ddot{v} + \omega_2^2 v &= \varepsilon \frac{n_1}{n_2 - n_1} \frac{f^*}{m_1} \tilde{F}(\dot{u} + \dot{v}) \end{aligned} \qquad (3)$$

Здесь ω_1, ω_2 - собственные частоты системы $(\omega_1 < \omega_2)$, $n_1 = \frac{-\omega_1^2 + \lambda_1^2}{\lambda^2}, n_2 = \frac{-\omega_2^2 + \lambda_1^2}{\lambda^2}$ - коэффициенты форм $(n_1 > 0, n_2 < 0)$.

Здесь переменная составляющая коэффициента трения

$$\tilde{F} = \left[-3(1 - \sigma^2)\left(\frac{\dot{u} + \dot{v}}{V_*}\right) + 3\sigma\left(\frac{\dot{u} + \dot{v}}{V_*}\right)^2 + \left(\frac{\dot{u} + \dot{v}}{V_*}\right)^3 \right].$$

Рассмотрим случай кратного резонанса $\frac{\omega_2}{\omega_1} \approx p/q$ (p/q - несократимая дробь, $p > q$) и введем малый параметр $\mu \sim \varepsilon$ ($\mu = \varepsilon z$)

$$\mu = 2\frac{q\,\omega_2 - p\,\omega_1}{q\,\omega_2 + p\,\omega_1} << 1 \ . \tag{4}$$

В уравнениях (3) перейдем к безразмерным переменным

$$\tau = \frac{p\omega_1 + q\omega_2}{2}\,t,\ \xi = V_* \frac{2}{p\omega_1 + q\,\omega_2}u, \quad \eta = V_* \frac{2}{p\omega_1 + q\,\omega_2}v \ .$$

Тогда уравнения (3) примут вид

$$\begin{aligned} \xi'' + \frac{1}{p^2}\xi &= \varepsilon\left[\frac{z}{p^2}\xi - \frac{n_2}{n_2 - n_1}\gamma\,\tilde{F}(\xi' + \eta')\right] = \varepsilon\Phi_1 \\ \eta'' + \frac{1}{q^2}\eta &= \varepsilon\left[-\frac{z}{q^2}\eta + \frac{n_1}{n_2 - n_1}\gamma\,\tilde{F}(\xi' + \eta')\right] = \varepsilon\Phi_2 \end{aligned}, \tag{5}$$

где $\tilde{F}(\xi' + \eta') = \left[-3(1-\sigma^2)(\xi' + \eta') + 3\sigma(\xi' + \eta')^2 + (\xi' + \eta')^3\right]$, $\gamma = \frac{p\omega_1 + q\omega_2}{V_*}\frac{Pf^*}{m_1}$.

Применим к уравнениям (5) метод осреднения [8]. Для этого перейдем к новым переменным a, b, φ и ψ, выполняя замену Ван-дер-Поля:

$$\xi = a\cos\varphi,\ \xi' = -\frac{a}{p}\,a\sin\varphi,$$

$$\eta = b\cos\psi,\ \eta' = -\frac{b}{q}\,a\sin\psi.$$

Здесь a, b – медленные переменные (амплитуды), φ, ψ - быстрые (фазы).

Приходим к уравнениям первого приближения [2]:

$$a' = -\varepsilon \Phi_1 \sin\varphi,$$
$$b' = \varepsilon \Phi_2 \sin\psi,$$
$$\varphi' = \frac{1}{p} - \frac{\varepsilon p}{a}\Phi_1 \cos\varphi,$$
$$\psi' = \frac{1}{q} - \frac{\varepsilon q}{b}\Phi_2 \cos\psi.$$

Вместо быстрых переменных φ и ψ введем медленную $\Theta = q\psi - p\varphi$. Из уравнений первого приближения получим уравнения для медленных переменных

$$a' = -\varepsilon \Phi_1 \sin\varphi,$$
$$b' = \varepsilon \Phi_2 \sin\psi,$$
$$\Theta' = \varepsilon\left\{ p^2 \Phi_1 \cos\varphi - q^2 \Phi_2 \cos\left(\psi + \frac{p}{q}\varphi\right)\right\}.$$

Усредним последние уравнения по наибольшему из двух периодов $T_q = 2\pi q$ $(T_q > T_p)$ [10, 11]:

$$\bar{a}' = -\varepsilon \frac{1}{2\pi q} \int_0^{2\pi q} \Phi_1 \sin\varphi \, d\varphi,$$
$$\bar{b}' = \varepsilon \frac{1}{2\pi q} \int_0^{2\pi q} \Phi_2 \sin\left(\frac{\bar{\Theta}}{q} + \frac{p}{q}\varphi\right) d\varphi, \qquad (6)$$
$$\bar{\Theta}' = \varepsilon \frac{1}{2\pi q} \int_0^{2\pi q} \left\{ p^2 \Phi_1 \cos\varphi - q^2 \Phi_2 \cos\left(\frac{\bar{\Theta}}{q} + \frac{p}{q}\varphi\right)\right\} d\varphi.$$

Здесь $\bar{a}, \bar{b}, \bar{\Theta}$ – усредненные медленные переменные.

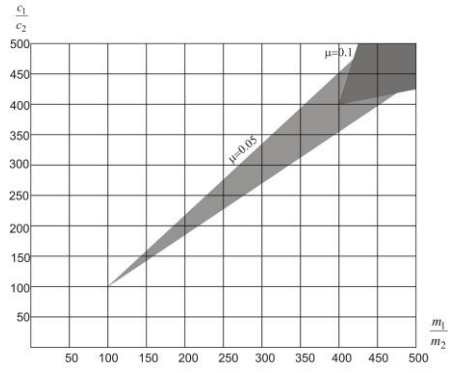


Рис. 3. Области основного резонанса. Внутри закрашенных областей малый параметр μ не превышает значений 0,05 и 0,1 соответственно.

Результаты

Анализ зависимости (4) малого параметра μ от параметров c_1/c_2 и m_1/m_2 позволяет сделать вывод о том, что основной резонанс ($p=q=1$) в рассматриваемой системе реализуется только при достаточно больших соотношениях жесткостей и масс (рис. 3). Исследуем поведение системы

в нерезонансном случае, когда $p/q \neq 1,2,3$,

При этом выполняя в (6) осреднение по быстрой переменной φ, будем иметь уравнения для медленных переменных

$$\begin{aligned} \bar{a}' &= \delta_1\left[a_*^2 - \bar{a}^2 - 2\bar{b}^2\right]\bar{a}, \\ \bar{b}' &= \delta_2\left[a_*^2 - 2\bar{a}^2 - \bar{b}^2\right]\bar{b}\ , \\ \bar{\Theta}' &= 0. \end{aligned} \qquad (7)$$

Здесь $a_* = 2\sqrt{1-\sigma^2}$ - безразмерная амплитуда фрикционных автоколебаний в системе с одной степенью свободы [2], а $\delta_1 = \varepsilon\frac{3}{8}\gamma\frac{n_2}{n_2-n_1} > 0,\ \delta_2 = -\varepsilon\frac{3}{8}\gamma\frac{n_1}{n_2-n_1} > 0$. Заметим, что первые два уравнения (7) совпадают с осредненными уравнениями в нерезонансном случае, когда собственные частоты ω_1, ω_2 существенно различны и осреднение проводится по двум быстрым фазам.

Стационарные режимы (особые точки) системы (7) найдем из уравнений $\bar{a}' = H_1(\bar{a},\bar{b}) = 0,\ \bar{b}' = H_2(\bar{a},\bar{b}) = 0$, ($H_i$ – выражения, стоящие в правых частях уравнений (7)):

1. a_1=0, b_1= a_* ;
2. a_2= a_*, b_2 = 0 ;
3. a_3 =b_3 = $a_*/\sqrt{3}$;
4. a_4=0 , b_4= 0.

Для исследования устойчивости стационарных режимов [2], составим характеристическое уравнение, соответствующее (7)

$$\Delta(\lambda) = \begin{vmatrix} \dfrac{\partial H_1}{\partial \bar{a}}\Big|_{\bar{a}i,\bar{b}i} - \lambda & \dfrac{\partial H_1}{\partial \bar{b}}\Big|_{\bar{a}i,\bar{b}i} \\ \dfrac{\partial H_2}{\partial \bar{a}}\Big|_{\bar{a}i,\bar{b}i} & \dfrac{\partial H_2}{\partial \bar{b}}\Big|_{\bar{a}i,\bar{b}i} - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Для стационарных режимов 1, 2. корни этого уравнения отрицательны и соответствующие им режимы устойчивы (устойчивый узел). Для режимов 3. и 4. корни положительны и особые точки неустойчивы. Принимая во внимание замену переменных (2), можно сказать, что в исходной механической системе реализуются только одночастотные колебания (т.е. обе массы колеблются с одной частотой). То, с какой из двух собственных

частот происходят колебания, определяется областями притяжения режимов 1. и 2. На рисунке 4 эти области построены числено: ниже кривых (практически прямых близких к биссектрисам координатного угла) расположены области реализации режима 2 (колебания с частотой ω_2), выше – режима 1 (колебания с частотой ω_1). Кривые разделяющие области зависят от параметров системы и начальных условий, соответствующему моменту срыва на автоколебания. Размерные амплитуды колебаний II –ой массы будут

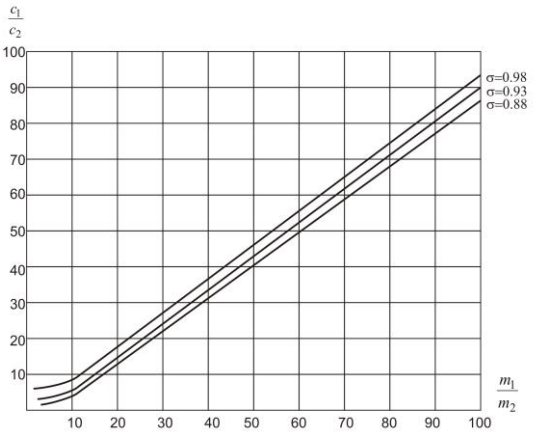


Рис. 4. Границы областей притяжения режимов1 и 2. Выше каждой из кривых реализуется колебательный режим 1, ниже -2.

$$A_1 = 4n_2 \frac{\sqrt{V_*^2 - V^2}}{p\omega_1 + q\omega_2} \text{ - в режиме 1,}$$

$$A_2 = 4n_1 \frac{\sqrt{V_*^2 - V^2}}{p\omega_1 + q\omega_2} \text{ - в режиме 2.}$$

Видно, что в отсутствие демпфирования на второй массе эти амплитуды могут быть неограниченно велики в меру роста величин коэффициентов форм колебаний в зависимости от соотношения жесткостей и масс в системе.

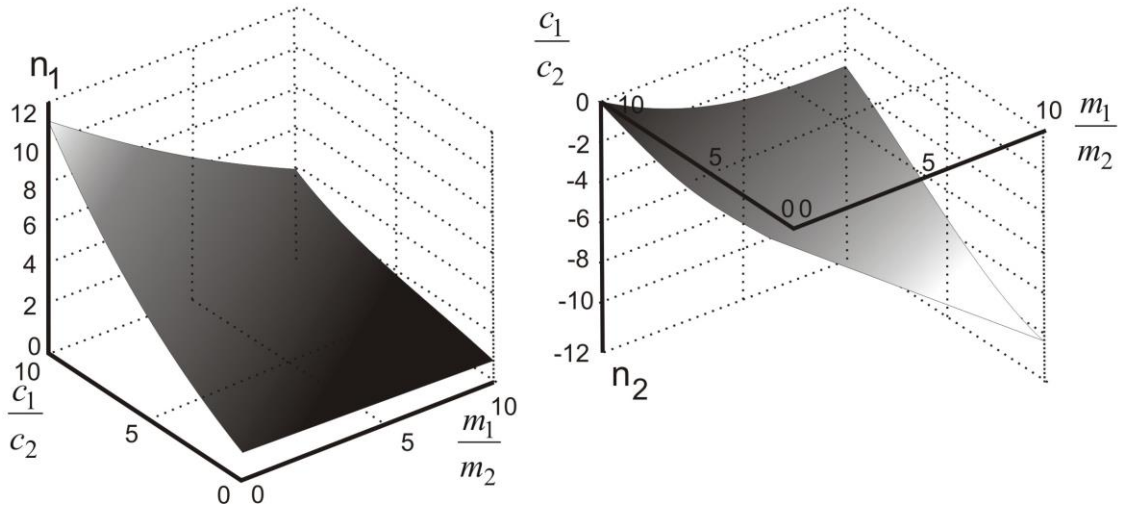


Рис. 5 Зависимости коэффициентов 1-ой (n_1) и 2-ой (n_2) форм колебаний от параметров c_1/c_2 и m_1/m_2 .

Зависимости коэффициентов форм колебаний $n_{1,2}$ от параметров c_1/c_2 и m_1/m_2 приведены на рис. 5.

Анализируя рис. 5, можно сделать вывод, что коэффициенты обеих форм возрастают при уменьшении второй парциальной λ_2 частоты по отношению к первой - λ_1 ($\lambda_1/\lambda_2 = \sqrt{m_1/m_2 \big/ (1+c_1/c_2)}$).

Обсуждение

Проанализирована устойчивость стационарных режимов фрикционных колебаний двухмассовой системы с вязко-сухим трением, выявлены условия возникновения автоколебаний и зависимость амплитуд колебаний от соотношения масс и жесткостей в системе.

Заключение

Как итог работы можно сформулировать следующие выводы:

1. В рассматриваемой двухмассовой системе при действии нелинейной силы трения возможны колебательные режимы только с одной из собственных частот, а не с обеими как это свойственно системам с двумя степенями свободы [12, 13].
2. Выбором соотношения инерционно-жесткостных характеристик системы можно добиться заданных амплитуд колебаний тела II, свободного от трения.
3. Ни при каком выборе инерционно-жесткостных характеристик системы не удается “погасить” колебания I –ой массы (невозможность проявления в рассматриваемой системе известного эффекта динамического гашения [12, 13]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. - М., Либроком, 2016. 360 с.
[2] Agnilar L., Boiko I., Fridman L., Iriatre R. Self-oscillations in dynamic systems. Springer Series: System control. Foundations & Applications, 2019. Pp. 110-115.
[3] Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва-Ижевск: ИКИ, 2012. -561 с.

[4] Мельников Б.Е., Платовских М.Ю., Чернышева Н.В., Суворов В.А. Влияние двусвязности колебаний на поглощающую способность амортизирующих креплений. Современное машиностроение: Наука и образование. 2021. С. 300-311.
[5] Platovskikh, M.J.,Yungmeister, D.A., Chernysheva, N.V. Study of the effectiveness of the vibro-impact system “piston-striker-shank” in the construction of pneumatic and hydraulic hammers for the subway driving complexes. 2016. Procedia Engineering, 165. P. 1254-1260.
[6] Vetukov, M.M., Platovskikh, M.J., Chernysheva, N.V. Frictional self-oscillations of the one-two degree of freedom systems. 2019. Journal of Physics: Conferences series, 1236, p. 012064.
[7] Evgrafov, A.N., Petrov, G.N., Evgrafov, S.A. Consideration of Friction in Linkage Mechanisms. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020. Pp.75 -82. DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_8.
[8] Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкостей. М.:, ЁЁ Медиа, 2012, 308 с.
[9] Maiti S., Roy J., Mallik A.K., Bhattacharjee J. Nonlinear dynamics of a rotating double-pendulum. Physics Letters, 2015. 380 (3), pp. 408-412.
[10] Кондрашов Р.Е., Морозов А. Д. К исследованию резонансов в системе двух уравнений Дюффинга–Ван дер Поля. Нелинейная динамика. – т. 6, №. 2, 2010. С. 241-254.
[11] Кондрашов Р.Е. К теории резонанса в системах с двумя степенями свободы, близких к нелинейным интегрируемым. Автореф. на соиск. степ. к.-ф.м.н., изд. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, 21с.
[12] Юник Е.К. Автоколебания в глубоком бурении. URSS. 2013. 264 с.
[13] Тывес Л.И. Динамика виброударных моделей механизмов и рабочих процессов: Точные методы нелинейной механики. Метод припасовывания. М.: ЛЕНА НД. 2015. 120 с.
[14] Vulfson, I.I. Optimization of Parameters of Cyclic Machines when Crossing Resonance Zones. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. Pp.231-246.
[15] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. Springer, June 2020. Pp. 163-172

M.J.Platovskikh[1], N.V. Chernysheva[2]

EFFECT OF DOUBLE CONNECTIVITY OF OSCILLATIONS ON ABSORPTIVE CAPACITY OF AMORTIZING FASTENERS

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

Abstract

The work considers modeling of the damping fastening system using a system with one and two degrees of freedom. The results showed that introducing an additional degree of freedom allows you to obtain smaller values of the dynamic coefficient.

Key words: oscillation eigenfrequencies, oscillation connectivity, dynamic coefficient

REFERENCES

[1] Landa, P.S. Self-oscillations in the systems with finite number of degree of freedom. M.: Librocom. 2016. 360 p. (rus.)
[2] Agnilar L., Boiko I., Fridman L., Iriatre R. Self-oscillations in dynamic systems. Springer Series: System control. Foundations & Applications, 2019. Pp. 110-115.
[3] Hukenheimer G., Holms F. Nonlinear oscillations, dynamic systems and bifurcations of vector field. Moscow – Igevsk IKI, 2012. - 561 p. (rus.)
[4] Melnikov B.E., Platovskikh M.J., Chernysheva N.V., Suvorov V.A. Effect of double connectivity of oscillations on absorptive capacity of amortizing fasteners. Modern mechanical engineering: Science and education. 2021. pp. 300-311. (rus.)
[5] Platovskikh, M.J.,Yungmeister, D.A., Chernysheva, N.V. Study of the effectiveness of the vibro-impact system “piston-striker-shank” in the construction of pneumatic and hydraulic hammers for the subway driving complexes. 2016. Procedia Engineering, 165. P. 1254-1260.
[6] Vetukov, M.M., Platovskikh, M.J., Chernysheva, N.V. Frictional self-oscillations of the one-two degree of freedom systems. 2019. Journal of Physics: Conferences series, 1236, p. 012064.
[7] Evgrafov, A.N., Petrov, G.N., Evgrafov, S.A. Consideration of Friction in Linkage Mechanisms. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2020. Pp.75 -82. DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_8.
[8] Van Dyke, M. Methods of disturbances in fluid mechanics. M.:EE Media. 2012, 308 p. (rus.)
[9] Maiti S., Roy J., Mallik A.K., Bhattacharjee J. Nonlinear dynamics of a rotating double-pendulum. Physics Letters, 2015. 380 (3), pp. 408-412.
[10] Kondrashov R.A., Morozov A.D. On resonance analysis in system of two Duffing – Van der Pol equations. Nonlinear dynamics. v. 6, №. 2, 2010. pp. 241-254. (rus.)

[11] Kondrashov R.A. On the resonance theory in two degree freedom systems congenial to nonlinear integrable systems. Extended abstract of Cand. Sci. dissertation. Nigegorod Lobachevskyi University Press, 2012. 20 p. (rus.)
[12] Unik E.K. Self-oscillations in deep-drilling. URSS. 2013. 264 p. (rus.)
[13] Tyves L.I. Dynamics of the vibro-impact simulations of machines and work processes. Exact methods of the nonlinear mechanics. The alignment method. M.: LENA ND, 2015. 120 p. (rus)
[14] Vulfson, I.I. Optimization of Parameters of Cyclic Machines when Crossing Resonance Zones. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021. Pp.231-246.
[15] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. Springer, June 2020. Pp. 163-172

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

И.С. Сюндюков[1], А.Ю. Рябикин[2], Г.В. Иванова[3], М.А. Скотникова[4]

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

[1] Ильнур Салаватович Сюндюков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (911)131-5655, E-mail: ilnursyundyukov@gmail.com

[2] Алексей Юрьевич Рябикин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (952)358-6974, E-mail: ryabikin-98@mail.ru

[3] Галина Валерьевна Иванова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)552-6429, E-mail: galura@yandex.ru

[4] Ильнур Маргарита Александровна Скотникова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)552-6429, E-mail: skotnikova@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы повышения износостойкости коленчатых валов методом плазменного напыления покрытий частицами порошка ПН85Ю15 до и после ультразвуковой обработки (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт. Результаты показали, что наилучшие триботехнические свойства и минимальная шероховатость достигаются при формировании покрытия с УЗО 200 Вт.

Ключевые слова: плазменное напыление, ультразвуковая обработка, фазовый анализ, распределение легирующих элементов, морфология

структуры покрытия, триботехнические испытания.

Введение

Коленчатый вал, является важной деталью двигателя внутреннего сгорания автомобиля, при эксплуатации которого, основным дефектом, приводящим к потере работоспособности вала, является износ коренных и шатунных шеек [1-3].

Метод плазменного распыления порошковых (проволочных) материалов при одновременном применении послойной УЗО оказывается наиболее эффективным для восстановления и повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей, работающих в узлах трения скольжения, выполненных из сталей [4-7].

Акустическая система ультразвуковой установки состоит из, волноводных звеньев, рабочего органа – индентора и магнитострикционного преобразователя, который служит для превращения электрической энергии в механическую за счет магнитострикции, суть которой заключается в том, что детали из сильно магнитных (ферромагнитных) материалов (например, никеля, железа) при намагничивании изменяют свои размеры и форму (деформируются) за счет синхронного поворота в них магнитных доменов [8-15].

Методы и материалы

В данной работе применяли метод плазменного напыления порошка, совмещенного с послойной УЗО мощностью 200 и 400 Вт. На поверхность образцов из стали 45 напыляли порошок на основе никеля ПН85Ю15 (84%Ni, 15%Al, 0.2%Fe), обладающий хорошими магнитострикционными и механическими свойствами. Схема процесса напыления покрытия представлена на рисунке 1.

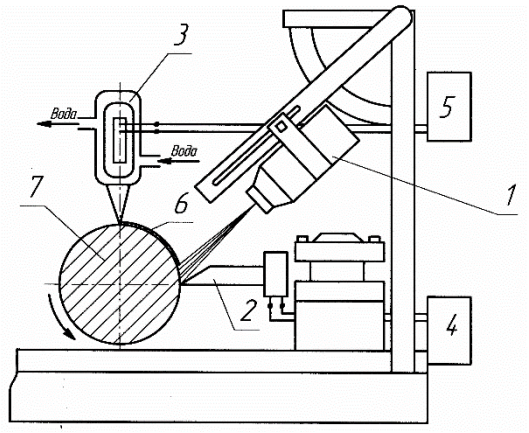


Рис. 1. Схема процесса напыления с послойной УЗО: 1 – плазмотрон; 2 – индентор; 3 – ультразвуковая головка; 4,5 – ультразвуковой генератор; 6 – напылённое покрытие; 7 – деталь

Рабочие характеристики плазматрона (1): напряжение 320 В; скорость струи 800 м/с; плазмообразующий газ – аргон; скорость вращения кольца 40 об/мин. Расплавленные в плазменной струе частицы, наносились на деталь (7), где они слой за слоем прижимались индентором (2) под нагрузкой от 5 до 10 кг до их застывания. УЗО производилась на установке УЗГ-10 (мощность – 10 кВт, частота – 22 кГц, амплитуда – 10-20 А.

Триботехнические испытания без смазки трибопар «покрытие - чугун» проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «Ролик – Ролик». Частота вращения нижнего ролика 300 об/мин, нагрузка на неподвижный верхний ролик 25 кгс, время испытания 20 мин. Результаты оценивали на основании трехкратных измерений. Определялись следующие характеристики: момент и коэффициент трения, линейный износ и параметры шероховатости образцов с помощью Профилограф-профилометра Mahr Surf PS-1.

Рентгеноструктурный анализ фазового состава покрытий проводили на дифрактометре "Rotaflex" с использованием электронной картотеки JCPDS.

Микрорентгеноспектральный анализ (исследование распределения легирующих элементов в покрытии) осуществляли на микроанализаторе «Camebax micro», оснащенном энергодисперсионным спектрометром «INCA ENERGY 350», при энергии электронов зонда 15 кэВ. Локальность определения 0,3 мкм.

Остаточные напряжения измеряли с помощью резистивного электроконтактного метода неразрушающего контроля на приборе СИТОН-ТЕСТ. Точность определения глубины залегания остаточных напряжений составляла ±1 мкм, погрешность определения остаточных напряжений составляла 20 МПа.

Металлографические исследования при увеличении от х100 до х1000 крат проводились при помощи микровизора отраженного света μVizo-MET, микроскопа серии IM7000 MEIJI TECHNO, со встроенным Анализатором изображений Thixomet.

Результаты

Металлографические и профилометрические исследования структуры покрытий.

Как показали металлографические исследования структуры покрытий, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, до (рис. 2, а, б), и после (рис. 2, в-з), совмещенной с послойной ультразвуковой обработкой (УЗО) мощностью 200 и 400 Вт, близи пятна напыления без УЗО, формируется рыхлое и адгезионно нестойкое покрытие толщиной ~ 116 мкм из крупных расплавленных частицы размером от 190 до 1100 мкм.

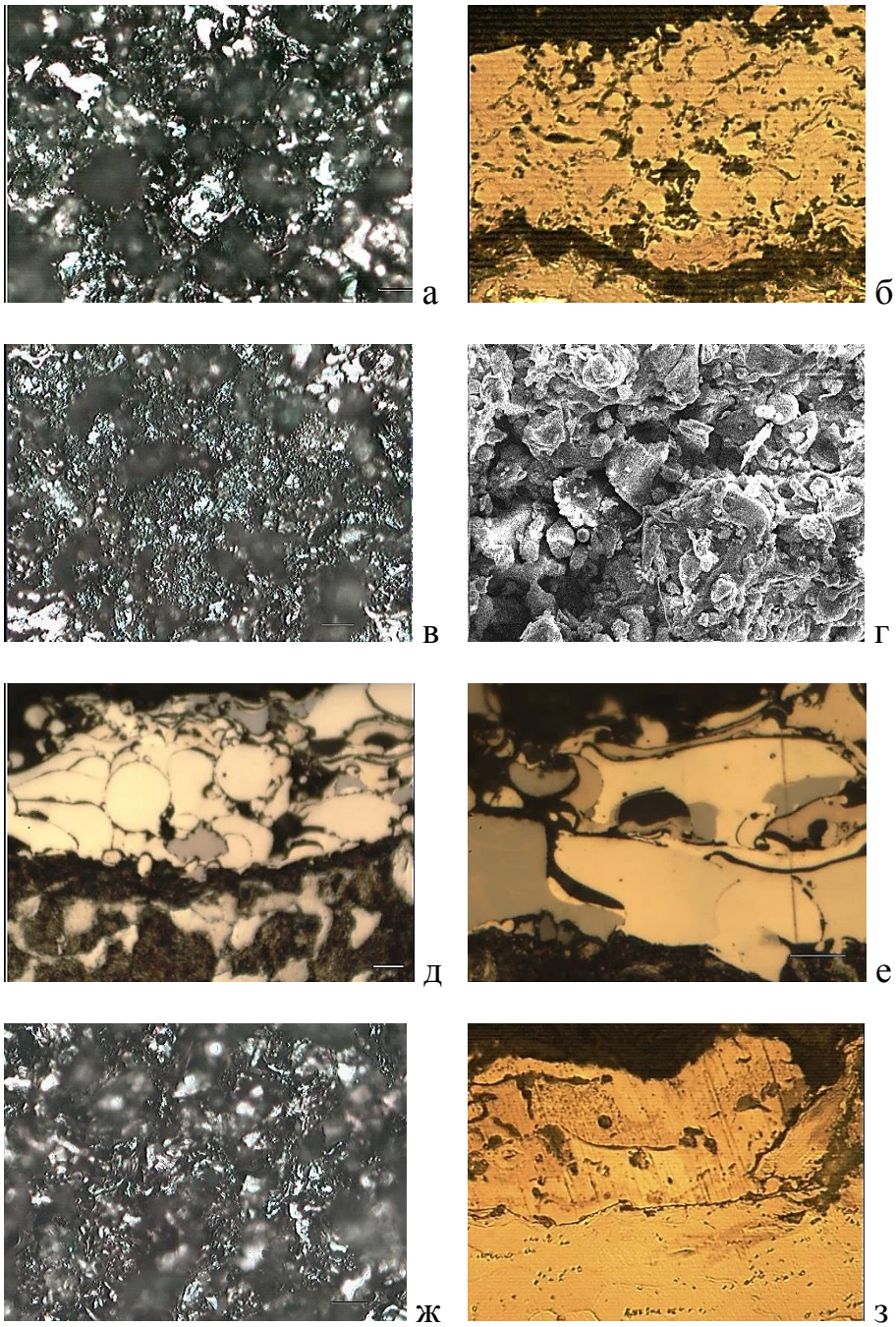


Рис. 2. Металлографические изображения структуры покрытий ПН85Ю15 в поверхностном слое образцов из стали 45 (а, в, г, ж) и на их поперечных сечениях (б, д, е, з), без УЗО (а, б) и с УЗО мощностью 200 Вт (в, г, д, е), 400 Вт (ж, з). х 200 (а, в, ж); х 400 (б); х 500 (д); х 1010 (г, е, з)

Покрытие из ферромагнитного порошка, совмещенное с послойной УЗО мощностью 200 Вт (рис. 2, в, г, д, е) толщиной ~ 82 мкм имело хорошее сцепление с металлом основы, сталью 45 и было сформировано из двух видов частиц, вероятно, с разным температурным интервалом их формирования: крупных со средним размером 800 мкм и мелких частиц

размером 0,5…10 мкм, которые заполняли неровные участки (рис. 2, в, г, д). При этом уменьшалась рыхлость поверхности.

С увеличением мощности послойной УЗО до 400 Вт, крупные расплавленные частицы размером от 180 до 970 мкм формировали покрытие (рис. 2, ж, з) толщиной ~ 46 мкм, которое имело хорошее сцепление с металлом основы.

Результаты, полученные с помощью оптической и электронной микроскопии, полностью согласовались с профилометрическими исследованиями структуры поверхностей покрытий (см. табл.1).

Таблица 1. Параметры шероховатости покрытий

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Ra	Rz	Rq
ПН85Ю15	Без УЗО	6.672	30.837	8.125
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	4/333	23.054	5.670
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	5.692	23.513	6.730

Параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля Ra; высота неровностей профиля по десяти точкам Rz; среднее квадратическое отклонение профиля Rq подтвердили относительное уменьшение шероховатость поверхности покрытия из ферромагнитного порошка, совмещенного с послойной УЗО мощностью 200 Вт.

На основании полученных результатов, можно заключить, что покрытия, полученные методом плазменного напыления ферромагнитного порошка, совмещенного с послойной УЗО, по сравнению с покрытием без УЗО, обладает более высоким сцеплением с металлом основы и достаточную пористость, которая при работе со смазкой, обеспечит коленчатому валу повышенную смазочную способность.

Кроме того, в покрытиях, полученных методом послойной УЗО мощностью 200 Вт, формируется двухкомпонентная структура из двух типов гранул – крупных (~800 мкм) и мелких (~4 мкм), которые заполняют несплошности поверхности и обеспечит коленчатому валу не только повышенную смазочную способность, но и адгезионную прочность.

3.2 Рентгеноструктурные исследования фаз и внутренних напряжений покрытий.

Как показали рентгеноструктурные исследования фазового состава покрытий, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, без УЗО (рис. 3, а), наблюдали наличие на поверхности стали 45 соединения на основе никеля Ni_3Al [6, 14, 15]. После

ультразвуковой обработки в покрытиях была обнаружена вторая фаза Fe_2Al_5 (рис. 3, b). При этом, дифракционные линии соединения Ni_3Al на основе никеля были значительно уширены, что свидетельствует о появлении в покрытии значительных внутренних напряжений.

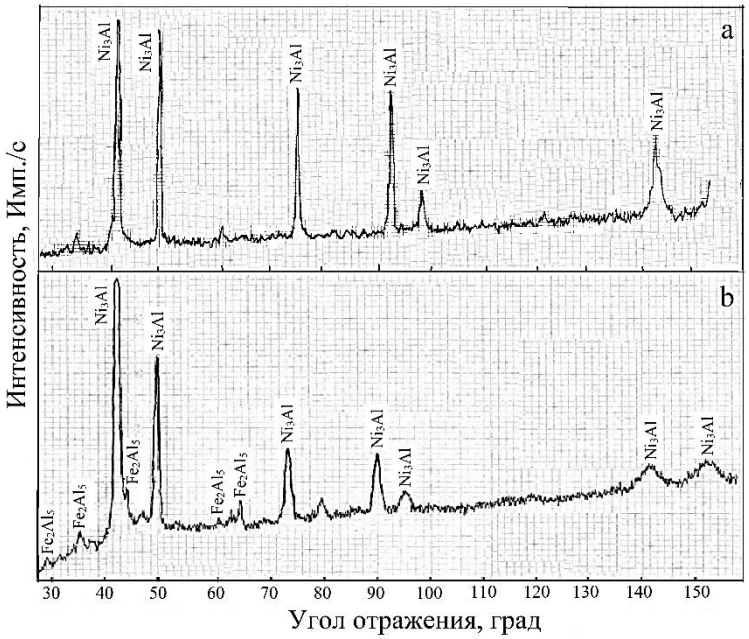


Рис. 3. Результаты рентгеноструктурного анализа материала покрытия ПН85Ю15: a) до; b) после послойной ультразвуковой обработки мощностью 200 Вт.

Как показали результаты измерения остаточных напряжений с помощью прибора СИТОН-ТЕСТ (рис. 4), покрытия, полученные методом плазменного напыления, совмещенного с послойной УЗО, по сравнению с покрытием без УЗО, обладали значительными

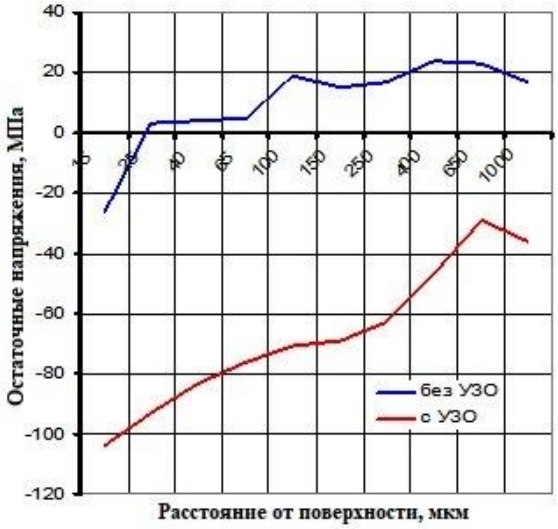


Рис. 4. Сравнительные диаграммы растягивающих и сжимающих остаточных напряжений покрытий, напыленных до и после УЗО.

благоприятными напряжениями сжатия. Это может способствовать не

только к упрочнению поверхности, но и к повышению адгезионной прочности и износостойкости покрытия.

3.3 Микрорентгеноспектральные исследования распределения химических элементов в покрытиях.

Микрорентгеноспектральные исследования распределения химических элементов (Ni, Al, Fe) в покрытиях, нанесенных на образцы из стали 45 методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, показали, что без УЗО (рис. 5, а, б), формировалось рыхлое и адгезионно нестойкое покрытие толщиной ~ 120 мкм. Железо из стали 45, а никель с алюминием из покрытия взаимно диффундировали навстречу друг другу, формируя переходный слой, который может отвечать за адгезионную прочность покрытия. Как видно из рисунка 5, б, на расстоянии от поверхности ~100 мкм, в покрытии происходило резкое снижение содержания всех элементов, что приводило к падению прочности и формированию пограничной трещины.

В покрытиях, нанесенных методом плазменного напыления порошка ПН85Ю15, совмещенным с УЗО мощностью 400 Вт (рис. 5, д, ж), граница резкого снижения содержания Ni, Al и одновременного перехода из стали 45 элемента Fe, оказалась на расстоянии от поверхности ~30 мкм.

В покрытиях, нанесенных методом плазменного напыления, совмещенным с УЗО мощностью 200 Вт (рис. 5, в, г) в приграничной зоне, на расстоянии от поверхности ~60 мкм, происходило резкое снижение содержания Ni, Al и одновременный переход из стали 45 элементов Fe и Cr, что обеспечивало покрытию хорошее сцепление с металлом основы.

Следует отметить, что уменьшение содержания элемента Al в покрытиях, полученных с применением УЗО, согласуется с полученными результатами об изменении фазового состава и формировании мелких (~7 мкм) частиц Fe_2Al_5, которые заполняли неровные участки (рис. 5, в). При этом уменьшалась рыхлость поверхности.

3.4 Триботехнические исследования покрытий.

На рисунке 6 представлены сводные графики изменения во времени коэффициента трения при испытании на износ, без смазки, пар трения «покрытие – чугун» до и после послойной УЗО мощностью 200 и 400 Вт.

Нагрузку схватывания определяли по скачку момента трения, для чего через каждые 15 мин нагрузку увеличивали на 25 кгс в диапазоне до 400 кгс.

Результаты триботехнических испытаний на износостойкость и нагрузку схватывания позволили заключить, что послойная УЗО материала покрытия ПН85Ю15, по сравнению с без УЗО, привела к снижению в 3 раза коэффициента трения (с 0,55 до 0,16), в 2 раза линейного износа (с 4,2 до

1,8) мкм и к повышению в 2 раза нагрузки схватывания от 150 до 300 кгс (см. табл.2).

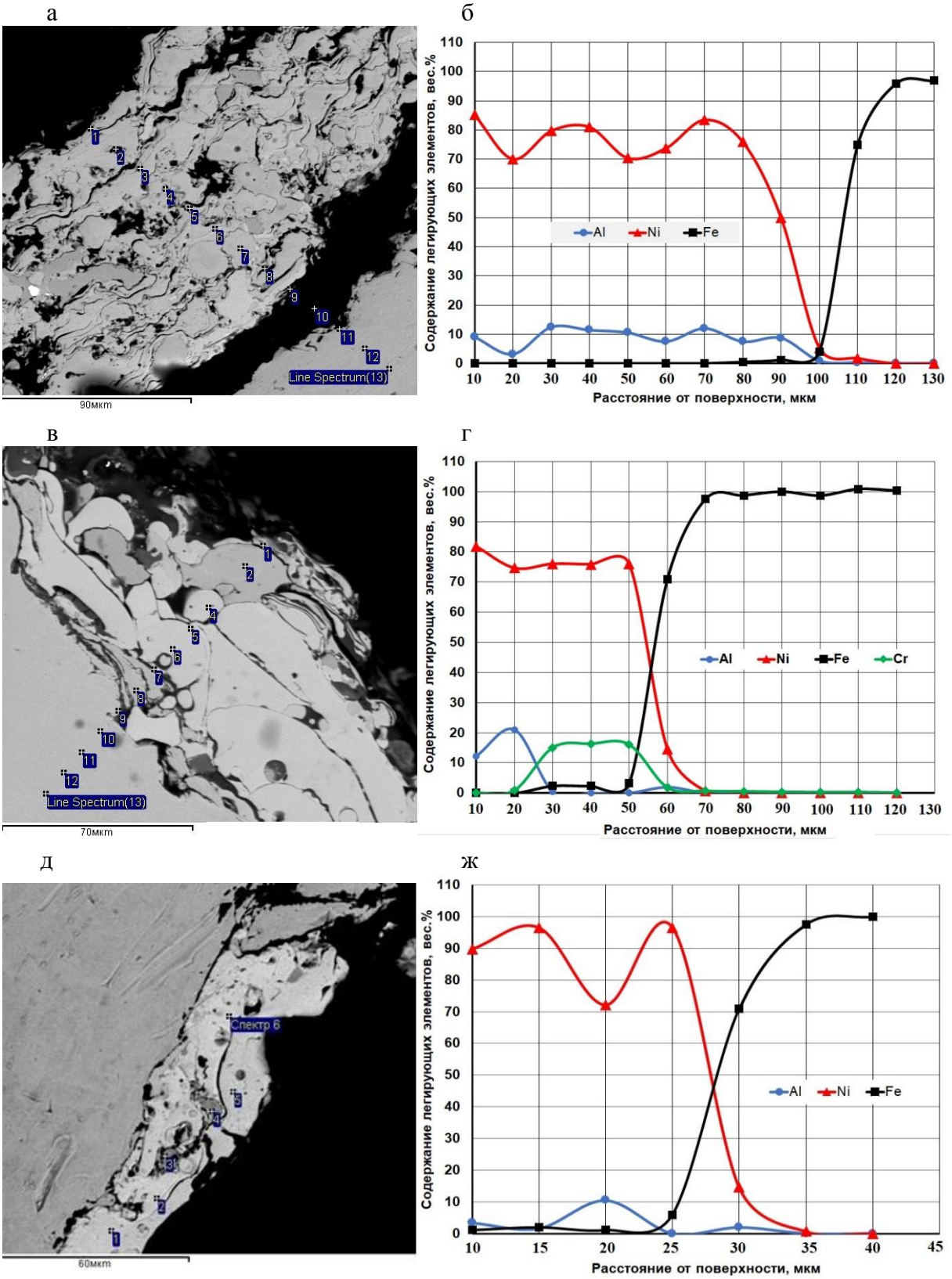


Рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа материала покрытия ПН85Ю15: (а, б) до; и после УЗО мощностью (в, г) 200 Вт; (д, ж) 400 Вт

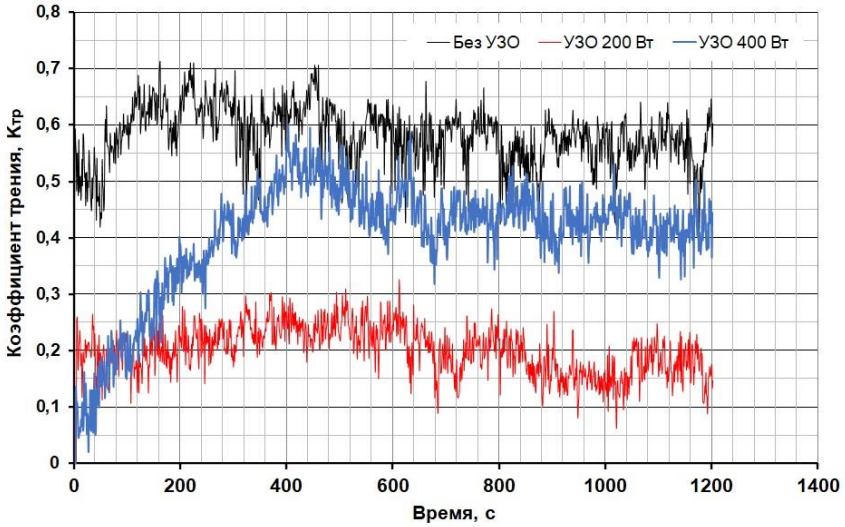


Рис. 6. Результаты изменения во времени коэффициента трения при испытании на износ покрытий ПН85Ю15: до и после послойной УЗО мощностью 200 Вт и 400 Вт

Таблица 2. Влияние УЗО на триботехнические свойства покрытия.

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Коэффициент трения, Ктр	Линейный износ, мкм	Нагрузка схватывания, кгс
ПН85Ю15	Без УЗО	0,55	4,2	150
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	0,16	1,8	300
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	0,41	2,8	300

На рисунке 7 и в таблице 3 представлены результаты массового износа ролика с покрытием, полученного до и после послойной УЗО мощностью 200 и 400 Вт.

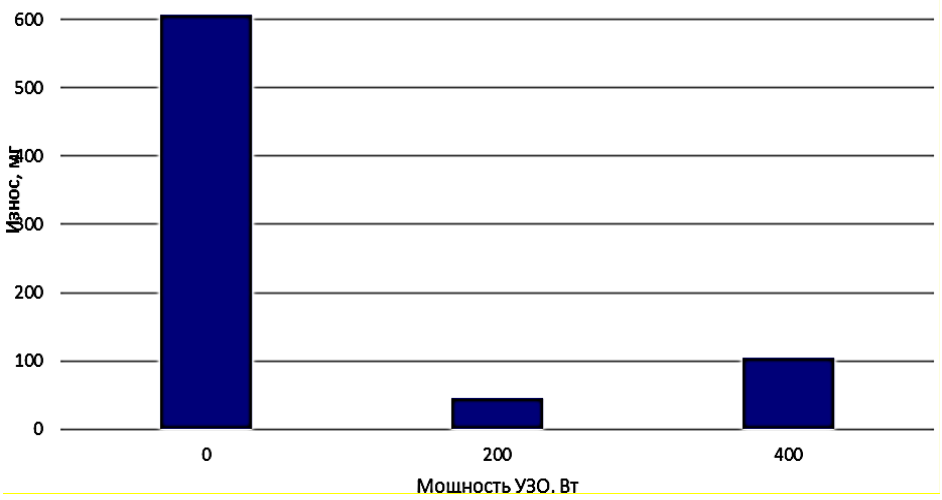


Рис. 7. Массовый износ ролика после испытаний при нагрузке 10 кгс: до и после послойной УЗО мощностью 200 и 400 Вт

Таблица 3. Массовый износ ролика после испытаний пар трения

Марка покрытия	Режим напыления покрытия с УЗО	Весовой износ, мг	Коэффициент трения, Ктр
ПН85Ю15	Без УЗО	605,67	0,61
ПН85Ю15	УЗО 200 Вт	44,67	0,35
ПН85Ю15	УЗО 400 Вт	104,67	0,47

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно заключить, что плазменное напыление порошка ПН85Ю15 с послойной УЗО, по сравнению с покрытием без УЗО, приводит к увеличению износостойкости поверхности. Такое покрытие рекомендуется для напыления на изношенные коренные и шатунные шейки коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автомобилей.

Обсуждение

Характерной особенностью ультразвука является то, что, в отличие от тепловой, акустическая энергия активирует физико-химические процессы и поглощается границами зёрен, фаз и переходного слоя между покрытием и подложкой.

При намагничивании покрытий из ферромагнитных материалов (например, никеля, железа) магнитные моменты доменов приобретают преимущественное ориентирование в направлении внешнего магнитного поля и материал покрытия еще до затвердевания (кристаллизации) деформируется (расширяется или сжимается). Возможно, магнитострикционная деформация частиц жидкой фазы снижает температуру кристаллизации ультрамелких частиц сверхтвердых фаз Fe_2Al_5. Согласно равновесной диаграмме Fe-Al [8], при эвтектической температуре 654 °С растворимость железа в алюминии незначительна (0,03 ат. %), а растворимость алюминия в железе в 600 раз выше и составляет примерно 32 %.

Как показано на рис. 5. г, ж после послойной УЗО мощностью 200 и 400 Вт, в отличии от покрытия без УЗО, железо из стали 45, а алюминий из покрытия взаимно диффундируют навстречу друг другу, формируя переходный слой, в котором алюминий растворяется в железе до образования ультрамелких частиц Fe_2Al_5 (71 ат.% Al).

При комнатной температуре частицы интерметаллидной фазы Fe_2Al_5 обладают высокой твердостью 11,5 ГПа. Появление таких частиц в поверхностном слое, объясняет высокую износостойкость покрытия после послойной УЗО мощностью 200 Вт.

Следует отметить, что после послойной УЗО мощностью 200 Вт, в переходном слое покрытия, в котором алюминий растворяется в железе и формируются частицы Fe_2Al_5, из стали 45 туда диффундирует хром с максимальной концентрацией 16,35% (см. рис. 5. г), что потенциально должно повышать стойкость такого покрытия к коррозии.

Заключение.

Покрытия, полученные методом плазменного напыления ферромагнитного порошка ПН85Ю15, совмещенного с послойной УЗО мощностью 200 Вт, по сравнению с покрытием без УЗО, обладают:

- более высоким сцеплением с металлом основы и достаточной пористостью, которая при работе со смазкой, обеспечит коленчатому валу повышенную смазочную способность;
- двухкомпонентной структурой гранул – крупных (~800 мкм) и мелких (~4 мкм), которые заполняют несплошности поверхности и уменьшают шероховатость покрытия;
- структурно - фазовыми превращениями с образованием частиц ультрамелких сверхтвердых интерметаллидных фаз Fe_2Al_5;
- формированием благоприятных сжимающих остаточных напряжений;
- улучшением триботехнических свойств – уменьшением линейного износа в 2 раза (с 4,2 до 1,8) мкм и коэффициента трения в 3 раза (с 0,55 до 0,16), повышением нагрузки схватывания в 2 раза (с 150 до 300) кгс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Шабанов А.Ю., Галышев Ю.В., Сидоров А.А. и др. Исследование эффективности восстановления технико-экономических показателей изношенного двигателя *с* помощью триботехнических составов. Современное машиностроение: Наука и образование. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, № 5, 2016. – с.583-596.

[2] Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 163-172.

[3] Kuznetsov R.A., Kuznetsov P.A. A new way of manufacturing bimetal products on the basis of the technology of casting with crystallization under pressure. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119–127.

[4] Hmelevskaja V. B. Increasing the wear resistance of plasma coatings by the method of layer-by-layer surface hardening: Monograph. Vladivostok: 2006. 280 p.

[5] Hsiao W.T., Sua C.Y., Huang T.S. and others. The microstructural characteristics and mechanical properties of Ni-Al/h-BN coatings deposited using plasma spraying // J. of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509. P. 8239−8245.
[6] Javadi M.M., Edris H., Salehi M. Plasma sprayed NiAl intermetallic coating produced with mechanically alloyed powder // J. Mater. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 27, pp. 816−820.
[7] Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15 // Materials Today: Proceedings. – 2020. – 30, pp. 650-655.
[8] Алтунин Р.Р., Моисеенко Е.Т., С.М. Жарков Структурные фазовые превращения при твердофазной реакции в двухслойной тонкопленочной наносистеме Al/Fe Журнал технической физики · Физика твердого тела, 2020, том 62, вып. 1 с. 158- 163.
[9] Hsiao W.T., Sub C.Y., Huang T.S. and others. Wear resistance and microstructural properties of Ni-Al/hBN/WC-Co coatings deposited using plasma spraying // Materials Characterization. 2013. Vol. 79. P. 84−92.
[10] Kornienko E., Lapushkina E., Kuzmin V. and others. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials // J. of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 567, No. 1. P. 012010-1−012010-7.
[11] Kornienko E., Smirnov A., Kuzmin V. Structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma spraying // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 405−410.
[12] Gulyaev I.P., Dolmatov A.V., Kharlamov M.Yu. and others. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology // J. of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24, No. 8. P. 1566−1573.
[13] Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Popov A.A. and others. Localization of plastic deformation HCP — crystals during indentation and scratching (2018) Lecture Notes in Mechanical Engineering, Part F5, pp. 143-150.
[14] Корниенко Е.Е., Муль Д.О., Рубцова О.А., и др. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из Ni_3Al. Теплофизика и аэромеханика, 2016, том 23, № 6. С.957-966.
[15] Sampath S., Jiang X.Y., Matejicek J. and others. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: an integrated study for Ni–5 wt. % Al bond coats // Materials Sci. and Engng. 2004. Vol. A364. P. 216−231.

I.S. Syundyukov, A.Y. Ryabikin, G.V. Ivanova, M.A. Skotnikova

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF CRANKSHAFTS BY PLASMA SPRAYING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article considers the issues of increasing the wear resistance of crankshafts by plasma spraying of coatings with PN85Y15 powder particles before and after ultrasonic treatment (RCD) with a power of 200 and 400 watts. The results showed that the best tribotechnical properties and minimum roughness are achieved when forming a coating with a 200 W RCD.

Key words: plasma spraying, ultrasonic treatment, phase analysis, distribution of alloying elements, morphology of the coating structure, tribotechnical properties.

REFERENCES

[1] Shabanov A.Yu., Malyshev Yu.V., Sidorov A.A. and others. Investigation of the effectiveness of restoring technical and economic indicators of a worn-out engine using tribotechnical compositions. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, No. 5, 2016. – pp. 583-596.

[2] Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 163-172.

[3] Kuznetsov, R.A., Kuznetsov, P.A. A new way of manufacturing bimetal products on the basis of the technology of casting with crystallization under pressure. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119–127.

[4] Hmelevskaja V. B. Increasing the wear resistance of plasma coatings by the method of layer-by-layer surface hardening: Monograph. Vladivostok: 2006. 280 p.

[5] Hsiao W.T., Sua C.Y., Huang T.S. and others. The microstructural characteristics and mechanical properties of Ni-Al/h-BN coatings deposited using plasma spraying // J. of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509. P. 8239−8245.

[6] Javadi M.M., Edris H., Salehi M. Plasma sprayed NiAl intermetallic coating produced with mechanically alloyed powder // J. Mater. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 27, pp. 816−820.

[7] Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of

powder PN85Y15 // Materials Today: Proceedings. – 2020. – 30, pp. 650-655.
[8] Altunin R.R., Moiseenko E.T., Zharkov S.M. Structural phase transformations during a solid-phase reaction in a two-layer thin-film nanosystem Al/Fe Journal of Technical Physics · Solid State Physics, 2020, Vol. 62, № 1 pp. 158- 163.
[9] Hsiao W.T., Sub C.Y., Huang T.S., Liao W.H. Wear resistance and microstructural properties of Ni-Al/hBN/WC-Co coatings deposited using plasma spraying // Materials Characterization. 2013. Vol. 79. P. 84−92.
[10] Kornienko E., Lapushkina E., Kuzmin V. and others. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials // J. of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 567, No. 1. P. 012010-1−012010-7.
[11] Kornienko E., Smirnov A., Kuzmin V. Structure and properties of self-fluxing coating, obtained by air-plasma spraying // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 698. P. 405−410.
[12] Gulyaev I.P., Dolmatov A.V., Kharlamov M.Yu. and others. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology // J. of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24, No. 8. P. 1566−1573.
[13] Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Popov A.A. and others. Localization of plastic deformation HCP — crystals during indentation and scratching (2018) Lecture Notes in Mechanical Engineering, PartF5, pp. 143-150.
[14] Kornienko E.E., Mul D.O., Rubtsova O.A. and others. The effect of plasma spraying modes on the structure and properties of Ni3Al coatings. Thermophysics and Aeromechanics, 2016, Vol. 23, No. 6. pp.957-966.
[15] Sampath S., Jiang X.Y., Matejicek J. and others. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: an integrated study for Ni–5 wt. % Al bond coats // Materials Sci. and Engng. 2004. Vol. A364. P. 216−231.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 539.3:534.1

Г. В. Филиппенко[1], Т. В. Зиновьева[2]

НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГАЗОПРОВОДА, ОСЛАБЛЕННОГО ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИЕЙ, НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОЙ ОБОЛОЧКИ

[1]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
Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, Санкт-Петербург, E-mail: g.filippenko@spbu.ru

[2]Татьяна Владимировна Зиновьева, к.т.н., с.н.с.,
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)321-4770, E-mail: tatiana.zinovieva@gmail.com

Аннотация

Актуальной проблемой современной промышленности является водородная коррозия труб магистрального газопровода. Возникает необходимость оценки прочности и ресурса ослабленных водородом труб. Проведен расчет свободных колебаний такой трубы с учетом деградации материала. Труба моделируется слоистой оболочкой по классической теории Кирхгофа-Лява, влияние ослабленного водородом слоя учитывается при расчете жесткостей оболочки. Найденные собственные частоты трубы хорошо коррелируют со значениями, полученными методом конечных элементов. Дополнительный учет смещения нейтральной линии оболочки, обусловленный разницей жесткостей ее слоев, позволил улучшить точность найденных частот.

Ключевые слова: водородная коррозия, слоистая оболочка, колебания оболочек.

Введение

Основным средством передачи природного газа из районов добычи на значительные расстояния является магистральный газопровод. Содержащийся в газе сероводород провоцирует коррозию труб и оборудования, которые зачастую не выдерживают этого испытания.

Влиянию водорода на металлы посвящено много исследований, известно, что под растягивающей нагрузкой значительно ухудшаются их механические свойства [1 – 5]. В некоторых работах отмечается незначительное изменение модуля упругости образцов после наводороживания [6], в других – весьма существенное. Исследования [7, 8] показали, что модуль упругости никелевой нержавеющей стали, широко используемой для изготовления морских трубопроводов, уменьшается на 15 – 22% после зарядки ее водородом, что может привести к преждевременному износу трубопроводов и авариям, например, вследствие выхода на опасные режимы колебаний [9 – 11].

Отрицательное воздействие водорода на прочность труб приводит к необходимости его учета при проектировании и расчете трубопроводов. Важной остается проблема оценки долговечности конструкций, подвергающихся водородной коррозии.

В связи с этим, актуальным остается исследование колебаний неоднородных цилиндрических оболочек. Неоднородность материала оболочки может быть заложена конструктивно или возникнуть вследствие ее износа как снаружи, так и изнутри.

В работах [12, 13] было проведено моделирование связи между напряженно-деформированным состоянием металлической трубы под давлением водородосодержащей среды и процессом диффузии водорода внутрь металла. Было показано, что изначально постоянный модуль Юнга материала трубы под воздействием водородной коррозии становится функцией радиальной координаты $E(r)$.

В работе [14] было проведено исследование осесимметричных колебаний цилиндрической трубы, ослабленной водородной коррозией. Ослабление материала учитывалось введением усредненного по определенному закону модуля Юнга. Установлена возможность существования опасного для прочности режима колебаний трубы с дополнительной инерцией в виде «массового пояска», моделирующим массивные ребра жесткости трубопровода.

Для расчета неосесимметричных колебаний трубы подход с усредненным модулем Юнга оказался недостаточно точен, потребовалось уточнение формул для жесткостей слоистой оболочки. Изложенные в литературе асимптотические подходы для учета изменения механических свойств оболочки по её толщине [15, 16] слишком сложны для получения достаточно простых оценочных формул. Поэтому в данной работе

жесткости классической оболочки с неоднородностью материала рассчитываются по формулам, приведенным, например, в [17], но с введением необходимых поправок.

1. Модель трубы как слоистой оболочки

Рассмотрим трубу как круговую цилиндрическую оболочку Кирхгофа-Лява. Введем цилиндрическую систему координат (r,φ,z), где ось z совпадает с осью цилиндра, и локальную систему координат $(\mathbf{t},\mathbf{n},\mathbf{k})$, где вектора $\mathbf{t},\mathbf{n}$ – 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 $R-h/2<r<R+h/2,\ 0\le\varphi\le 2\pi,\ -l/2<z<l/2$. 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 вибрационное поле, выберем вектор смещений оболочки $\mathbf{u}(\varphi,z)=(u_t,u_z,u_n)$. 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 $\rho_s=\rho_s(y)$ и модуль Юнга $E=E(y)$. При этом положим, что различие слоев оболочки определяется, главным образом, значением модуля Юнга E. Поэтому функции ν и ρ_s заменим константами, равными их интегральным средним: $\frac{1}{h}\int_{-h/2}^{h/2}\nu(y)\,dy$ и $\frac{1}{h}\int_{-h/2}^{h/2}\rho_s(y)\,dy$, соответственно.

Отметим, что деформацию оболочки можно рассматривать как сочетание изгиба и растяжения (сжатия) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В нашем случае в качестве таких плоскостей возьмем плоскость, содержащую ось z (здесь сечение оболочки плоскостью имеет вид прямоугольника), и плоскость перпендикулярную к ней, где сечение имеет вид кольца. Проведем рассуждение, на физическом уровне строгости, для обоих сечений аналогично тому, как оно проводится для соответствующих плоских балок. Мысленно разрежем каждое из этих сечений вдоль нормали к оболочке (вдоль нее откладывается переменная y) и теперь, для удобства терминологии, уже полученные отрезки будем называть сечениями. Разложим напряжение в таком сечении на средне-интегральную составляющую σ_a по y, т.е. $\sigma_a=\frac{1}{h}\int_S\sigma(y)dy$ и на добавку к ней $\sigma_0=\sigma-\sigma_a$. Тогда добавка σ_0 удовлетворяет условиям чистого изгиба. При таком изгибе наружный слой растягивается, а внутренний – сжимается (и

наоборот) и такая добавка, в средне-интегральном, не вызывает растяжения в этом сечении. Поэтому, для нее можно написать

$$0 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_0(y)\, dy \sim \int_{-h/2}^{h/2} E(y)\, y\, dy \qquad (1)$$

(здесь значок тильда обозначает прямую пропорциональность). Нейтральная линия проходит через точку, координаты которой y_0 определяются по формуле

$$y_0 = \left(\int_{-h/2}^{h/2} E(y)\, y\, dy\right) \Big/ \left(\int_{-h/2}^{h/2} E(y)\, dy\right). \qquad (2а)$$

Заметим, что составляющая σ_a, вследствие своей постоянности по сечению, не меняет положения этой линии. Возвращаясь к переменной *r*, получим уравнение этой линии в виде

$$r = R + y_0. \qquad (2б)$$

Для удобства линию (2б) по-прежнему будем называть нейтральной, хотя теперь, в отличие от чистого изгиба, на ней присутствуют растягивающие (сжимающие) напряжения.

В цилиндрической системе координат уравнение (2б) опишет уже цилиндрическую поверхность, которую также будем называть нейтральной. Величину $R^* = R + y_0$ назовем новым (эффективным) радиусом оболочки.

С учетом этих обстоятельств, запишем жесткости $C_i, D_i,\ i = 1,2$, фигурирующие в уравнениях для оболочки типа Кирхгофа [18], в виде:

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2}\begin{pmatrix} \nu \\ 1-\nu \end{pmatrix}\int_{-h/2}^{h/2} E(y)\, dy, \qquad \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2}\begin{pmatrix} \nu \\ 1-\nu \end{pmatrix}\int_{-h/2}^{h/2} E(y)\left(y - y_0\right)^2 dy. \qquad (3)$$

Положим модуль Юнга кусочно-постоянным:

$$E(y) = \begin{cases} E_1,\ -h/2 < y < y_1 \\ E_2,\ y_1 < y < +h/2 \end{cases}. \qquad (4)$$

Подставляя (4) в (2) и (3), получим искомые новый радиус и жесткости. В дальнейшем перейдем к безразмерной координате $\xi = y/h$, соответственно координата нейтральной линии будет $\xi_0 = y_0/h$, а координата разделения слоев оболочки $\xi_1 = y_1/h$. Также введем обозначение для усредненного

модуля Юнга E_a и безразмерную цилиндрическую жесткость D^* по формулам:

$$E_a = \frac{1}{h}\int_{-h/2}^{h/2} E(y)\,dy = \int_{-1/2}^{1/2} E(\xi)\,d\xi, \quad D^* = \left(12\int_{-1/2}^{1/2} E(\xi)\left(\xi-\xi_0\right)^2 d\xi\right)\Big/\left(\int_{-1/2}^{1/2} E(\xi)\,d\xi\right). \quad (5)$$

Вычисления будут проводиться для частного случая $y_1 = 0$ в (4). В этом случае формулы (2) – (5) приобретут наиболее компактный вид:

$$E_a = \left(E_2 + E_1\right)/2, \quad \xi_0 = \frac{1}{8}\frac{E_2 - E_1}{E_a} = \frac{1}{4}\frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}, \quad R^* = R + h\xi_0, \quad D^* = 1 - \frac{3}{4}\left(\frac{E_1}{E_a} - 1\right)^2. \quad (6)$$

Заметим, что в случае однородной оболочки $E_1 = E_2 = E_a$ формулы (6) вырождаются в следующие: $\xi_0 = 0$, $R^* = R$, $D^* = 1$.

2. Модальный анализ двухслойной трубы

Рассмотрим свободные гармонические колебания описанной выше оболочки с жёстко зажатыми торцами. Решение задачи ищется в виде:

$$\begin{pmatrix} u_t \\ u_z \\ u_n \end{pmatrix} = Ae^{i\lambda z}\begin{pmatrix} \zeta\sin(m\varphi) \\ \xi\cos(m\varphi) \\ \gamma\cos(m\varphi) \end{pmatrix}; \quad 0 \le \varphi < 2\pi, \quad -l/2 < z < l/2, \quad m = 1,2,.... \quad (7)$$

Здесь: A, ζ, ξ, γ – произвольные константы; λ – искомое волновое число. Метод решения аналогичен примененному в [13]. В результате, для каждого m находится набор собственных частот $\omega_j = 2\pi f_j$, j=1,2,... Соответствующие формы колебаний (моды) будем обозначать парой чисел $\{m, j\}$. В статье рассматриваются неосесимметричные колебания, которым отвечают $m \ge 1$.

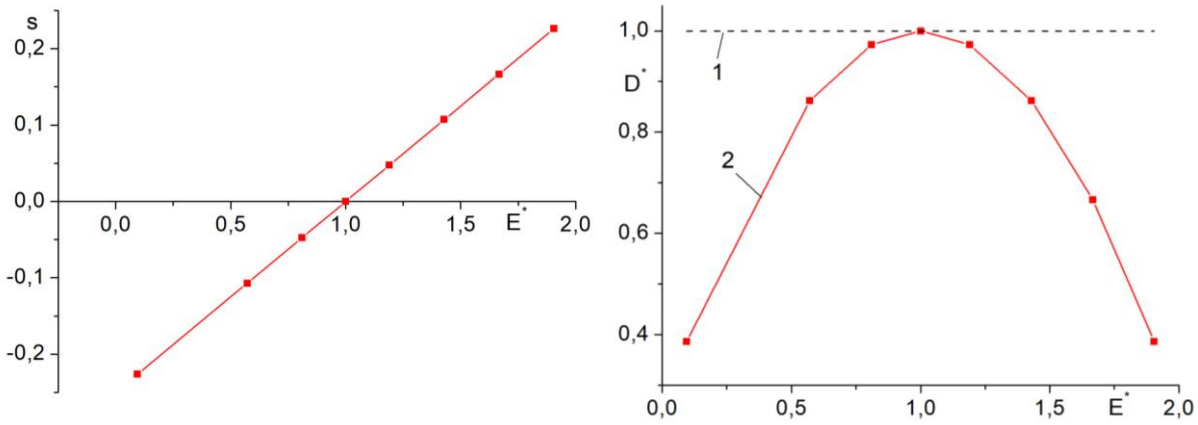


Рис. 1

а) Координата $s \equiv \xi_0$ нейтральной оси.

б) Относительная цилиндрическая жесткость D^*.

Для расчета представленных графических зависимостей в Фортране безразмерные параметры оболочки взяты следующие: $\nu = 0.3$, $h/R = 0.05$, $l/R = 20$. Дополнительно, для сравнения с результатами вычислений методом конечных элементов в пакете ANSYS (использован 8-узловой оболочечный элемент SHELL281), взяты следующие размерные параметры оболочки: $R = 0.5$ м, $E_0 = 2.1 \cdot 10^{11}$ Н/м^2, $\rho_s = 7850$ кг/м^3, l =10 м. Такие параметры оболочки близки к параметрам стальных труб магистральных газопроводов с диаметром 720 – 1420 мм.

На рисунках 1а и 1б сплошными кривыми изображены зависимости координаты нейтральной линии $s \equiv \xi_0$ и относительной цилиндрической жесткости D^* как функции относительной безразмерной жесткости $E^* = E_2 / E_a$ соответственно. Пунктирная линия 1 на рис. 1б соответствует максимальному значению $D^* = 1$, которое достигается в однородном случае (при $E^* = 1$).

На рисунках 2а, б изображены зависимости собственных частот оболочки как функции относительной жесткости E^*, вычисленные различными методами. Для вычислений подбирались значения модулей упругости слоев E_1 и E_2 так, чтобы средне-интегральное значение модуля Юнга E_a оставалось неизменным и равным E_0, (это позволило выявить вклад именно асимметрии слоев). Поэтому расчет частот с усредненным модулем Юнга E_a (без учета сдвига нейтральной линии) дает горизонтальную пунктирную линию 1 и не выявляет такой асимметрии.

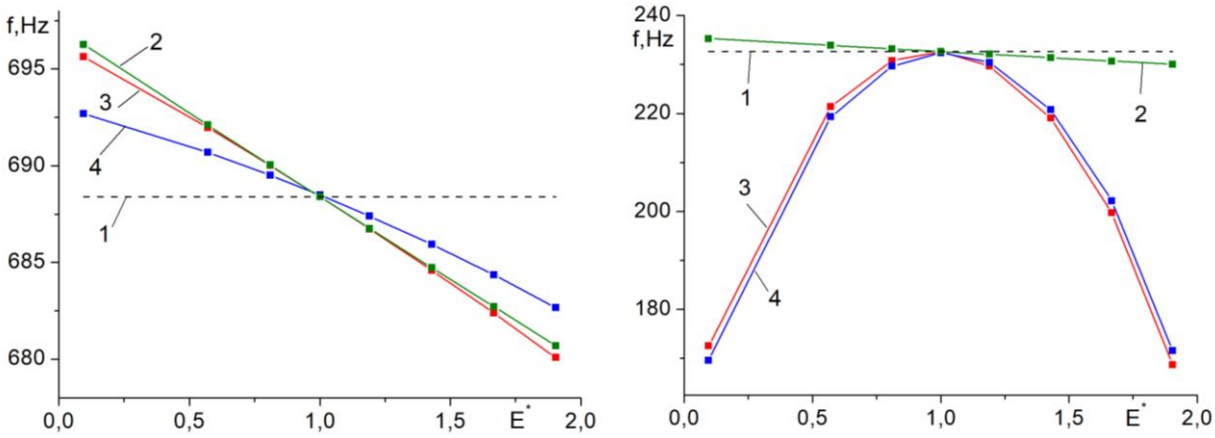


Рис. 2. Собственные частоты оболочки
а) для моды {1, 7} б) для моды {3, 5}

Кривые 2 на рисунках 2а, б соответствуют учету сдвига нейтральной линии в формуле для усредненного модуля Юнга E_a. В случае балочной моды (m=1) возникает зависимость близкая к линейной. Рост эффективного радиуса оболочки R^* приводит к пропорциональному уменьшению частоты f. Это вызвано тем, что в данном случае с ростом R^* остается практически неизменной безразмерная частота $w = 2\pi f R^* \sqrt{\rho_S (1-\nu^2)/E_a}$, фигурирующая в теории оболочек Кирхгофа [13].

Если же перейти к методу усредненных жесткостей с учетом сдвига нейтральной линии (кривые 3 на рисунках 2а, б), то на модах с номерами m большими 1, наблюдается уменьшение частот по мере нарастания асимметрии слоев. Это хорошо коррелирует с результатами счета на ANSYS, которые отмечены как кривыми 4 на рисунках 2а, б, так и визуализацией форм колебаний оболочки, что позволяет отфильтровать возможные ошибки в нахождении частот. Остальные методы для этих мод дают большие погрешности. Такое поведение частот связано с поведением относительной цилиндрической жесткости D^* (рис.1б), которая уменьшается по мере нарастания асимметрии слоев, что и ведет к снижению частот.

Заметим, что если пользоваться методом усредненных жесткостей без учета сдвига нейтральной линии, то для функций (4) получаем выражение для относительной цилиндрической жесткости D^* в виде:

$$D^* = 1 + 8\xi_1^3 \left(\frac{E_1}{E_a} - 1 \right). \qquad (8)$$

Если же $\xi_1 = 0$, как при рассматриваемых вычислениях, то $D^* = 1$. Тем самым, этот метод в данном случае не “чувствует” асимметрию слоев, и он

дает те же значения частот, как и метод усредненного модуля Юнга (пунктирные линии 1 на рисунках 2а, б).

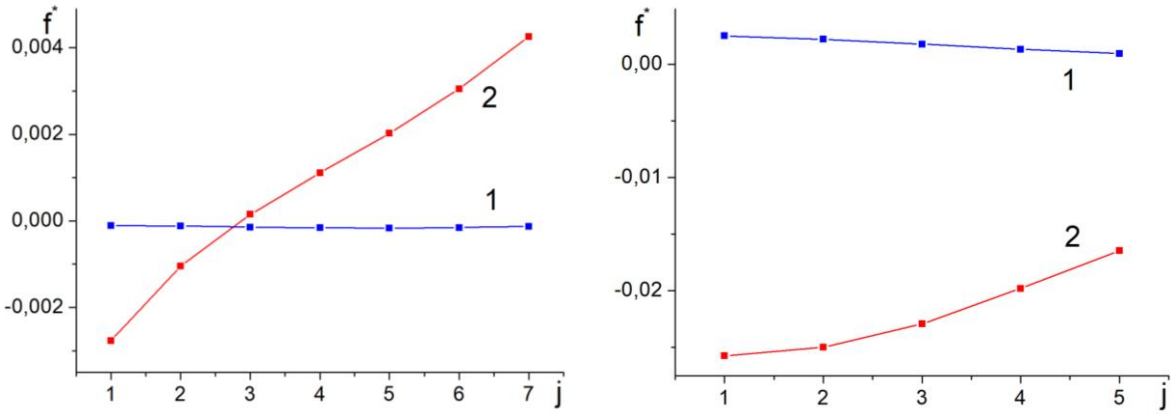


Рис. 3. Относительная погрешность f^* вычисления собственных частот
а) для m=1 б) для m=3

На рисунках 3а, б изображены относительные погрешности $f^* = (f_K - f_A)/f_A$ нахождения собственных частот, отвечающих m=1, и m=3 соответственно. Причем на рисунке 3а – первых семи частот, а на рисунке 3б – первых пяти частот. Кривая 1 на этих рисунках вычислена для значения $E^* = 1,0$, а кривая 2 – для значений $E^* = 0,095$ и $E^* = 1,905$ на рисунках 3а, б, соответственно. Введены обозначения: f_K – частоты, вычисленные по методу усредненных жесткостей с учетом сдвига нейтральной линии, а f_A – частоты, вычисленные с помощью пакета ANSYS. Погрешность вычислений для данных параметров оболочки и диапазона изменения мод не превышает 2,5%. За эталон приняты расчеты двухслойной оболочки пакетом ANSYS. Использование пакета позволяет приблизиться к вычислению колебаний оболочки, как трехмерного тела.

На рисунках 4а, б визуализированы в пакете ANSYS третья мода, отвечающая m=1 (мода{1, 3}, собственная частота $f = 235,94$ Гц) и вторая мода, отвечающая m=3 (мода {3, 2}, собственная частота $f = 197,34$ Гц). Обе моды вычислены для значения $E^* = 1,19$.

Выводы

Проведены расчеты свободных колебаний трубы с неоднородностью материала, вызванной водородной коррозией. Численные эксперименты проведены для нескольких моделей трубы на основе теории оболочек. Сравнение с вычислениями по методу конечных элементов позволили оценить степень применимости каждой модели.

Так, метод усреднения модуля Юнга по толщине оболочки не “чувствует” асимметрии слоев относительно нейтральной линии.

Следующий по точности – метод добавления поправки на радиус нейтральной линии оболочки. Он приемлемо работает для мод, которые оставляют сечение оболочки (перпендикулярного образующей) неизменным. Это относится к осесимметричным колебаниям, а также к балочной моде.

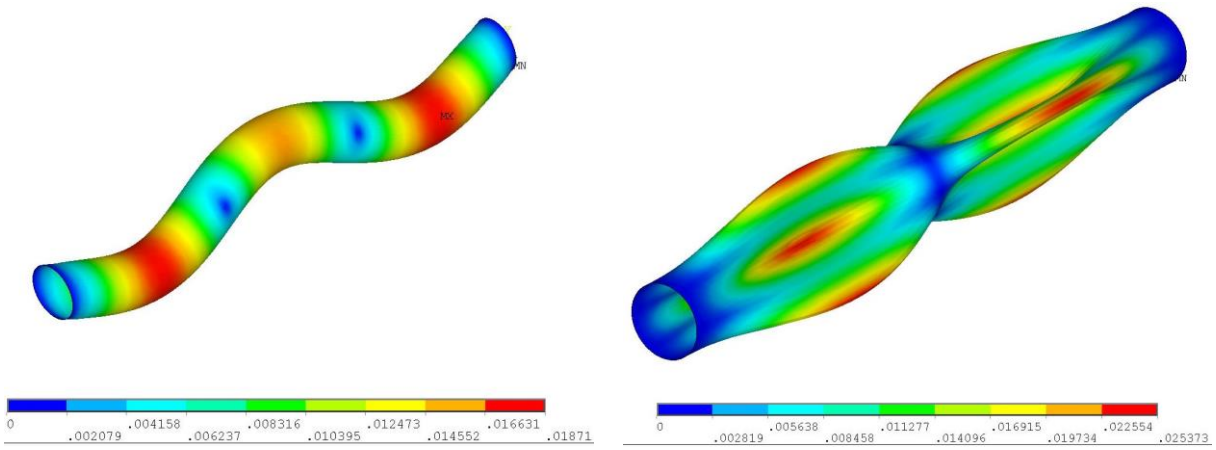


Рис. 4. Формы колебаний оболочки

а) Форма {1, 3} б) Форма {3, 2}

Следующее по точности приближение – усреднение жесткостей оболочки по ее толщине с учетом приведенного радиуса. Этот метод позволяет получать приемлемые результаты в достаточно широком диапазоне частот и для мод, связанных с деформированием сечения оболочки.

Проведенное моделирование может быть полезно, в том числе для определения параметров слоев ослабленной водородом трубы по её частотным характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Cheng Y.F. (Ed.) Stress Corrosion Cracking of Pipelines. 2013. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, TX, Canada. p. 275.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Axisymmetric Vibrations of the Cylindrical Shell Loaded with Pointed Masses. 2021. Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 80-91. Doi: 10.1007/978-3-030-62062-2_9.
[10] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Axially Symmetric oscillations of circular cylindrical shell with localized mass on Winkler foundation. 2022. APM 2020, LNME. pp. 245–257. Doi: 10.1007/978-3-030-92144-6_19.
[11] Filippenko G.V., Wilde M.V. Backwards waves in a cylindrical shell: comparison of 2D shell theories with 3D theory of elasticity. 2018. Proceedings of the International Conference “Days on Diffraction 2018”, St.-Petersburg, Russia, June 4-8. pp. 112-117. Doi: 10.1109/DD.2018.8553487.
[12] 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.
[13] Зиновьева Т.В. Влияние концентрации водорода на растрескивание трубы. 2020. Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 9-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича.- СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С.196-206. Doi: 10.1872/MMF-2020-15.
[14] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model. 2022. Advances in Mechanical Engineering, LNME. pp. 78–85. Doi: 10.1007/978-3-030-91553-7_9.
[15] 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.
[16] Kaplunov J.D., Kossovich I.Yu, Nolde E.V. Dynamics of thin walled elastic bodies. 1988. San Diego: Academic Press. 226 p.
[17] Кармишин А.В., Лясковец В.А., Мяченков В.И., Фролов А.Н. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. 1975. М.: Машиностроение. 376 с.
[18] Елисеев В.В. Механика упругих тел. 2003. СПб.: Изд-во СПбГПУ. 336 с.

G. V. Filippenko[1], T. V. Zinovieva[2]

NON-AXISYMMETRIC VIBRATIONS OF A GAS PIPELINE WEAKENED BY HYDROGEN CORROSION, BASED ON AN INHOMOGENEOUS SHELL MODEL

[1,2]Institute of Mechanical Engineering, St.-Petersburg, Russia
[1]Saint Petersburg State University, St.-Petersburg, Russia

Abstract

The actual problem of modern industry is hydrogen embrittlement of pipes of the main gas pipeline. There is a necessity to estimate strength and service life of hydrogen-weakened pipes. The calculation of free vibrations of such a pipe taking into account material degradation is carried out. The tube is modeled as a layered shell according to classical Kirchhoff-Love theory and the influence of hydrogen-impacted layer is taken into account when calculating the shell stiffness. The found tube natural frequencies correlate well with the values obtained by the finite element method. Additional consideration of the displacement of the neutral line of the shell, due to the difference in the stiffnesses of its layers, allowed us to improve the accuracy of the found frequencies.

Key words: hydrogen corrosion, multilayer shell, shell vibrations.

REFERENCES

[1] Cheng Y.F. (Ed.) Stress Corrosion Cracking of Pipelines. 2013. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, TX, Canada. p. 275.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 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.
[8] 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.
[9] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Axisymmetric Vibrations of the Cylindrical Shell Loaded with Pointed Masses. 2021. Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 80-91. Doi: 10.1007/978-3-030-62062-2_9.
[10] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Axially Symmetric oscillations of circular cylindrical shell with localized mass on Winkler foundation. 2022. APM 2020, LNME. pp. 245–257. Doi: 10.1007/978-3-030-92144-6_19.
[11] Filippenko G.V., Wilde M.V. Backwards waves in a cylindrical shell: comparison of 2D shell theories with 3D theory of elasticity. 2018. Proceedings of the International Conference “Days on Diffraction 2018”, St.-Petersburg, Russia, June 4-8. pp. 112-117. Doi: 10.1109/DD.2018.8553487.
[12] 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.)

[13] 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.)
[14] Filippenko G.V., Zinovieva T.V. Analysis of axisymmetric vibrations of a hydrogen weakened pipe in a layered shell model. 2022. Advances in Mechanical Engineering, LNME. pp. 78–85. Doi: 10.1007/978-3-030-91553-7_9.
[15] 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., vol. 12, iss. 2. pp. 56-64. Doi: https://doi.org/10.18500/1816-9791-2012-12-2-56-64. (rus.)
[16] Kaplunov J.D., Kossovich I.Yu, Nolde E.V. Dynamics of thin walled elastic bodies. 1988. San Diego: Academic Press. 226 p.
[17] 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.)
[18] Eliseev V.V. Mechanics of Deformable Solids. 2003. St. Petersburg, Polytechnic University Press. 336 p. (rus.)

МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

В. В. Гусев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕРАСПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКА В LPBF

Владимир Вячеславович Гусев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (950)001-8766, E-mail: shosha410@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы использования нерасплавленного порошка в технологии LPBF. При проведении исследования было отмечено, что при работе с данным порошком возникает ряд проблем на этапе постобработки. Для того, чтобы популяризировать использование данной технологии взамен старым, необходимо устранить эти проблемы.

Ключевые слова: LBPF, нерасплавленный порошок, постобработка деталей, качество деталей.

Введение

Целью исследования является устранение проблем связанных с использованием нерасплавленного порошка в технологии печати LPBF, а именно ухудшение функциональных особенностей деталей из-за попадания порошка в функциональные полости, просачивание порошка во время функционирования детали, затвердевание на этапе термообработки. Поэтому важным вопросом для рассмотрения является этап проектирования в детали маленьких и длинных отверстии, сложных каналов.

Методы

Постобработка деталей – это аспект, о котором проектировщик должен позаботиться заблаговременно. В настоящее время постобработка деталей основана на автоматических станциях постобработки, которые

обеспечивают перемещение детали на строительной платформе, а также высокочастотные вибрации, позволяя всему нерасплавленному порошку выйти из отверстий в деталях. Выходы для порошка должны быть включены в конструкцию детали и поры с ранней фазы проектирования, и в случае, если выходы для порошка находятся на детали, их влияние на механическое поведение должно быть учтено на этапе анализа конструкции. Фактически, использование систем автоматической постобработки не достаточно, чтобы гарантировать качественную постобработку деталей на производственной линии при использовании аддитивного производства. Необходимо разработать процесс автоматической постобработки и интегрировать возможные функции автоматической постобработки с геометрией деталей и дополнительных конструкций (например, опор).

Результаты

В качестве примера рассмотрена очистка непроходного канала. Непроходной канал – это особенность, наиболее проблемная с точки зрения автоматической постобработки. Главная задача заключается в определении минимального размера канала для обеспечения правильной очистки. На рисунке 1 представлена первоначальная конфигурация.

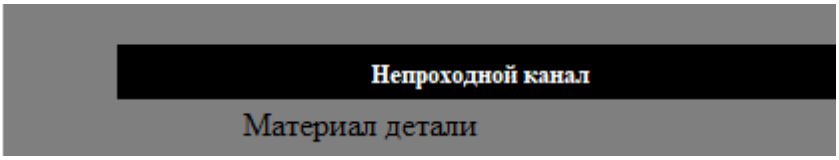


Рис. 1. Первоначальная конфигурация работы

Для обеспечения автоматической постобработки каналов необходимо изменить его размер, чтобы повысить степень очистки. Кроме того, чтобы обеспечить повторяемость процесса очистки, к начальной конфигурации могут быть добавлены дополнительные функции автоматической постобработки для дальнейшего улучшения. Примером дополнительной функции является модификация конструкции канала, делающая его сквозным вместо непроходного (рис. 2 и рис. 3).

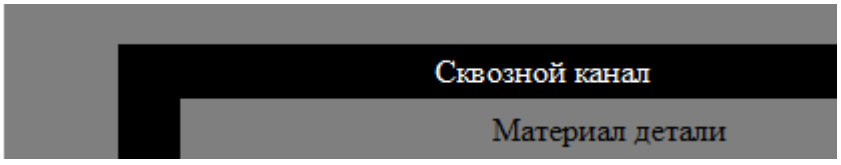


Рис. 2. Пример сквозного канала

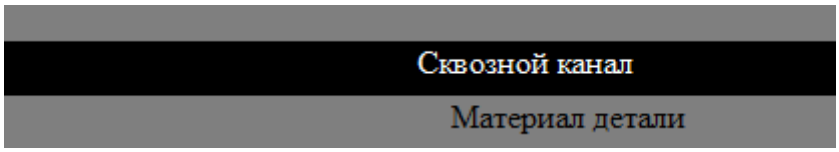


Рис. 3. Пример сквозного канала

Такая модификация конструкции должна рассматриваться с ранней фазы проектирования, для оценки ее влияния на все остальные требования и характеристики детали (например, влияние на работоспособность детали влияние на срок службы детали и т.д.).

Обсуждение

Данная инновация в сфере LPBF технологий позволит улучшить качество постобработки детали, а как следствие и качество изделий, которые будут изготовлены из этих деталей. Повышение качества деталей позволит увеличить спрос на изделия, изготовленные аддитивным методом при помощи LPBF технологии, а как следствие и продвинуть данную технологию в производство.

Заключение

Проработка канала на поверхности детали для выхода нерасплавленного порошка позволит устранить проблемы изменения функционирования детали, в случае попадания порошка в функциональные полости детали. Правильная проектировка выходов для порошка в конструкции детали позволит обеспечить правильную очистку. Устройство каналов в дальнейшем может быть улучшено и модифицировано, как с экономической стороны в пользу удешевления изготовления детали, так и с конструкторской в плане улучшения устройства детали для повышения необходимых характеристик изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Giorgetti A, Girgenti A, Citti P and Delogu M 2016 A novel approach for axiomatic-based design for the environment in *Axiomatic Design in Large Systems: Complex Products, Buildings and Manufacturing Systems* 131-48

[2] Jawahir I S, Rouch K E, Dillon O W, Holloway L and Hall A 2007 Design for sustainability (DFS): new challenges in developing and implementing a curriculum for next generation design and manufacturing engineers *Int. J. Eng. Edu.* **23**(6)

[3] Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. 2010 Design for Additive Manufacturing
[4] Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. 2015 Design for Additive Manufacturing
[5] Komi E. 2016 Design for Additive Manufacturing
[6] Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R. I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B. and Martina F. 2016 Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, CIRP Annals
[7] Hegab H. A. 2016 Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys: a review,
[8] Yang L., Harrysson O., Cormier D., West H., Gong H., Stucker B. 2016 Additive Manufacturing of Metal Cellular Structures: Design and Fabrication
[9] Kamal M and Rizza G 2019 Design for metal additive manufacturing for aerospace applications *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* Elsevier 67-86
[10] Schmelzle J, Kline E V, Dickman C J, Reutzel E W, Jones G and Simpson T W 2015, *(Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing* Journal of Mechanical Design **137**(11): 111404
[11] Fox J C, Moylan S P and Lane B M 2016 Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing *Procedia CIRP* **45** 131-4
[12] Han Q, Gu H, Soe S, Setchi R, Lacan F and Hill J 2018 Manufacturability of AlSi10Mg overhang structures fabricated by laser powder bed fusion *Materials & Design* **160** 1080-95
[13] Wang X and Chou K 2018 Effect of support structures on Ti-6Al-4V overhang parts fabricated by powder bed fusion electron beam additive manufacturing *Journal of Materials Processing Technology* **257** 65-78
[14] Chen H., Gu D., Xiong J. and Xia M. 2017 Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting *Journal of Materials Processing Technologies*
[15] Cheng L and To A 2019 Part-scale build orientation optimization for minimizing residual stress and support volume for metal additive manufacturing: Theory and experimental validation *Computer Aided Design* **113** 1-23
[16] Das P, Chandran R, Samant R and Anand S 2015 Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures *Procedia Manufacturing* **1** 343-354

[17] Barclift M, Armstrong A, Simpson T. W and Joshi S B 2017 CAD-Integrated Cost Estimation and Build Orientation Optimization to Support Design for Metal Additive Manufacturing, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* **2A-2017** Code 131761
[18] Mhapsekar K., McConaha M. and Anand S. 2017 Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability
[19] Zhang Y., Yang S. and Zhao Y. F. 2020 Manufacturability analysis of metal laser-based powder bed fusion additive manufacturing—a survey
[20] Baumers M, Dickens P, Tuck C and Hague R 2016 The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push *Technological Forecasting and Social Change* **102** 193-201
[21] Laureijs R E, Roca J B, Narra S P, Montgomery C, Beuth J L and Fuchs E R H 2017 Metal Additive Manufacturing: Cost Competitive Beyond Low Volumes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* **139**(8) article number: 081010
[22] Ceccanti F, Giorgetti A and Citti P 2019 A Support Structure Design Strategy for Laser Powder Bed Fused Parts *Procedia Structural Integrity* **24** 667-79
[23] Giorgetti A, Ceccanti F, Citti P, Ciappi A and Arcidiacono G 2019 Axiomatic Design of Test Artifact for Laser Powder Bed Fusion Machine Capability Assessment, *MATEC Web of Conferences* **301**(9-12):00006

V.V.Gusev

USE OF NON-MELTED POWDER IN LPBF

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

This work discusses the use of non-melted powder in LPBF technology. During the study, it was noted that when working with this powder, a number of problems arise during the post-processing stage. In order to popularize the use of this technology instead of the old ones, these problems must be eliminated.

Key words: LBPF, non-melted powder, post-processing of parts, quality of parts.

REFERENCES

[1] Giorgetti A, Girgenti A, Citti P and Delogu M 2016 A novel approach for axiomatic-based design for the environment in *Axiomatic Design in Large Systems: Complex Products, Buildings and Manufacturing Systems* 131-48

[2] Jawahir I S, Rouch K E, Dillon O W, Holloway L and Hall A 2007 Design for sustainability (DFS): new challenges in developing and implementing a curriculum for next generation design and manufacturing engineers *Int. J. Eng. Edu.* **23**(6)
[3] Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. 2010 Design for Additive Manufacturing
[4] Gibson I., Rosen D. W. and Stucker B. 2015 Design for Additive Manufacturing
[5] Komi E. 2016 Design for Additive Manufacturing
[6] Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R. I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B. and Martina F. 2016 Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, CIRP Annals
[7] Hegab H. A. 2016 Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys: a review,
[8] Yang L., Harrysson O., Cormier D., West H., Gong H., Stucker B. 2016 Additive Manufacturing of Metal Cellular Structures: Design and Fabrication
[9] Kamal M and Rizza G 2019 Design for metal additive manufacturing for aerospace applications *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* Elsevier 67-86
[10] Schmelzle J, Kline E V, Dickman C J, Reutzel E W, Jones G and Simpson T W 2015, *(Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing* Journal of Mechanical Design **137**(11): 111404
[11] Fox J C, Moylan S P and Lane B M 2016 Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing *Procedia CIRP* **45** 131-4
[12] Han Q, Gu H, Soe S, Setchi R, Lacan F and Hill J 2018 Manufacturability of AlSi10Mg overhang structures fabricated by laser powder bed fusion *Materials & Design* **160** 1080-95
[13] Wang X and Chou K 2018 Effect of support structures on Ti-6Al-4V overhang parts fabricated by powder bed fusion electron beam additive manufacturing *Journal of Materials Processing Technology* **257** 65-78
[14] Chen H., Gu D., Xiong J. and Xia M. 2017 Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting *Journal of Materials Processing Technologies*
[15] Cheng L and To A 2019 Part-scale build orientation optimization for minimizing residual stress and support volume for metal additive manufacturing: Theory and experimental validation *Computer Aided Design* **113** 1-23

[16] Das P, Chandran R, Samant R and Anand S 2015 Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures *Procedia Manufacturing* **1** 343-354
[17] Barclift M, Armstrong A, Simpson T. W and Joshi S B 2017 CAD-Integrated Cost Estimation and Build Orientation Optimization to Support Design for Metal Additive Manufacturing, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference* **2A-2017** Code 131761
[18] Mhapsekar K., McConaha M. and Anand S. 2017 Additive Manufacturing Constraints in Topology Optimization for Improved Manufacturability
[19] Zhang Y., Yang S. and Zhao Y. F. 2020 Manufacturability analysis of metal laser-based powder bed fusion additive manufacturing—a survey
[20] Baumers M, Dickens P, Tuck C and Hague R 2016 The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push *Technological Forecasting and Social Change* **102** 193-201
[21] Laureijs R E, Roca J B, Narra S P, Montgomery C, Beuth J L and Fuchs E R H 2017 Metal Additive Manufacturing: Cost Competitive Beyond Low Volumes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* **139**(8) article number: 081010
[22] Ceccanti F, Giorgetti A and Citti P 2019 A Support Structure Design Strategy for Laser Powder Bed Fused Parts *Procedia Structural Integrity* **24** 667-79
[23] Giorgetti A, Ceccanti F, Citti P, Ciappi A and Arcidiacono G 2019 Axiomatic Design of Test Artifact for Laser Powder Bed Fusion Machine Capability Assessment, *MATEC Web of Conferences* **301**(9-12):00006

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научно-практической конференции / Под ред.
А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 620.1.051

А.Н. Попов[1], М.Н. Полищук[2], Д.В. Решетов[3]

ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ МЕХАТРОННОГО УДАРНОГО СТЕНДА

[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]Решетов Дмитрий Валентинович
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)876-95-81, E-mail: pvclol@yandex.ru

Аннотация

Главными факторами, определяющими ударное ускорение, воспроизводимое на испытательных стендах, являются скорость соударения стола, на котором закреплен испытуемый прибор с формирователем импульса, и свойства самого формирователя. Скорость соударения влияет, прежде всего, на пиковое значение импульса, от жесткости формирователя зависит длительность импульса.

При свободном падении стола значение достижимой скорости его соударения с формирователем ограничивается габаритными размерами стенда. Другим известным способом повышения скорости соударения является дополнительный разгон стола, в частности, с помощью пневматического ускорителя. В работе рассмотрены различные варианты реализации пневматического ускорителя применительно к стендам многократных ударов. Проведено исследование эффективности их использования с помощью аналитических и компьютерных моделей.

Полученные теоретические оценки подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: ударный стенд, скорость соударения, пневматический ускоритель, компьютерная модель, экспериментальная верификация.

Введение

Механические испытания выполняются для большей части ответственных промышленных и бытовых изделий [1-5]. Одним из видов используемых при этом воздействий является удар. Испытания на ударные воздействия регламентированы стандартами [4, 5] и проводятся на специальном оборудовании – мехатронных ударных стендах, в частности пневматических [6-8]. Принципы работы пневматических ударных стендов хорошо известны и подробно описаны [9-13]. В России в течение последних 10 лет с участием сотрудников СПбПУ Петра Великого разработана, изготовлена и исследована линейка мехатронных ударных стендов серии СМУ [14].

Главными характеристиками ударных стендов являются диапазоны воспроизводимых параметров импульсов ускорений, в первую очередь, пиковые значения и длительности. Если длительность импульса зависит, прежде всего, от характеристик формирователя, то пиковое значение определяется скоростью стола с закрепленным на нем испытуемым изделием в момент соударения с формирователем [8]. Эта скорость зависит от высоты, с которой падает стол, а высота определяется габаритными размерами стенда. Поэтому возникает серьезное препятствие на пути расширения диапазона воспроизводимых пиковых значений, а это необходимо, так как постоянно возрастают требования по испытанию новых образцов техники [15, 16].

Повысить скорость соударения можно за счет дополнительного разгона стола с помощью ускорителей. В ударных стендах в настоящее время используется несколько типов ускорителей, основанных на разных принципах:

- принцип катапульты, т. е. разгон за счет применения банджей – эластомерных тросов [17, 18];
- энергия сжатых механических пружин – рессор [19, 20];
- энергия сжатого воздуха.

Появление пневматических ускорителей обусловлено несколькими факторами. Во-первых, высокой надежностью и ресурсом современной пневмоавтоматики и компрессорной техники [21, 22], во-вторых, высокими энергетическими характеристиками сжатого воздуха [23, 24] и, наконец, компактностью испытательных машин, использующих такой принцип.

Известны примеры использования пневматических ускорителей ведущими иностранными фирмами-производителями ударных стендов [18,

20, 25], однако отсутствует анализ эффективности их работы. В статье рассмотрены три варианта применения пневматических ускорителей, выполнен их сравнительный анализ. Полученные результаты верифицированы на физической модели стенда. Отметим, что подобные задачи применительно к стендам многократных ударов ранее не рассматривались.

Методы

В работе в качестве примера рассматривается стенд серии СМУ типа СМУ300 с пневматическим ускорителем. Пневмо-кинематическая схема стенда приведена на рис. 1. Принципы работы и конструкция этого стенда подробно описаны в [8]. Здесь остановимся на характеристике различных режимов работы пневматического привода.

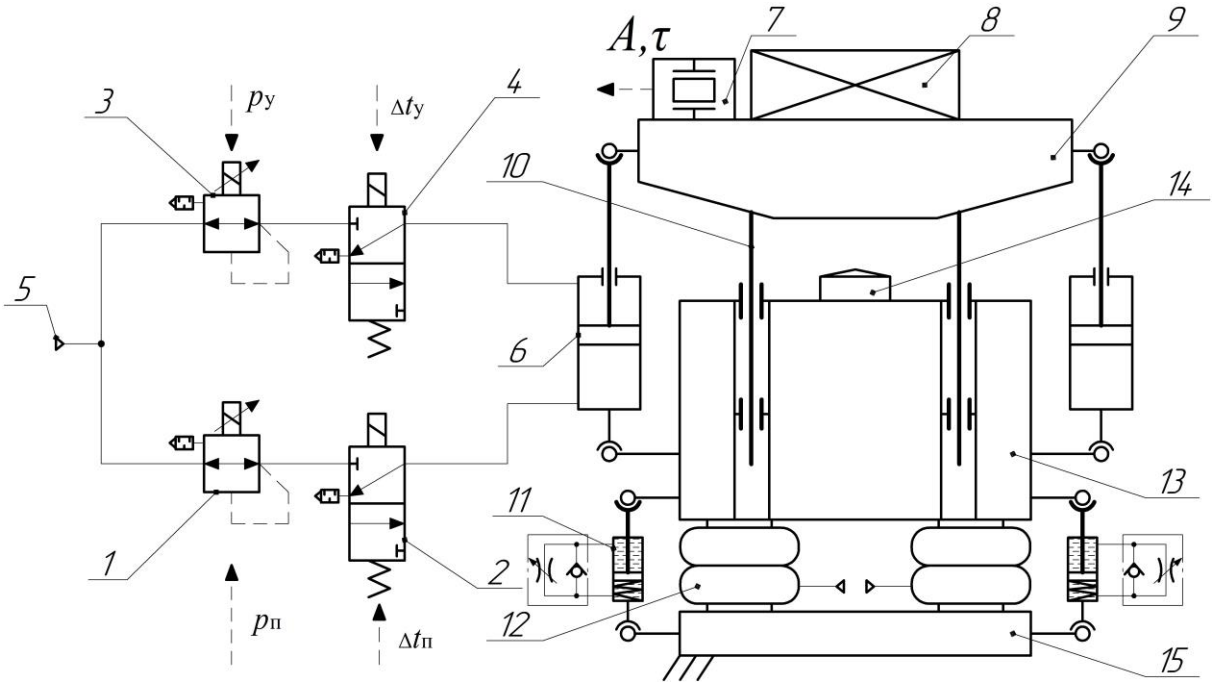


Рис. 1. Пневмо-кинематическая схема ударной машины стенда СМУ300:
1, 3 – электропневматические преобразователи; 2, 4 – распределители; 5 – пневматическая магистраль; 6 – приводной пневмоцилиндр (подвод воздуха ко второму пневмоцилиндру условно не показан); 7 – вибропреобразователь; 8 – испытуемый прибор; 9 – ударный стол;10 – направляющая; 11 – амортизатор; 12 – цилиндр пневмоподвески; 13 – инерционный блок; 14 – формирователь импульса; 15 – основание

При работе стенда в режиме без ускорителя воздух из пневматической магистрали подается на электропневматический преобразователь 1, который устанавливает давление, необходимое для работы с объектом испытания заданной массы. Распределитель 2 переключается из исходного положения в режим подачи давления в поршневую полость пневмоцилиндров 6. При этом распределитель открывается на время,

необходимое для подъема стола на высоту, обеспечивающую при падении стола ударный импульс с необходимым пиковым ускорением. Распределитель 4 при этом находится в исходном положении, соединяя поршневую полость с атмосферой. После подачи порции сжатого воздуха распределитель 2 соединяет поршневую полость с атмосферой. Таким образом, ударный стол 9 после подъема на заданную высоту начинает свободно падать на формирователь импульса 14. Параметры импульса ускорения при ударе фиксируются вибропреобразователем 7.

Дополнительный разгон стола для повышения скорости соударения обеспечивается за счет электропневматического преобразователя 3 и распределителя 4 при замыкании воздуха в штоковой полости приводного цилиндра или подачи в нее воздуха под давлением. В результате перепада давления в полостях возникает сила, которая при падении стола добавляется к силе тяжести и увеличивает скорость стола в момент соударения с формирователем импульса. Последнее приводит к увеличению пикового значения ударного импульса ускорения.

Возможны различные способы реализации этого метода, например, «включить ускоритель» можно в момент остановки стола в верхней точке, когда закончится движение по инерции после начального разгона. Можно использовать ускоритель сразу же после разгона или «заглушить» выход воздуха из штоковой полости в окружающую среду. В этом случае для разгона будет использоваться полученная таким образом «пневматическая пружина». Первый способ обеспечивает максимальную скорость соударения, второй предпочтителен для достижения максимальной частоты следования ударов.

Рассмотрим указанные способы подробно и оценим их эффективность для достижения максимальной скорости соударения стола с формирователем. Для этого используем упрощенную динамическую модель, которая дает оценку предельного значения скорости соударения:

- рассматриваем только движение стола, не учитывая положение инерционного блока и свойства формирователя импульсов;
- пренебрегаем силой трения в опорах стола;
- считаем, что давление при подаче воздуха в поршневую и штоковую полости устанавливается мгновенно;
- не учитываем меры, предотвращающие удары поршня о крышки приводных цилиндров.

Режим «без ускорителей». Оценку скорости стола перед ударом выполним сначала для случая отсутствия ускорителя.

Подъем стола происходит в два этапа: сначала на высоту h_1 при разгоне, затем дополнительно на высоту h_2 – по инерции за счет набранной скорости. На первом этапе, пока в течение времени Δt действует избыточное давление воздуха, поршневая полость приводных цилиндров соединена с

пневмомагистралью, а штоковая – с атмосферой. Стол двигается с ускорением a_1

$$h_1 = \frac{a_1 \cdot (\Delta t)^2}{2}, \quad a_1 = \frac{(p_p - p_a) \cdot S \cdot n - m \cdot g}{m}, \tag{1}$$

где p_p – абсолютное давление воздуха, подаваемого из магистрали в поршневую полость приводных цилиндров; p_a – атмосферное давление в штоковой полости; S – площадь поршня приводного цилиндра; n – количество приводных цилиндров; m – масса ударного стола вместе с испытуемым прибором; g – ускорение свободного падения.

Введем обозначение $(p_p - p_a) \cdot S \cdot n = k\uparrow \cdot m \cdot g$, где $k\uparrow$ – коэффициент пропорциональности. Тогда вместо (1) получим

$$h_1 = \frac{(k_\uparrow - 1) \cdot g \cdot (\Delta t)^2}{2}, \quad a_1 = (k_\uparrow - 1) \cdot g. \tag{2}$$

К моменту $t = \Delta t$ завершения разгона скорость стола будет равна $v_1 = a_1 \cdot \Delta t$. Поэтому до полной остановки в верхней точке траектории при движении по инерции стол дополнительно поднимется на высоту

$$h_2 = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{(a_1 \cdot \Delta t)^2}{2 \cdot g}. \tag{3}$$

Общая высота подъема составит

$$h = h_1 + h_2 = a_1 \cdot \left(1 + \frac{a_1}{g}\right) \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} \tag{4}$$

или же

$$h = \frac{(k_\uparrow - 1) \cdot k_\uparrow}{2} \cdot g \cdot (\Delta t)^2. \tag{5}$$

Без учета силы трения в опорах стола при свободном падении с высоты h стол к моменту контакта с формирователем наберет скорость

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{k_\uparrow \cdot (k_\uparrow - 1)} \cdot g \cdot \Delta t, \tag{6}$$

где $k\uparrow = (p_p - p_a) \cdot S \cdot n / m \cdot g$.

Учитывая связь $A = \pi \cdot v / \tau$ [26] пикового значения ускорения A и длительности τ воспроизводимого импульса полусинусоидальной формы со скоростью соударения v, можно оценить: следует или нет использовать ускоритель.

Немаловажным фактором для многократных ударных испытаний является достижение требуемой частоты следования ударов – одной из основных (вместе с пиковым значением, длительностью и формой

воспроизводимого импульса) характеристик ударных стендов. Время цикла воспроизведения удара включает следующие составляющие:

- время t_1 подъема стола на требуемую высоту;
- время t_2 «свободного» падения стола;
- длительность ударного импульса τ;
- время t_3 возврата в исходное состояние.

В стандартном режиме (без ускорителя, метод 0) имеем:

$$t_1 = (1 + \frac{a_1}{g}) \cdot \Delta t = k_{\uparrow} \cdot \Delta t,$$
$$t_2 = \sqrt{\frac{a_1}{g} \cdot (1 + \frac{a_1}{g})} \cdot \Delta t = \sqrt{k_{\uparrow} \cdot \left(k_{\uparrow} - 1\right)} \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Из опыта проектирования и эксплуатации стендов, а также с учетом периода, с которым средствами измерения фиксируется длительность импульса ускорения, примем $t_3 \geq 3 \cdot \tau$.

Режим включения ускорителя после окончания движения стола по инерции (метод 1). В случае, когда за счет изменения настроек p_p и Δt не удается обеспечить требуемые параметры импульса ускорения, в стендах СМУ используется ускоритель.

«Включить» ускоритель можно в разные моменты времени. Одним из способов является подача сжатого воздуха в штоковые полости приводных цилиндров после завершения движения стола по инерции, т. е. при его «остановке» в верхней точке хода, когда $\dot{x}_1(t) = 0$. В этом случае достигается максимальная высота подъема стола после разгона и дополнительно к силе тяжести добавляется усилие пневматики, разгоняющее стол до нужной скорости на этапе падения.

Итак, при включении ускорителя в момент, когда ударный стол поднялся на максимальную высоту h, определяемую согласно (5), в штоковую полость подается давление p_r. Поршневая полость соединена с атмосферой, давление в ней равно p_a. Значит, стол будет падать с высоты h под действием силы $m \cdot g + (p_r - p_a) \cdot S \cdot n$ и к моменту соударения с формирователем наберет скорость

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot \left(g + \frac{\left(p_r - p_a\right) \cdot S \cdot n}{m} \right) \cdot h} \quad (8)$$

или

$$V_1 = \sqrt{k_{\uparrow} \cdot (k_{\uparrow} - 1) \cdot (k_{\downarrow} + 1)} \cdot g \cdot \Delta t, \quad k_{\downarrow} = \frac{(p_r - p_a) \cdot S \cdot n}{m \cdot g}. \quad (9)$$

Сравнивая выражения (9) и (6), оцениваем «выигрыш» в скорости соударения, а значит и воспроизведении пикового значения ударного

импульса ускорения за счет использования ускорителя. Этот выигрыш в методе 1 составит

$$w_1 = \frac{V_1}{V_0} = \sqrt{k_{\downarrow} + 1}. \qquad (10)$$

Например, при p_r= 9 атм, p_a= 1 атм, диаметре поршня D = 63 мм, диаметре штока d = 20 мм, h = 200 мм, n = 2, m = 21 кг (при пустом столе), Δt = 24 мс в стенде СМУ300 за счет использования ускорителя можно обеспечить скорость соударения в стандартном режиме (без использования ускорителя) V_0 = 2 м/с. В режиме включения ускорителей после окончания движения стола по инерции – скорость V_1 = 6,3 м/с. «Выигрыш» в пиковом значении импульса ускорения – 3-х кратный.

Кроме этого за счет снижения времени падения стола уменьшится и время цикла. Теперь продолжительность падения будет в $\sqrt{k_{\downarrow} + 1}$ раз меньше по сравнению со временем свободного падения. Для указанного примера – это та же 3-х кратная разница, что существенно.

Режим включения ускорителей сразу после окончания разгона (метод 2). Несмотря на то, что для увеличения скорости соударения предпочтительно включать ускорители при максимальной высоте подъема стола, это не всегда возможно. Основных причин – три. Одна из них связана с ограничением на время ударного цикла и существенна, когда требуется высокая частота следования ударов. Вторая обусловлена необходимостью дополнительного датчика скорости, который бы фиксировал момент остановки стола после движения по инерции. Третья причина – возможность удара поршня о верхнюю крышку пневмоцилиндра, если перемещение по инерции окажется слишком большим. В этих случаях можно использовать другой способ ускорения – подачу сжатого воздуха в штоковые полости приводных цилиндров сразу же после завершения разгона вверх, т. е. в момент времени $t = \Delta t$.

Для оценки скорости соударения следует рассматривать движение стола с высоты h_1 с начальной скоростью $v_1 = a_1 \cdot \Delta t$, направленной вверх, под действием силы $m \cdot g + (p_r - p_a) \cdot S \cdot n$, направленной вниз. Сначала стол по инерции поднимется вверх на высоту $h\uparrow$, а затем будет падать с высоты $h_1 + h\uparrow$.

Дополнительная высота подъема $h\uparrow$ определится выражением

$$\begin{gathered} h_{\uparrow} = v_1 \Delta t + \frac{a_2 t_{\uparrow}^2}{2} = -\frac{a_1^2 \Delta t^2}{2a_2}; \\ a_1 = -\frac{\left(p_p - p_a\right) \cdot S \cdot n - mg}{m}, \quad a_2 = -\frac{\left(p_r - p_a\right) \cdot S \cdot n + mg}{m}, \end{gathered} \qquad (11)$$

общая высота

$$h = h_1 + h_\uparrow = \frac{a_1^2 \Delta t^2}{2} - \frac{a_1^2 \Delta t^2}{2a_2} = \frac{a_1 (a_2 - a_1) \cdot \Delta t^2}{2a_2}, \qquad (12)$$

скорость стола в момент соударения с формирователем после падения с высоты $h_1 + h\uparrow$ будет равна

$$V_2 = \sqrt{-2 \cdot a_2 \cdot h} = \sqrt{a_1 \cdot (a_1 - a_2)} \cdot \Delta t \qquad (13)$$

или с учетом ранее принятых обозначений для $k\uparrow$ и $k\downarrow$

$$V_2 = \sqrt{(k_\uparrow - 1) \cdot (k_\uparrow + k_\downarrow)} \cdot g \cdot \Delta t. \qquad (14)$$

Возможное увеличение скорости соударения в этом случае (метод 2) составит

$$w_2 = \frac{V_2}{V_0} = \sqrt{\frac{k_\uparrow + k_\downarrow}{k_\uparrow}}. \qquad (15)$$

В частности, при $k\downarrow = k\uparrow$ (т. е. при $p_r = p_p$) скорость можно повысить примерно в 1,5 раза, а при $k\downarrow = 3 \cdot k\uparrow$ – в 2 раза.

Если ускоритель включается сразу же после окончания разгона, то уменьшается и время подъема, и время падения. Соответствующие значения теперь равны

$$t_1 = \frac{k_\uparrow + k_\downarrow}{k_\downarrow + 1} \cdot \Delta t, \quad t_2 = \sqrt{\frac{k_\uparrow + k_\downarrow}{(k_\downarrow + 1)^2}} \cdot \Delta t. \qquad (16)$$

Из (16) следует, что t_1 уменьшается в $(k\uparrow + k\downarrow)/ (k\uparrow \cdot (k\downarrow + 1))$ раз, t_2 – в $\sqrt{(k_\uparrow + k_\downarrow)/(k_\uparrow \cdot (k_\uparrow - 1))}$ / $(k\downarrow + 1)$ раз. Для примера, при $k\uparrow = k\downarrow = 9$ время подъема стола уменьшится в 5 раз, а время падения – в 20 раз.

Все полученные оценки относятся к сравнению со стандартным вариантом управления (без использования ускорителя). Если же сравнивать варианты использования ускорителя после окончания подъема или сразу после разгона (методы 1 и 2), то возможное увеличение скорости соударения определится значением

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{k_\uparrow \cdot (k_\downarrow + 1)}{k_\uparrow + k_\downarrow}}. \qquad (17)$$

Какой из режимов выгоднее, зависит от значений коэффициентов $k\uparrow$, $k\downarrow$. Известно, что повышение давления в пневматическом приводе приводит к ряду положительных эффектов. Во-первых, уменьшается площадь поршней приводных цилиндров, во-вторых, увеличивается быстродействие привода. Уменьшение поперечного сечения пневмоцилиндров приводит к

увеличению компактности ударной машины в целом. С другой стороны, повышение давления более 1 МПа наталкивается на проблему работоспособности всех пневмоэлементов. Поэтому для оценки примем $k\uparrow = k\downarrow = 9$. Тогда получается, что в $\sqrt{5} \approx 2{,}2$ раз выгоднее включать ускоритель после подъема на максимальную высоту, включая движение по инерции после окончания разгона.

С другой стороны, второй способ (включение ускорителя сразу после разгона) предпочтительнее с точки зрения минимума продолжительности ударного цикла. Время подъема сокращается в $(k\downarrow + 1)\cdot k\uparrow / (k\uparrow + k\downarrow)$ раз, а время падения – в $\sqrt{k_\uparrow \cdot \left(k_\downarrow + 1\right) \cdot \left(k_\uparrow - 1\right) / \left(k_\uparrow + k_\downarrow\right)}$ раз. В числах соответствующие значения для используемого примера составят 5 и $\sqrt{40}$.

«Ускоритель в виде пневматической пружины» (метод 3) работает за счет «запирания» воздуха в штоковой полости, нарастания в ней давления при подъеме стола (поршней приводных цилиндров) и использования полученной силы упругости для разгона стола при его падении вниз. При таком решении в конструкции ударной машины автоматически исключается удар поршня, следовательно, и ударного стола с изделием, о верхнюю крышку пневмоцилиндра. Понятно, что такой жесткий удар при испытаниях может привести к аварии и выходу из строя привода или даже всей машины. Целесообразность же использования в стендах многократных ударов пневмоцилиндров с автоматическим регулируемым торможением поршней в конце хода невелика в связи с получаемым снижением быстродействия привода.

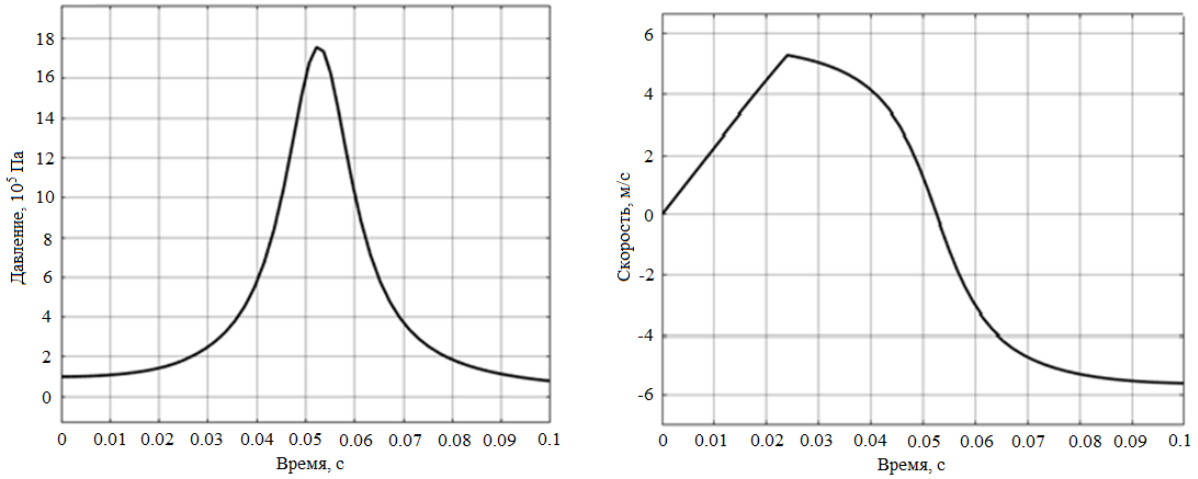
Уравнение движения стола для случая ускорителя в виде пневматической пружины имеет вид

$$m \cdot \ddot{x} = (p_1 - p_2) \cdot S \cdot n - m \cdot g,$$
$$p_1 = \begin{cases} p_p, & t \le \Delta t, \\ p_a, & t > \Delta t, \end{cases} \quad p_2 = p_a \cdot \left(\frac{l - x_0}{l - x}\right)^k, \tag{18}$$

где x_0, x – начальная и текущая координаты стола; p_1, p_2 – давление воздуха в поршневой и штоковой полостях приводных пневмоцилиндров; l – ход поршня; k – показатель адиабаты [27].

В (18) принято, что изменение давления и объема воздуха в штоковой полости соответствуют адиабатическому процессу. Так как уравнение нелинейное, то получить аналитические оценки сложно, рационально провести численное исследование, например, с помощью пакета *Simulink*.

На рис. 2, *а* приведен график изменения давления в штоковой полости приводного цилиндра стенда СМУ300 при подаче воздуха в поршневую полость под давлением p_p= 9 атм и времени открытия клапана Δt = 24 мс.



а *б*

Рис. 2. (а) – График изменения давления в штоковой полости приводного цилиндра (метод 3), (б) – График изменения скорости ударного стола (метод 3)

При приближении поршня к верхней крышке давление резко возрастает, увеличиваясь примерно в 18 раз по отношению к начальному значению. «Пневматическая пружина» сильно сжимается и обеспечивает быстрый рост скорости падения ударного стола (рис. 2, *б*).

В результате к моменту соударения с формирователем стол получит скорость 5,5 м/с, что незначительно уступает методу 1 (V_1 = 6,3 м/с), но больше, чем при методе 2 (V_2 = 2,8 м/с). Время подъема при этом составляет 52 мс, а время падения 41 мс. При методе 1 значения соответствуют 212 мс и 63 мс, а при методе 2 – 42 мс и 10 мс. Таким образом, метод 3 обеспечивает оптимальное соотношение параметров (скорость соударения и время цикла) при многократных ударах.

Результаты

Проанализированы 3 способа использования ускорителя в пневматических стендах при воспроизведении многократных ударов, позволяющие получить существенное увеличение скорости соударения стола с формирователем импульсов. Благодаря этому расширяется диапазон воспроизведения пиковых значений ударных импульсов ускорения. Получены аналитические оценки «результатов выигрыша» при реализации ускорителя путем подачи давления в штоковые полости приводных пневматических цилиндров. Показано, как оценить «выигрыш» в случае применения ускорителя «в виде пневматической пружины», реализуемой за счет запирания воздуха в цилиндре.

Оценки сведены в таблице 1. Численные значения в ней соответствуют параметрам ударного стенда СМУ300. Данные по верификации разработанной математической модели представлены в таблице 2.

Таблица 1. Оценка скорости соударения, времени подъема и времени падения для различных методов использования ускорителя

Метод	Скорость	Время подъема	Время падения
0 без ускорителя	$\sqrt{k_{\uparrow}\cdot(k_{\uparrow}-1)}\cdot g\cdot\Delta t$ 2,0 м/с	$k\uparrow\cdot\Delta t$ 212 мс	$\sqrt{k_{\uparrow}\cdot\left(k_{\uparrow}-1\right)}\cdot\Delta t$ 200 мс
1 включение ускорителя в верхней точке хода	$\sqrt{k_{\uparrow}\cdot(k_{\uparrow}-1)\cdot(k_{\downarrow}+1)}\cdot g\cdot\Delta t$ 6,3 м/с	$k\uparrow\cdot\Delta t$ 212 мс	$\sqrt{k_{\uparrow}\cdot\left(k_{\uparrow}-1\right)/\left(k_{\downarrow}+1\right)}\cdot\Delta t$ 63 мс
2 включение ускорителя сразу после разгона	$\sqrt{(k_{\uparrow}-1)\cdot(k_{\uparrow}+k_{\downarrow})}\cdot g\cdot\Delta t$ 2,8 м/с	$(k\uparrow + k\downarrow)/(k\downarrow + 1)\cdot\Delta t$ 42 мс	$\sqrt{k_{\uparrow}+k_{\downarrow}}/\left(k_{\downarrow}+1\right)\cdot\Delta t$ 10 мс
3 Применение «пневматической пружины»	— 5,5 м/с	— 52 мс	— 41 мс

Таблица 2. Сравнение математической модели и экспериментальных данных

Тип ускорителей	Параметры рабочего давления		Высота сброса, мм	Давление ускорителя, бар	Скорость стола перед ударом, м/с	
	Давление разгона, бар	Время работы клапана, мс			Математическая модель	Эксперимент
0	3,47	53	29,3	–	0,65	0,71
	3,47	90	113,1	–	1,1	1,24
2	3,47	135	142,0	2,61	2,1	2,28
	3,47	125	127,1	3,91	2,3	2,50

Среднее значение относительной погрешности скорости соударения, полученной с помощью математической модели, в сравнении с экспериментом не превышает 10 %, что подтверждает адекватность модели и возможность ее использования для анализа различных режимов работы ударного стенда.

Обсуждение

Полученные теоретические оценки и проведенное компьютерное моделирование показали, что применение ускорителей и повышение давления в пневмоприводе, обеспечивающее увеличение энергонасыщенности пневматических ударных стендов, дает значительный эффект как в увеличении основной эксплуатационной характеристики – пикового ударного ускорения, так и с точки зрения компактности и габаритных размеров ударных машин. Численные оценки, полученные для ударной машины типа СМУ300, показали, что при ходе пневмоцилиндра h = 200 мм можно получить по скорости соударения то же значение, что при свободном падении ударного стола с высоты 2000 мм.

Заключение

В статье приведены аналитические и численные оценки эффективности применения ускорителей, обоснована рациональность их использования для улучшения эксплуатационных характеристик и габаритных размеров пневматических машин, воспроизводящих многократные удары. На следующем этапе исследований можно перейти к решению таких задач, как оценка частоты следования ударов в различных режимах работы ударной машины, разработка методики определения настроек давлений в приводных пневмоцилиндрах, определение моментов переключения давлений и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. On the development of rotary calibration and testing equipment (2007) Proceedings of St. Petersburg State Technical University, No. 504. P. 217.

[2] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Tereshin, V.A., Khlebosolov, I.O. Shock Spectra in Non-linear Interactions. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 60-70.

[3] Popov A.N., Polishchuck M.N., Pulenets N.Y. Test Centrifuge Arrangement Analysis. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 139–151.

[4] ГОСТ РВ 20.57.305-98 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства, и оборудование. Методы испытаний на воздействие механических факторов.

[5] ГОСТ Р ИСО 8568-2010 Стенды ударные. Заявление и подтверждение характеристик.

[6] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.

[7] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.

[8] Bin W., Chengwu L., Jingjing W. (2017). The optimized algorithm for working parameters of the vertical impact testing machine. Paper presented at the ICEMI 2017 - Proceedings of IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2018-January, pp. 424-430.
[9] Попов А. Н., Полищук М.Н., Пуленец Н.Е. Моделирование импульса при ударных испытаниях. Современное машиностроение: Наука и образование: №8, 2019. С. 513-526.
[10] Polishchuck M.N, Popov A.N, Vasiliev A.K, Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021, pp. 219-230.
[11] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, pp. 86–96, 2022.
[12] Popov A.N., Vasiliev A.K., Shtreker D.S., Reshetov D.V., Bryanskiy A.A.. Shock machines for testing arctic robotics. IOP conference series: Earth and environmental science, SPb, 2020, p. 012124.
[13] Popov A.N., Polishchuck M.N., Vasiliev A.K. Method for reproducing shock acceleration in mechanical testing. International Review of Mechanical Engineering, 14(2), pp. 105-110.
[14] Официальный сайт компании «Дельтамэк»: [Электронный ресурс]. URL: https://www.deltamec.ru. (Дата обращения: 01.02.2022).
[15] Зеленковский В.В., Каптюх А.Н., Мороз А.Ф. Требования к создаваемым образцам вооружения, военной и специальной техники. Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. – 2018. – № 4(48). – С. 47-52.
[16] Вокин, Г.Г., Гуменюк А.М. Концептуальные основы обеспечения высокой эффективности испытаний элементов перспективных изделий ракетно-космической техники на основе интеллектуализации технологий, измерительных, аппаратно-программных и технических средств наземных испытательных комплексов. Информационно-технологический вестник. – 2021. – № 2(28). – С. 38-47.
[17] Rastegar J. A new class of high-G and long-duration shock testing machines. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, p. 10602.
[18] Официальный сайт компании «Dongling technologies»: [Электронный ресурс]. URL: https://www.donglingtest.ru. (Дата обращения: 01.02.2022).
[19] Douglas S., Al-Bassyiouni M., Dasgupta A. Simulation of drop testing at extremely high accelerations. Paper presented at the 2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2010.
[20] Официальный сайт компании «Benchmark»: [Электронный ресурс]. URL: https:// www.bench.com. (Дата обращения: 01.02.2022).

[21] Аллаяров У.Э., Макулов Р.Р., Абдрахманов Н.Х., Шабанова В.В. Повышение надежности компрессорного оборудования установки воздухоразделения. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2021. – № 5. – С. 19-33.
[22] Алисин В.В. Расчет ресурса и надежности работы торцевого уплотнения // Журнал передовых исследований в области естествознания. – 2019. – № 8. – С. 34-37.
[23] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. (2022). Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. Advances in Mechanical Engineering, 14(1).
[24] Barbour E., Pottie D.L. Adiabatic compressed air energy storage technology. Joule, 2021, 5(8), pp. 1914-1920.
[25] Официальный сайт компании «Lansmont Corporation» (США): [Электронный ресурс]. URL: https://www.lansmont.com (Дата обращения: 07.02.2022).
[26] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
[27] Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

A.N. Popov, M.N. Polishchuck, D.V. Reshetov

PNEUMATIC ACCELERATOR OF THE MECHATRONIC SHOCK MACHINE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The main factors determining the peak shock acceleration reproduced on shock machines are the speed of collision of the table on which the test device is fixed with the programmer and the properties of the programmer itself. The impact velocity is determined mainly by the height of the free fall drop of the table and is limited by the overall dimensions of the machine. The duration of the pulse depends on the rigidity of the programmer. However, with constant rigidity, it is possible to increase the pulse duration only by increasing the collision speed of the table and the programmer. One of the well-known ways to increase the speed of impact is additional acceleration of the table, in particular, with the help of a pneumatic accelerator. The paper considers various options for the implementation of a pneumatic accelerator in relation to multiple shock machines. A study of the effectiveness of their use with the help of analytical and computer models has been conducted. The obtained theoretical estimates are confirmed by the results of experimental studies.

Key words: shock machine, shock velocity, pneumatic accelerator, computer model, experimental verification.

REFERENCES

[1] Evgrafov A.N., Karazin V.I., Khlebosolov I.O. On the development of rotary calibration and testing equipment (2007) Proceedings of St. Petersburg State Technical University, No. 504. P. 217.
[2] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Tereshin, V.A., Khlebosolov, I.O. Shock Spectra in Non-linear Interactions. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 60-70.
[3] Popov A.N., Polishchuck M.N., Pulenets N.Y. Test Centrifuge Arrangement Analysis. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 139–151.
[4] GOST RV 20.57.305-98. Comprehensive quality control system. Apparatus, instruments, devices, and equipment. Test methods for the impact of mechanical factors, Moscow, STANDARTINFORM Publ, 1998. – 53 p.
[5] GOST R ISO 8568-2010. Shock stands. Statement and confirmation of characteristics. Moscow, STANDARTINFORM Publ, 2011. -23 p.
[6] Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5-th Edition. McGraw-Hill Professional, 2002. – 1457 p.
[7] Vit Babuška, Carl Sisemore. The Science and Engineering of Mechanical Shock – Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 369 p.
[8] Bin W., Chengwu L., Jingjing W. (2017). The optimized algorithm for working parameters of the vertical impact testing machine. Paper presented at the ICEMI 2017 - Proceedings of IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2018-January, pp. 424-430.
[9] Popov A. N., Polishchuk M. N., Pulenets N. E. Simulation of an impulse during shock tests//Modern mechanical engineering. Science and education. No. 7, 2018 –783-796p.
[10] Polishchuck M.N, Popov A.N, Vasiliev A.K, Reshetov D.V. Research of Air Suspension of Shock Machine. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021, pp. 219-230.
[11] Polishchuck M.N., Popov A.N., Reshetov D.V. Mathematical model of shock machine. Advances in Mechanical Engineering, LNME, pp. 86–96, 2022.
[12] Popov A.N., Vasiliev A.K., Shtreker D.S., Reshetov D.V., Bryanskiy A.A. Shock machines for testing arctic robotics. IOP conference series: Earth and environmental science, SPb, 2020, p. 012124.
[13] Popov A.N., Polishchuck M.N., Vasiliev A.K. Method for reproducing shock acceleration in mechanical testing. International Review of Mechanical Engineering, 14(2), pp. 105-110.

[14] Website of Deltamec: [Electronic resource]. URL: https://www.deltamec.ru. (Accessed: 01.02.2022).
[15] Zelenkovskiy V.V., Kaptyukh A.N., Moroz A.F. Requirements for the created models of weapons, military and special equipment. Scientific Bulletin of the Volsk Military Institute of Material Support: Military Scientific Journal. – 2018., No. 4 (48). – pp. 47-52.
[16] Vokin, G.G., Gumenyuk A.M. Conceptual bases for ensuring high efficiency of testing elements of promising products of rocket and space technology based on the intellectualization of technologies, measuring, hardware, software and technical means of ground test complexes. Information technology bulletin. - 2021. - No. 2(28). - pp. 38-47.
[17] Rastegar J. A new class of high-G and long-duration shock testing machines. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, p. 10602.
[18] Website of Dongling technologies: [Electronic resource]. URL: https://www.donglingtest.ru. (Accessed: 01.02.2022).
[19] Douglas S., Al-Bassyiouni M., Dasgupta A. Simulation of drop testing at extremely high accelerations. Paper presented at the 2010 11th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2010.
[20] Website of Benchmark: [Electronic resource]. URL: https:// www.bench.com. (Accessed: 01.02.2022).
[21] Allayarov U.E., Makulov R.R., Abdrakhmanov N.Kh., Shabanova V.V. Improving the reliability of the compressor equipment of the air separation unit. Electronic scientific journal "Oil and Gas Business". - 2021. - No. 5. - pp. 19-33.
[22] Alisin V.V. Calculation of the resource and reliability of the mechanical seal // Journal of advanced research in the field of natural sciences. - 2019. - No. 8. - pp. 34-37.
[23] Yi T., Jin C., Hong J., Liu Y. (2022). Layout analysis of compressed air and hydraulic energy storage systems for vehicles. Advances in Mechanical Engineering, 14(1).
[24] Barbour E., Pottie D.L. Adiabatic compressed air energy storage technology. Joule, 2021, 5(8), pp. 1914-1920.
[25] Website of Lansmont Corporation: [Electronic resource]. URL: https://www.lansmont.com. (Accessed: 01.02.2022).
[26] Christian Lalanne. Mechanical Shock: monograf. ISTE Ltd and John Wiley&Sons Inc, 2009. – 367 p.
[27] Hertz, E.V., Kreinin, G.V. Dynamics of pneumatic actuators of automatic machines. Mechanical engineering. 1964. 236 p.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 004.021

В.А. Чеканин[1], А.В. Чеканин[2]

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ МНОГОГРАННИКОВ ДЛЯ КОМПОНОВКИ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

[1]Владислав Александрович Чеканин, д.т.н., доцент
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)972-9480, E-mail: vladchekanin@rambler.ru

[2]Александр Васильевич Чеканин, д.т.н., профессор
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
Россия, Москва
Тел.: (499)972-9480, E-mail: av.chekanin@stankin.ru

Аннотация

Статья посвящена исследованию и систематизации методов, обеспечивающих формирование ортогональных многогранников различной размерности для дискретного представления объектов и контейнеров сложной формы в задачах раскроя и упаковки. Рассмотрены методы создания ортогональных многогранников на основе ряда теоретико-множественных операций, аналитического моделирования с использованием набора функций и операций отношения, а также вокселизации плоских и объёмных моделей. Предложен алгоритм создания контейнера в форме ортогонального многогранника на основе заданной векторной модели, который делает возможным решение задачи компоновки объектов внутри контейнера произвольной геометрии.

Ключевые слова: задача упаковки, компоновка, ортогональный многогранник, теоретико-множественные операции, вокселизация.

Введение

Задачи раскроя и упаковки заключаются в поиске наиболее рациональной схемы размещения (компоновки) заданных объектов в ограниченном объёме. Задачи оптимизированного размещения простейших геометрических объектов в форме отрезков, прямоугольников и параллелепипедов являются классическими NP-трудными задачами дискретной оптимизации, для которых отсутствуют точные методы решения полиномиальной сложности [1]. Очевидно, что при размещении объектов нерегулярной формы сложность решаемых задач будет только повышена. Необходимость проектирования компоновки объектов произвольной геометрии возникает при решении задач промышленного раскроя материалов, моделировании композиционных материалов в порошковой металлургии, планировании схем размещения груза и технологического оборудования, компоновки деталей на платформе 3D-принтера [2–6].

Среди различных методов геометрического конструирования нерегулярной упаковки наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании phi-функций для аналитического описания объектов и построении годографа вектор-функции плотного размещения [7–11]. При использовании этих методов предварительно осуществляется декомпозиция объектов на простые фигуры, для которых существуют готовые математические модели описания с кусочно-гладкими границами или требуется разработка новых моделей [12, 13]. Для невыпуклых многогранников нет возможности построения phi-функций, поэтому возникает необходимость в их декомпозиции на набор выпуклых многогранников. Очевидно, что с повышением степени детализации формы размещаемых объектов происходит рост сложности формируемой математической модели. Указанные проблемы имеют место при описании объектов, заданных в векторном (полигональном) виде.

Дискретное представление объектов произвольной формы делает возможным их описание с заданной степенью детализации [14]. Для быстрого решения задач компоновки объектов сложной формы разработаны эффективные алгоритмы, основанные на использовании модели потенциальных контейнеров для точного описания свободного пространства внутри упаковки [15] и применении алгоритмов размещения ортогональных многогранников произвольной размерности [15, 16]. Под ортогональным многогранником (ОМ) понимается набор ортогональных объектов (прямоугольников в плоской задаче и параллелепипедов в трёхмерном случае) с фиксированным положением друг относительно друга, которые рассматриваются в качестве единого составного неразборного объекта.

Методы

1. Создание ОМ на основе теоретико-множественных операций

Для создания ОМ на основе некоторого заданного набора ортогональных объектов могут быть применены теоретико-множественные операции сложения, вычитания и пересечения (рис. 1).

Операции сложения и вычитания ортогональных объектов произвольной размерности подробно описаны в статье [17]. Операция сложения на основе множества ортогональных объектов (объекты могут как перекрывать друг друга, так и не иметь общих точек) позволяет сформировать ОМ, представленный набором неперекрывающих друг друга ортогональных объектов, которые занимают то же пространство, что и исходное множество объектов. Операция вычитания работает аналогичным образом за исключением того, что получаемый ОМ не будет включать области, которые в исходном наборе описываются ортогональными объектами, указанными в качестве вычитаемых. В случае совместного задания операций сложения и вычитания первоначально применяется операция вычитания, после чего к полученному набору ортогональных объектов применяется операция сложения. Операция пересечения позволяет получить новый ОМ, точки которого принадлежат одновременно всем объектам, участвующим в данной операции. В задачах раскроя и упаковки операция пересечения используется как при формировании новых объектов, так и при поиске области допустимого размещения ОМ [16].

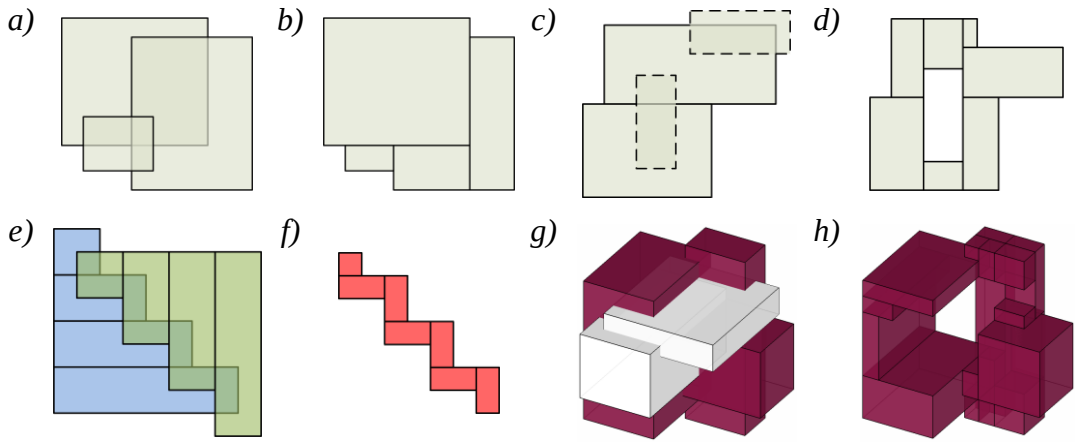


Рис. 1. Применение теоретико-множественных операций к ортогональным объектам для формирования ОМ: *a)* объекты, участвующие в операции сложения; *b)* результат применения операции сложения; *c)* объекты, участвующие в операции вычитания (вычитаемые объекты выделены пунктирными линиями); *d)* результат применения операции вычитания; *e)* объекты, участвующие в операции пересечения; *f)* результат применения операции пересечения; *g)* совместное применение операций сложения и вычитания к трёхмерным объектам (вычитаемые объекты показаны белым цветом); *h)* сформированный трёхмерный ОМ

2. Аналитическое формирование ОМ

Метод аналитического формирования обеспечивает создание ОМ посредством вокселизации геометрического объекта, заданного набором функций. В разработанной программе «Packer» [16] для аналитического описания формы объектов реализована возможность задания набора степенных функций вида (для плоских объектов в функции будет отсутствовать третье слагаемое):

$$f(x,y,z)=\frac{k_{1x}}{k_{2x}}(x-x_0)^{N_x}+\frac{k_{1y}}{k_{2y}}(y-y_0)^{N_y}+\frac{k_{1z}}{k_{2z}}(z-z_0)^{N_z}-C\ ,$$

где k_{1x}, k_{2x}, k_{1y}, k_{2y}, k_{1z}, k_{2z}, N_x, N_y, N_z, C – некоторые целые числа, при этом $k_{2x}\neq 0$, $k_{2y}\neq 0$, $k_{2z}\neq 0$, $N_x\geq 1$, $N_y\geq 1$, $N_z\geq 1$. Для каждой функции f задаётся операция отношения, которая используется для определения принадлежности вокселов геометрической области, задаваемой аналитически [18]. При этом возможно задание одной из пяти операций отношения:

- $f=0$ для получения набора вокселов, находящихся на границе аналитически описанной области;
- $f\leq 0$ – внутри области, включая её границы;
- $f<0$ – внутри области, исключая её границы;
- $f>0$ – снаружи области, исключая её границы;
- $f\geq 0$ – снаружи области, включая её границы.

Последние две операции отношения ($f>0$ и $f\geq 0$) могут быть использованы, в частности, для получения ОМ геометрических ограничений, применение которых обеспечивает формирование непрямоугольного контейнера.

На рис. 2 представлены различные ОМ, полученные на основе функции $f(x,y)=2(x-25)^2+(y-25)^2/2-300$, $x\in[0;50]$, $y\in[0;50]$ в результате применения различных операций отношения в процессе вокселизации.

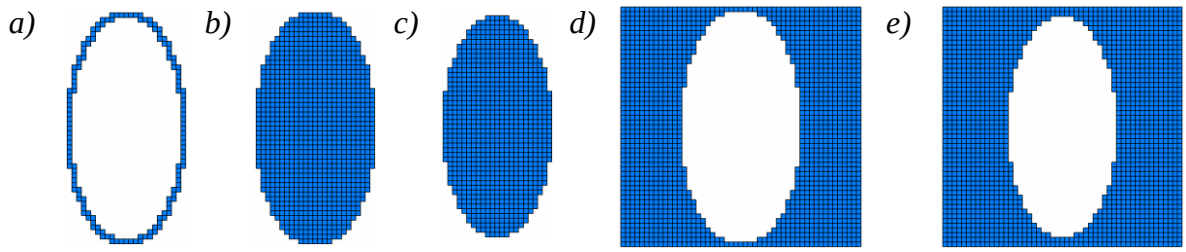


Рис. 2. Воксельные ОМ, полученные на основе аналитической функции *f*:
a) $f=0$ (144 воксела); *b)* $f\leq 0$ (1009 вокселов); *c)* $f<0$ (865 вокселов);
d) $f>0$ (1592 воксела); *e)* $f\geq 0$ (1736 вокселов)

Для создания ОМ, состоящего из вокселов размером v, осуществляется последовательный проход по всем координатам $x \in [X_1; X_2]$, $y \in [Y_1; Y_2]$, $z \in [Z_1; Z_2]$ (X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1 и Z_2 – некоторые целые числа, задающие область определения функции f) с шагом v, при этом для каждой комбинации значений $\{x, y, z\}$ выполняется проверка принадлежности воксела, расположенного в точке с координатами $\{x, y, z\}$, геометрической области, задаваемой функцией f. При создании двухмерного воксельного объекта осуществляется проход по координатам $x \in [X_1; X_2]$ и $y \in [Y_1; Y_2]$, а в одномерном случае – проход только по координатам $x \in [X_1; X_2]$.

В разработанной программе «Packer» реализованы два способа определения принадлежности воксела, расположенного в точке $\{x, y, z\}$, геометрической области, задаваемой функцией f.

Первый способ (быстрый) основан на однократной проверке выполнения истинности результата применения операции отношения к функции f в каждой точке с координатами $\{x, y, z\}$, выбираемой с шагом v для всей области определения данной функции.

Второй способ (точный) основан на анализе всех точек, расположенных в углах рассматриваемого воксела. Для воксела с координатами $\{x, y, z\}$ выполняется проверка истинности неравенств $f \le 0$ и $f \ge 0$ для каждой из восьми его узловых точек $\{x \pm v/2, y \pm v/2, z \pm v/2\}$ в трёхмерном случае и четырёх точек $\{x \pm v/2, y \pm v/2\}$ в двухмерном случае. Перед проверкой этих неравенств создаются две логические переменные $\alpha = 0$ и $\beta = 0$. Переменная α истинна, если хотя бы для одной узловой точки воксела выполняется неравенство $f \le 0$, а переменная $\beta = 1$ в случае, если хотя бы для одной точки воксела справедливо неравенство $f \ge 0$. В зависимости от операции отношения, применяемой к функции f, используются следующие правила включения воксела с координатами $\{x, y, z\}$ в формируемый ОМ:

- при $f = 0$ должно быть истинно логическое выражение $\alpha \wedge \beta$;
- при $f \le 0$ должно быть истинно логическое выражение $\overline{\beta} \vee (\alpha \wedge \beta)$;
- при $f < 0$ должно быть истинно логическое выражение $\overline{\beta}$;
- при $f > 0$ должно быть истинно логическое выражение $\overline{\alpha}$;
- при $f \ge 0$ должно быть истинно логическое выражение $\overline{\alpha} \vee (\alpha \wedge \beta)$.

В качестве примера на области определения $x \in [0; 20]$, $y \in [0; 20]$, $z \in [0; 20]$ рассмотрим функцию $f(x, y, z) = \frac{1}{5}(x-10)^2 + \frac{1}{5}(y-10)^2 - \frac{5}{2}z$.

Сформированные на основе этой функции ОМ представлены на рис. 3. Из рис. 3, *a* видно, что быстрый способ может быть использован лишь для оценки корректности задания функции и правильности выбранных операций отношения, однако при этом он не позволяет получить ОМ, состоящий из вокселов, непрерывно заполняющих всю границу области, заданной в аналитическом виде. Этого недостатка лишён точный способ (рис. 3, *b*), при этом очевидно, что скорость его работы будет ниже, поэтому он применяется на финальном этапе создания ОМ на основе заданного набора функций.

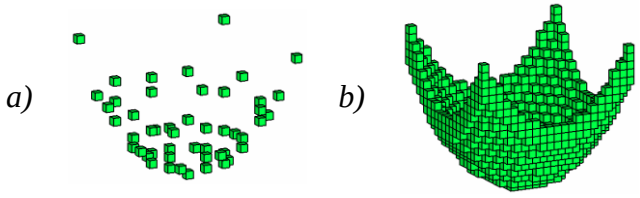


Рис. 3. Трёхмерные ОМ, полученные различными способами:
a) быстрый способ, $f = 0$ (49 вокселов); *b)* точный способ, $f = 0$ (1173 вокселов)

Применение теоретико-множественных операций к ОМ, полученным аналитическим методом, позволяет создавать объекты сложной формы. На рис. 4, *c* представлен трёхмерный ОМ сформированный в результате применения операции пересечения к двум ОМ, аналитически заданных двумя функциями $4x^2 + 2y^2 - 3(z-10)^2 - 40 \ge 0$ (рис. 4, *a*) и $\frac{1}{2}x^2 + \frac{2}{3}y^2 + \frac{1}{5}z^2 - 80 \le 0$ (рис. 4, *b*) на области определения $x \in [-20;20]$, $y \in [-20;20]$, $z \in [-20;20]$.

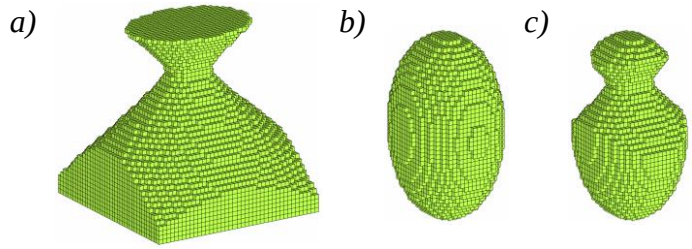
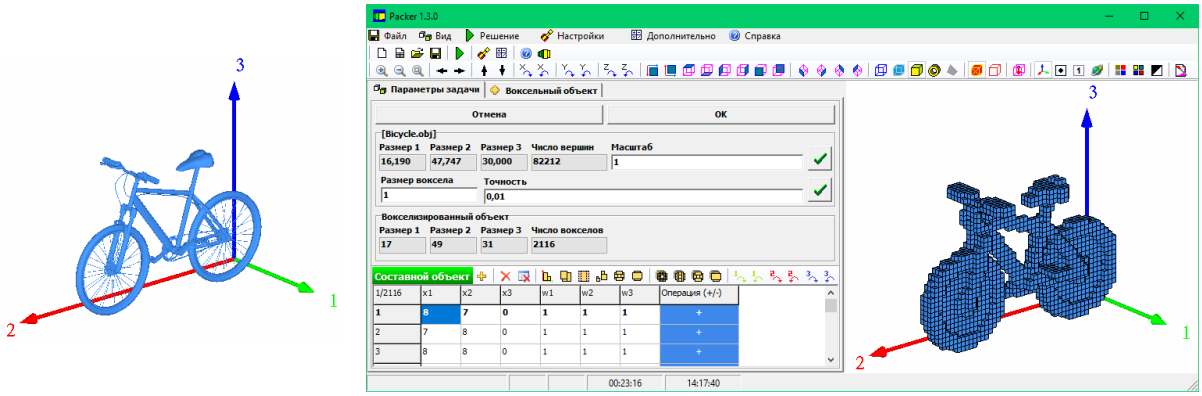


Рис. 4. Аналитическое формирование ОМ на основе нескольких функций:
a) первый ОМ; *b)* второй ОМ; *c)* результат применения операции пересечения

3. Формирование ОМ в результате вокселизации векторной модели

Объекты, используемые при решении реальных задач раскроя и упаковки, зачастую имеют сложную геометрию, которая не может быть удовлетворительно описана небольшим числом базовых геометрических фигур. Для таких объектов в программном обеспечении «Packer» разработан модуль вокселизации векторных моделей объектов, который поддерживает файлы плоских моделей в формате DXF и файлы

полигональных моделей в формате OBJ. На рис. 5 в качестве примера представлен ОМ, полученный в результате вокселизации геометрически сложной векторной модели велосипеда.



a) *b)*

Рис. 5. Вокселизация полигональной модели:
a) исходная модель объекта; *b)* сформированный воксельный ОМ

ОМ, получаемые в результате вокселизации, состоят из большого числа вокселов, что негативным образом сказывается на скорости формирования компоновки. Для качественного снижения числа размещаемых объектов разработан алгоритм декомпозиции ОМ, подробно описанный в статье [19], позволяющий как минимум на порядок повысить скорость размещения вокселизированных объектов.

Для получения контейнера нерегулярной формы предлагается преобразовывать прямоугольник (параллелепипед в трёхмерном случае) в ОМ посредством размещения в нём набора геометрических объектов-ограничений, которые должны быть заданы таким образом, чтобы при использовании полученного контейнера формируемая в нём упаковка гарантированно не выходила за границы заданной векторной модели.

Разработанный алгоритм формирования контейнера сложной формы на основе векторной модели содержит следующие шаги (для всех формируемых ОМ выполняется их декомпозиция с целью минимизации числа составляющих ортогональных объектов).

Шаг 1. Создать контейнер C в форме прямоугольника (параллелепипеда), описанного вокруг заданной модели.

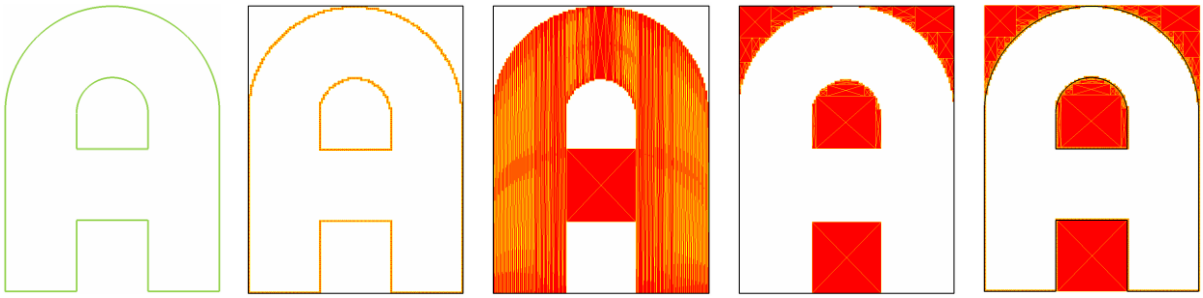
Шаг 2. Выполнить вокселизацию контура модели, в результате которой будет получен ОМ контура, обозначаемый через O_1.

Шаг 3. Заполнить вокселами все пустоты внутри ОМ O_1, в результате чего после будет получен ОМ, обозначаемый через O_2.

Шаг 4. Применить к контейнеру C операцию вычитания с ОМ O_2, в результате чего в нём будет сформирован ОМ геометрических ограничений O_3.

Шаг 5. Выполнить операцию сложения ОМ геометрических ограничений O_3 с ОМ контура O_1, в результате чего внутри контейнера будет сформирован окончательный ОМ геометрических ограничений.

Пример формирования непрямоугольного контейнера на основе векторной модели, заданной в формате DXF, представлен на рис. 6.



a) *b)* *c)* *d)* *e)*

Рис. 6. Формирование контейнера на основе векторной модели:
a) векторная модель контейнера; *b)* ОМ контура O_1; *c)* ОМ O_2; *d)* ОМ O_3; *e)* результат

Результаты

В настоящей статье описаны различные методы формирования ОМ для последующего их использования в задачах раскроя и упаковки объектов произвольной геометрии. Все представленные методы с обобщением по размерности ОМ программно реализованы в авторском прикладном программном обеспечении «Packer», предназначенном для оптимизации распределения ресурсов произвольной формы и различной размерности (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664360, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06 ноября 2019 г.).

Обсуждение

Представление размещаемых объектов в виде ОМ обеспечивает возможность перехода от геометрически сложной задачи упаковки объектов нерегулярной формы к задаче компоновки дискретизированных элементов, для решения которой существуют быстрые алгоритмы размещения, основанные на использовании модели потенциальных контейнеров.

Предложенный алгоритм формирования ОМ геометрических ограничений контейнера на основе заданной векторной модели делает возможным постановку задачи упаковки объектов внутри контейнера произвольной формы в виде более простой задачи упаковки набора ОМ, что позволяет качественно повысить скорость решения задач, которые при использовании методов размещения, основанных на векторном описании

объектов и контейнера, являются чрезвычайно трудными и зачастую оказываются неразрешимыми из-за значительных затрат временных и вычислительных ресурсов.

На рис. 7 представлен пример упаковки набора ОМ внутри контейнера с геометрическими ограничениями. Данное решение получено программным обеспечением «Packer» (использовалась персональная ЭВМ на базе процессора Intel Core i5-8400 с тактовой частотой 2,8 ГГц и ОЗУ объёмом 8 ГБ) за 15 с в результате применения разработанного алгоритма определения областей допустимого размещения ОМ [16].

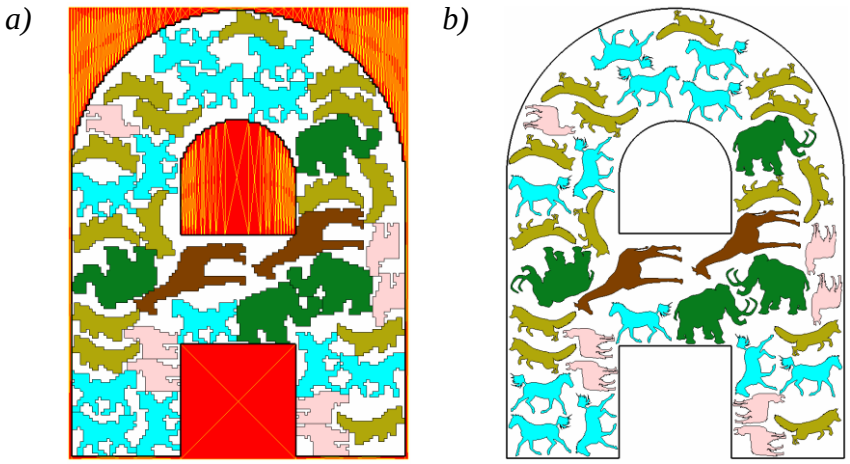


Рис. 7. Решение задачи упаковки объектов сложной геометрии внутри непрямоугольного контейнера: *a)* схема размещения набора ОМ внутри контейнера с геометрическими ограничениями; *b)* сформированная упаковка

Заключение

Представленные в работе методы реализуют принципиально разные подходы к созданию новых ОМ, предназначенных для решения оптимизационных задач компоновки объектов сложной формы.

Метод формирования новых ОМ на основе теоретико-множественных операций предназначен, в первую очередь, для ручного создания ОМ, характеризующихся относительно несложной геометрией (например, при проектировании компоновок печатных плат, схем поэтажных планировок помещений). Реализованный метод аналитического формирования ОМ наилучшим образом применим для создания ОМ, представленных как базовыми геометрическими фигурами (в форме круга, треугольника, сферы, цилиндра, конуса, призмы и пр.), так и более сложными фигурами, полученных в результате применения набора теоретико-множественных операций к базовым геометрическим фигурам. Метод вокселизации является универсальным, поскольку он позволяет получать ОМ на основе плоских и объёмных моделей произвольной геометрии.

Перспективным направлением последующего развития исследований является разработка алгоритмов формирования ОМ на основе объектов произвольной геометрии, формально заданных с применением математического аппарата R-функций В.Л. Рвачёва [20].

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] 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.

[3] 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. P. 803-822.

[4] Byholm T., Toivakka M., Westerholm J. Effective packing of 3-dimensional voxel-based arbitrarily shaped particles // Powder Technology. 2009. Vol. 196. No. 2. P. 139-146.

[5] Araújo L.J., Özcan E., Atkin J.A., Baumers M. Analysis of irregular three-dimensional packing problems in additive manufacturing: a new taxonomy and dataset // International Journal of Production Research. 2019. Vol. 57. No. 18. P. 5920-5934.

[6] Che Y., Hu K., Zhang Z., Lim A. Machine scheduling with orientation selection and two-dimensional packing for additive manufacturing // Computers & Operations Research. 2021. Vol. 130. P. 105245.

[7] Стоян Ю.Г., Семкин В.В., Чугай А.М. Моделирование плотной упаковки 3D-объектов // Кибернетика и системный анализ. 2016. № 52 (2). С. 137-146.

[8] Верхотуров М.А., Верхотурова Г.Н., Данилов К.В., Ягудин Р.Р. Упаковка сложных трёхмерных объектов в прямоугольный контейнер на базе дискретно-логического представления информации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4 (2). С. 378-383.

[9] Ягудин Р.Р. Оптимизация компоновки трёхмерных геометрических объектов на основе годографа вектор-функции плотного размещения // Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 21. № 3. С. 206-217.

[10] Romanova T., Bennell J., Stoyan Y., Pankratov A. Packing of concave polyhedra with continuous rotations using nonlinear optimization // European Journal of Operational Research. 2018. Vol. 268. No. 1. P. 37-53.

[11] Witteman M., Deng Q., Santos B.F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294. No. 1. P. 365-376.
[12] Lebedev P.D., Ushakov V.N., Uspenskii A.A. Numerical methods for constructing suboptimal packings of nonconvex domains with curved boundary // Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 681-692.
[13] Birgin E.G., Lobato R.D. A matheuristic approach with nonlinear subproblems for large-scale packing of ellipsoids // European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 272. No. 2. P. 447-464.
[14] Тун Е.В., Маркин Л.В. Дискретные модели обеспечения зон обслуживания и автоматизированной компоновки летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 1-23.
[15] 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.
[16] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Solving the Problem of Dense Packing of Objects of Complex Geometry // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. P. 108-116.
[17] Чеканин В.А., Чеканин А.В. Алгоритмы формирования ортогональных многогранников произвольной размерности в задачах раскроя и упаковки // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 3 (46). С. 126-130.
[18] Tolok A.V., Tolok N.B. Mathematical Programming Problems Solving by Functional Voxel Method // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79. No. 9. P. 1703-1712.
[19] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Solving the problem of decomposition of an orthogonal polyhedron of arbitrary dimension // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. P. 52-59.
[20] Максименко-Шейко К.В., Толок А.В., Шейко Т.И. R-функции в аналитическом проектировании с применением системы «РАНОК» // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 4. С. 139-151.

V.A. Chekanin[1], A.V. Chekanin[2]

ANALYSIS OF METHODS FOR THE FORMATION OF ORTHOGONAL POLYHEDRA FOR THE PROBLEMS OF PACKING OBJECTS OF COMPLEX SHAPE

[1,2]Moscow State University of Technology «STANKIN», Russia

Abstract

The article is devoted to the analysis and systematization of methods that ensure the formation of orthogonal polyhedra of arbitrary dimension for the discrete representation of objects and containers of complex shape in cutting and packing problems. Methods of creating orthogonal polyhedra based on a number of set-theoretic operations, analytical modeling using a set of functions and relation operations, as well as voxelization of flat and volumetric models are considered. An algorithm for creating a container in the form of an orthogonal polyhedron based on a given vector model is proposed, which makes it possible to solve the problem of packing objects inside a container of arbitrary geometry.

*Key words:*packing problem, layout, orthogonal polyhedron, set-theoretic operations, voxelization.

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] 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.)

[3] 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.

[4] Byholm T., Toivakka M., Westerholm J. Effective packing of 3-dimensional voxel-based arbitrarily shaped particles. Powder Technology. 2009. Vol. 196. No. 2. pp. 139-146.

[5] Araújo L.J., Özcan E., Atkin J.A., Baumers M. Analysis of irregular three-dimensional packing problems in additive manufacturing: a new taxonomy and dataset. International Journal of Production Research. 2019. Vol. 57. No. 18. pp. 5920-5934.

[6] Che Y., Hu K., Zhang Z., Lim A. Machine scheduling with orientation selection and two-dimensional packing for additive manufacturing. Computers & Operations Research. 2021. Vol. 130. pp. 105245.

[7] Stoyan Y.G., Semkin V.V., Chugay A.M. Modelirovanie plotnoi upakovki 3D-ob"ektov. Kibernetika i Sistemnyi Analiz. 2016. Vol. 52 (2). pp. 137-146. (rus.)

[8] Verkhoturov M.A., Verkhoturova G.N., Danilov K.V., Yagudin R.R. The 3D Objects Dense Packing Problem into a Parallelepiped container on Base

Discrete-Logical Representation. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2014. Vol. 16. No. 4 (2). pp. 378-383. (rus.)
[9] Yagudin R.R. Optimizatsiya komponovki trekhmernykh geometricheskikh ob"ektov na osnove godografa vektor-funktsii plotnogo razmeshcheniya. Inzhenernyi vestnik Dona. 2012. Vol. 21. No. 3. pp. 206-217. (rus.)
[10] Romanova T., Bennell J., Stoyan Y., Pankratov A. Packing of concave polyhedra with continuous rotations using nonlinear optimization. European Journal of Operational Research. 2018. Vol. 268. No. 1. pp. 37-53.
[11] Witteman M., Deng Q., Santos B.F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem. European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294. No. 1. pp. 365-376.
[12] Lebedev P.D., Ushakov V.N., Uspenskii A.A. Numerical methods for constructing suboptimal packings of nonconvex domains with curved boundary. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2020. Vol. 14. No. 4. pp. 681-692.
[13] Birgin E.G., Lobato R.D. A matheuristic approach with nonlinear subproblems for large-scale packing of ellipsoids. European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 272. No. 2. pp. 447-464.
[14] Tun Ye W., Markin L.V. Diskretnye modeli obespecheniya zon obsluzhivaniya i avtomatizirovannoi komponovki letatel'nykh apparatov. Trudy MAI. 2017. Vol. 96. pp. 1-23. (rus.)
[15] 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.).
[16] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Solving the Problem of Dense Packing of Objects of Complex Geometry. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. pp. 108-116.
[17] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Algorithms for the formation of orthogonal polyhedrons of arbitrary dimension in the cutting and packing problems. Vestnik MSTU «STANKIN». 2018. Vol. 3. pp. 126-130. (rus.)
[18] Tolok A.V., Tolok N.B. Mathematical Programming Problems Solving by Functional Voxel Method. Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79. No. 9. pp. 1703-1712.
[19] Chekanin V.A., Chekanin A.V. Solving the problem of decomposition of an orthogonal polyhedron of arbitrary dimension. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. pp. 52-59.
[20] Maximenko-Sheiko K.V., Tolok A.V., Sheiko T.I. R-Functions in analytical design with the use of the RANOK system. Vestnik «MSTU «STANKIN». 2010. No. 4. pp. 139-151. (rus.)

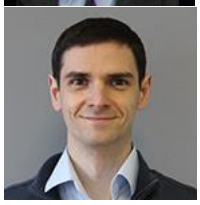
ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.792.052: 539.4.014.11

К. П. Манжула[1], А. Ю. Шлепетинский[2]

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТАВРОВОМ СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ



[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

Исследуются инженерные зависимости для расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений в тавровых сварных соединениях. На основе сравнения рассматриваемых зависимостей с результатами исследований соединений методом конечного элемента установлены формулы более и менее точно определяющие теоретический коэффициент концентрации напряжений в заданном диапазоне варьирования геометрических параметров.

Ключевые слова: тавровое сварное соединение, теоретический коэффициент концентрации напряжений, метод конечных элементов, осевое растяжение и изгиб, инженерные зависимости.

Введение

Работы, относящиеся непосредственно к концентрации напряжений в тавровых сварных соединениях, начинаются с 1975 г. и продолжаются по настоящее время [1-19]. Цель этих работ – получить инженерные или полуинженерные зависимости для оценки теоретических коэффициентов концентрации напряжений (ТККН) K_t в зависимости от геометрических

параметров исполнения сварного соединения. Число влияющих геометрических параметров варьируется в зависимостях, как правило, от трех до пяти, но также большое значение на применимость зависимостей имеет рассматриваемый диапазон изменения этих параметров. Инженерные зависимости K_t от геометрии исполнения сварного соединения важны при анализе усталостной прочности сварных конструкций, испытывающих циклическое нагружение, к которым относятся корпуса судов, строения на шельфе, машиностроительные и строительные конструкции.

В настоящей работе поставлена цель проанализировать имеющиеся в литературе расчетные зависимости для определения ТККН, с учетом работ российских исследователей, как правило, не отражаемых в зарубежной литературе, выявить наиболее точные и оптимально приемлемые для инженерных расчетов с учетом ограничений, наложенных на диапазоны варьирования их геометрических параметров. Так как диапазоны варьирования параметров задаются в относительных величинах, то изучалось достаточность такого определения без учета их абсолютных величин.

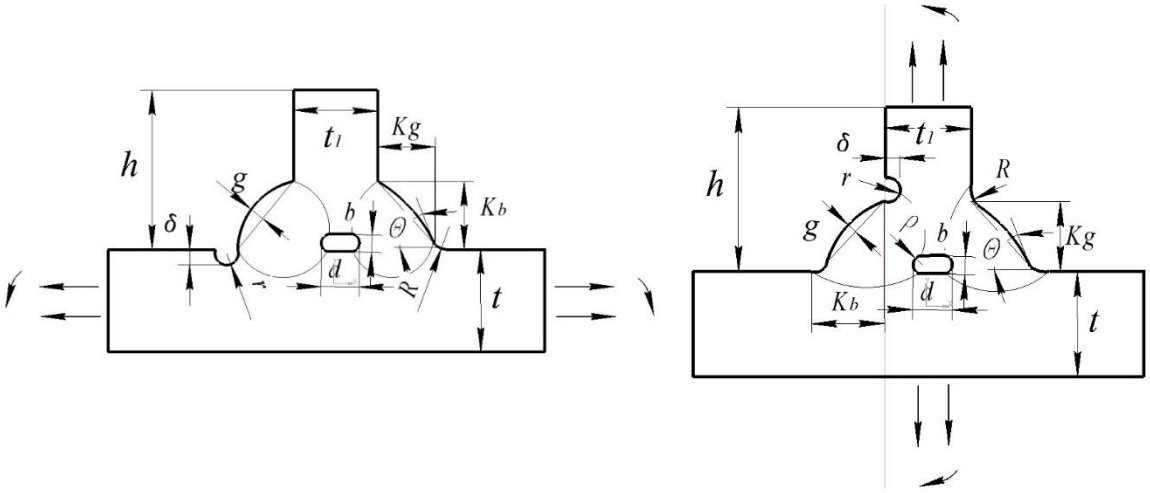
Методы

Концентрация напряжений в тавровых сварных соединениях первоначально изучалась на увеличенных моделях с использованием тензометрирования или методом фотоупругости на оптически активных моделях. Первые аналитические решения Шиманского Ю.А., Афанасьева Н.Н. относятся к концентрации напряжений в полосе с выступом, более поздние решения получены с использованием математического аппарата конформных отображений или метода граничных элементов [8]. С развитием метода конечных элементов (МКЭ) все исследования стали проводиться этим методом. Расчетные зависимости ТККН, как правило, являются результатом обработки большого числа вычислительных экспериментов при варьировании значений геометрических параметров. Диапазоны варьирования геометрических параметров у различных авторов определяются типом и назначением рассматриваемых конструкций или размером факторного эксперимента.

Инженерный вид зависимостей определяется применяемым математическим аппаратом обработки массива экспериментальных данных, чаще всего им является регрессионный анализ в сочетании с методом наименьших квадратов. ТККН K_t определяется как отношение максимального значения напряжения σ_{max} в зоне концентратора к среднему напряжению σ_n в сечении.

Исследуемые расчетные зависимости

В стандартах РФ на сварку геометрия таврового соединения описывается толщинами соединяемых элементов t, t_1, и катетами швов K_b, K_g. В зарубежных стандартах таких как, например, Din EN ISO 5817 в качестве контролируемых параметров указывается усиление g и ширина шва по гипотенузе вписанного треугольника. Полное число геометрических параметров, которыми описывается тавровое сварное соединение, показано на рис.1. Соединение может иметь непровар, вследствие неполного проплавления, характеризуемый длиной d, высотой b. Вершина непровара может описываться радиусом, равным b/2 или стремиться к минимальному радиусу, близкому к трещине.



а) б)

Рис. 1. Параметрическая модель таврового сварного соединения: а) – при нагружении по неразрезному элементу; б) - при нагружении по привариваемому элементу

При нагружении растяжением или изгибом по схеме, показанной на рис.1, а наибольшая концентрация напряжений имеет место в зоне радиуса *R* перехода от основного металла к наплавленному, при наличии подреза - в зоне радиуса *r*. При нагружении соединения по привариваемому элементу (рис.1, б) набольшая концентрации напряжений имеет место в зонах радиусов *R* или *r* привариваемого элемента, а также в непроваре, если он есть.

Оценке концентрации напряжений в вершине непровара посвящено незначительное число работ [15-18 и др.]. Концентрация напряжений в непроваре имеет место в зоне радиуса ρ при силовом нагружении, изображенном на рис.1, б. Некоторую особенность в оценке концентрации напряжении в этой зоне имеют тавровые соединения труб [18 и др.]. Наибольшее число зависимостей K_t получено для зоны сопряжения

основного металла с наплавленным. Ниже представлены такие зависимости K_t в хронологическом порядке.

В данной работе рассматриваются соединения с полным проплавлением корня шва, то есть при отсутствии непроваров (параметры *b*, *d*, ρ), а также при отсутствии подрезов (параметры *r*, δ) . Представление зависимостей излагается в хронологическом порядке, что показывает меняющиеся возможности проведения исследовательского эксперимента и аппарата обработки массивов данных.

Большинство работ японских исследователей основывается на общем виде зависимости, полученной Nishida методом фотоупругости для полосы с выступами.

Одна из первых зависимостей K_t применительно к тавровым соединениям была получена Kawai, Koibuchi (1975) [1], которая имеет вид

$$K_t = 1 + \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \theta \sqrt{\frac{t}{K_g} + 1}\right)}{1 - exp\left(-0{,}45 \cdot \pi \sqrt{\frac{t}{K_g} + 1}\right)} \left[\frac{0{,}13 + 0{,}65\left(1 - \frac{R}{t}\right)^4}{\left(\frac{R}{t}\right)^{1/3}}\right] th\left(\frac{\left(\frac{2K_g}{t}\right)^{1/4}}{1 - \frac{R}{t}}\right), \qquad (1)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1,б), рекомендуемая область применения: *R/t* =0,02…0,2; K_g/t = 0,5…1,2; Θ = 30º…80º.

Mitsui и др. (1983) [2], также базируясь на исходной экспоненциальной формуле Nishida, получили зависимость

$$K_t = 1 + \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \theta \sqrt{\frac{t}{K_g} + 1}\right)}{1 - exp\left(-0{,}45 \cdot \pi \sqrt{\frac{t}{K_g} + 1}\right)} \left[0{,}19\left(\frac{R}{t}\right)^{-0{,}69} th\left(\frac{t1}{t} + 3\frac{R}{t}\right) cth\left(1 + 3\frac{R}{t}\right) th\left(100\,\frac{K_g}{t}\right)\right], \qquad (2)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1,б), рекомендуемая область применения *R/t* = 0,08…0,2; K_g/t = 0,5…1,2; Θ = 30º…80º.

Шрон (1983) [3] по результатам исследований методом фотоупругости и голографической интерферометрии моделей таврового соединения предложил зависимости

$$K_t = 1 + \sqrt{\frac{\left(\frac{t_1 + 2K_b}{t_1} - 1\right)t}{\left[\left(\frac{t_1 + 2K_b}{t_1}\right)^2 + 1{,}6\right]R}}\, sin\theta, \qquad (3)$$

нагрузка – растяжение (рис.1,б), рекомендуемая область применения: R/t = 0,02…0,2; K_b/t_1 = 0,5…1,2; Θ = 30º…60º;

$$K_t = 1 + \frac{0.3\left(\frac{t_1 + 2K_b}{t_1} - 1\right)^{0.2}}{\sqrt{R/t_1}} sin\theta, \qquad (4)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1,б), рекомендуемая область применения: R/t = 0,02…0,2; K_b/t_1 = 0,5…1,2; Θ = 30º…60º.

Ushirokawa и Nakayama (1983) [5] получили зависимости:

$$K_t = 1 + \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \sqrt{\frac{e}{2K_b}}(\pi - \theta)\right)}{1 - exp\left(-0{,}45 \cdot \pi \sqrt{\frac{e}{2K_b}}\right)} \left[\frac{K_b}{R} \cdot \frac{1}{2{,}8\frac{e}{t} - 2}\right]^{0{,}65}, \qquad (5)$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а);

$$K_t = 1 + \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \sqrt{\frac{e}{2K_b}}(\pi - \theta)\right)}{1 - exp\left(-0{,}45 \cdot \pi \sqrt{\frac{e}{2K_b}}\right)} 1{,}9 \sqrt{tanh\left(\frac{2t_1}{t + 2K_b} + \frac{2R}{t}\right)} \cdot$$
$$\cdot tanh\left(\frac{\left(\frac{2K_b}{t}\right)^{1/4}}{1 - \frac{R}{t}}\right) \frac{0{,}13 + 0{,}65\left(1 - \frac{R}{t}\right)^4}{\sqrt[3]{\frac{R}{t}}}, \qquad (6)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1, б).

В зависимостях (5) и (6) $e = t + 2K_b + 0{,}3(t_1 + 2K_g)$, диапазон варьируемых параметров: K_g = 10…20 мм, R = 0,5…7 мм, $t = t_1$ = 20 мм, Θ = 20º…50º [20].

Ильин и др. (1983) [4] по результатам исследований МКЭ предложили зависимость

$$K_t = 1 + 0{,}25 \sqrt{\frac{t}{R}} \sqrt{\frac{t_1 + 2K_g}{t}} \left[1 - exp\left(-1{,}9 \frac{K_b}{K_g}\right)\right], \qquad (7)$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), рекомендуемая область применения неизвестна.

Niu и Glinka (1987) [7] определили зависимость K_t, как трехпараметрическую

$$K_t = 1 + 0{,}5121 \cdot \theta^{0.572} \left(\frac{R}{t} \right)^{-0.469}, \qquad (8)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1, б), рекомендуемая область применения $R/t = 0{,}02 \ldots 0{,}066$; $\Theta = 30^\circ \ldots 60^\circ$, $t_1/t = 1$ $K_g / t = 1$.

Кархин и др. (1987) [8], основываясь на результатах моделирования МКЭ, получили зависимость, учитывающую шесть геометрических параметров, включая высоту присоединяемого элемента, в виде

$$K_t = 1 + 0{,}32 \left[\begin{array}{l} (sin\theta)^{0.49} \left[R \left(\frac{1}{t} + \frac{0.64}{K_g} + \frac{0.005}{K_g \cdot tg\theta} \right) \right]^{0.58} + \\ + \left[R \left(\frac{1}{t} + \frac{0.64}{K_g + t1/2} + \frac{0.005}{h} \right) \right]^{0.58} - \left[R \left(\frac{1}{t} + \frac{0.64}{K_g} + \frac{0.005}{h} \right) \right]^{0.58} \end{array} \right], \qquad (9)$$

нагрузка - растяжение (рис.1, а), рекомендуемая область применения R/t = 0,003…2,4; $\Theta = 30^\circ \ldots 90^\circ$, h/t_1=0.4…12; K_g/t_1= 0…1.6; t_1/t = 0.12…4.

Tsuji (1990) [6], используя метод граничных элементов и решения Nishida, получил зависимости K_t в виде:

$$K_t = 1 + 1{,}015 \left[\frac{K_b}{R} \frac{1}{2{,}8 \left(\frac{e}{t} - 2 \right)} \right]^{0{,}446} \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \theta \sqrt{\frac{e}{2K_g}} \right)}{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{e}{2K_g}} \right)}, \qquad (10)$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), $e = t + 2K_g + 0{,}3(t_1 + 2K_g)$;

$$K_t = 1 + \left[0{,}629 + 0{,}058\, ln\left(\frac{t_1 + 2K_g}{t} \right) \right] \left[\frac{R}{t} \right]^{-0{,}431} tanh\left(\frac{6K_b}{t} \right) \frac{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \theta \sqrt{\frac{w}{2K_g}} \right)}{1 - exp\left(-0{,}9 \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{w}{2K_g}} \right)}, \qquad (11)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1, а), $w = t_1 + K_b$, рекомендуемая область применения не определена.

Monahan (1990) [9] получил трехпараметрическую зависимость K_t в виде

$$K_t = 1 + 0{,}388 \cdot \theta^{0.37} \left(\frac{R}{t} \right)^{-0.454}, \qquad (12)$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), рекомендуемая область применения R/t = 0,01…0,66; $\Theta = 30^\circ \ldots 60^\circ$, $(t+2Kg)/t$ = 2,8 [12].

Манжула (1997) [10] на основе исследований МКЭ получил зависимость, учитывающую, кроме общепринятых факторов, также усиление шва, в форме изменения угла наклона Θ, и подрезы, в виде

$$K_t = \left[1{,}9 + 0{,}008\frac{t+t_1}{2R} - 5{,}1\frac{R}{t}(sin\theta)^{1{,}5} + 1{,}8\left(\frac{R}{t}\right)^n (3{,}8\sin\theta - 1{,}43)\cdot\left(\frac{t_1+2K_g}{t}\right)^{0{,}25}\right], \quad (13)$$
$$\times\left[1+1{,}1\left(\frac{R}{t}\right)^{0{,}9}\left(\frac{\delta}{\rho}\right)^{0{,}5}\right]$$

где $n = 0{,}1 + 8{,}9\cdot(R/t)$, нагрузка – растяжение (рис.1, а), R=0,125…2 мм, Θ = 30º…60º, t/t_1=1; K_g/t=0,01…1; K_b/t=0,01…1.

Brennan и др. (2000) [11] для экспресс оценки концентрации предложили упрощенные зависимости:

$$K_t = 1{,}027 + 0{,}271\cdot\theta^{0{,}216}\left(\frac{R}{t}\right)^{-0.47}\left(\frac{e}{t}\right)^{0{,}183}, \quad (14)$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), $e = t_1 + 2K_g$, рекомендуемая область применения R/t = 0,01…0,66; Θ = 30º…60º; $0{,}3 \le e/t \le 4$.

$$K_t = 1{,}01 + 0{,}344\cdot\theta^{0.336}\left(\frac{R}{t}\right)^{-0.468}\left(\frac{e}{t}\right)^{0{,}233}, \quad (15)$$

нагрузка – изгибающий момент (рис.1, б), $e = t_1 + 2K_g$, рекомендуемая область применения R/t = 0,01…0,66; Θ = 30º…60º, $0{,}3 \le e/t \le 4$.

Полная зависимость при изгибе имеет вид

$$\begin{aligned} K_t = {} & 1{,}14 + 0{,}13\cdot\theta - 0{,}67\frac{R}{t} - 0{,}083\frac{e}{t} + 0{,}08\theta^2 + 28\left(\frac{R}{t}\right)^2 - 0{,}02\left(\frac{e}{t}\right)^2 \\ & + 0{,}01\theta^3 - 0.0005\left(\frac{e}{t}\right)^3 - 0{,}00002\left(\frac{e}{t}\right)^4 - 4{,}3\theta\frac{R}{t} - 0{,}09\theta\frac{e}{t} - 1{,}03\frac{R}{t}\cdot\frac{e}{t} \\ & - 13{,}7\theta^2\frac{R}{t} + 0{,}443\theta^2\left(\frac{e}{t}\right)^2 + 150\theta\left(\frac{R}{t}\right)^2 - 0{,}13\theta^2\left(\frac{e}{t}\right)^2 - 62\left(\frac{R}{t}\right)^2\frac{e}{t} + 1{,}53\frac{R}{t}\left(\frac{e}{t}\right)^2 + \\ & + 0.0005\theta^3\frac{e}{t} - 30\theta\left(\frac{R}{t}\right)^3 + 3{,}57\theta\frac{R}{t}\frac{e}{t} + 5\theta\left(\frac{R}{t}\right)^2\frac{e}{t} + 0{,}35\theta^{0{,}26}\left(\frac{R}{t}\right)^{-0{,}468}\left(\frac{e}{t}\right)^{0{,}3} \end{aligned}. \quad (16)$$

В работе [12] отмечено, что погрешность расчетной оценки K_t по формуле (14) лежит между –9,5% и +15,4%.

Hellier и др. (2014) [12], основываясь на большем числе вычислительных экспериментов, чем в работе [11], получили уравнение для K_t в виде

$$K_t = 0{,}889 - 0{,}302 \cdot \theta + 3{,}44\frac{R}{t} + 0{,}529\frac{e}{t} + 0{,}012\theta^2 + 104\left(\frac{R}{t}\right)^2 - 0{,}633\left(\frac{e}{t}\right)^2$$
$$- 0{,}614\theta^3 + 0{,}18\left(\frac{e}{t}\right)^3 - 0{,}018\left(\frac{e}{t}\right)^4 - 35{,}50\frac{R}{t} - 0{,}153\theta\frac{e}{t} + 4{,}38\frac{R}{t}\cdot\frac{e}{t} +$$
$$+ 30{,}6\theta^2\frac{R}{t} - 0{,}219\theta^2\frac{e}{t} - 64{,}30\left(\frac{R}{t}\right)^2 + 0{,}041\theta\left(\frac{e}{t}\right)^2 - 54{,}5\left(\frac{R}{t}\right)^2\frac{e}{t} + 0{,}595\frac{R}{t}\left(\frac{e}{t}\right)^2 + \quad (17)$$
$$+ \theta^{0{,}68}\left(\frac{R}{t}\right)^{-0{,}299}\left(\frac{e}{t}\right)^{0{,}263}$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), $e = t_1 + 2K_g$, рекомендуемая область применения R/t = 0,01…0,66; Θ = 30º…60º, e/t = 0.3…4. В работе указывается, что погрешность расчетов по зависимости (17) лежит в диапазоне от –3,8% до +3,1%.

Wang и др. (2020) [13] на основе конечно-элементных расчетов и обработки результатов методом регрессионного анализа получена зависимость K_t при растяжении, не учитывающая влияние размеров катетов, в виде

$$K_t = 1 + 1{,}39418 \cdot f\left(\frac{R}{t}\right) \cdot f(\theta) \cdot f\left[\left(\frac{R}{t}\right) \cdot \theta\right], \quad (18)$$

где

$$f\left(\frac{R}{t}\right) = 1{,}824174 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^{-0{,}14504} + 6{,}40021 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^3 - 6{,}802011 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^2 + 3{,}277059 \cdot \left(\frac{R}{t}\right) - 2{,}692331$$

$$f(\theta) = -0{,}2778232 \cdot (\pi - \theta)^3 + 1{,}531999 \cdot (\pi - \theta)^2 - 3{,}394907 \cdot (\pi - \theta) + 4{,}96713 \ ;$$

$$f\left(\frac{R}{t} \cdot \theta\right) = -0{,}1001612 \cdot \left[\left(\frac{R}{t}\right)(\pi - \theta)\right]^3 + 12{,}79269 \cdot \left[\left(\frac{R}{t}\right)(\pi - \theta)\right]^2 - 6{,}802011 \cdot \left(\frac{R}{t}\right)^2 +$$

$$5{,}761117 \cdot \left[\left(\frac{R}{t}\right)(\pi - \theta)\right] + 1{,}181649$$

нагрузка – растяжение (рис.1, а), рекомендуемая область применения R/t = 0,003…0,36; Θ = 20º…90º, K_g/t = 0,3…2; $K_b/t1$ = 0,3…2; t_1/t = 0,3…2.

Аналогичная зависимость K_t при изгибе имеет более громоздкий вид, неудобна для инженерных расчетов и поэтому не рассматривается. В работе указывается, что погрешность расчетов по зависимостям составляет менее 5% по отношению к расчетам МКЭ.

В работе [19] выполнено значительное число вычислительных экспериментов по исследованию K_t в тавровых соединениях при растяжении и изгибе, но реализованных в построенной нейронной сети, воспользоваться которой могут только ее пользователи.

Результаты

С целью проверки корректности оценки K_t приведенными выше зависимостями составлялись модели таврового соединения для расчета их напряженно-деформированного состояния МКЭ в среде Ansys. При нагружении растяжением и изгибом рассматривалась половина соединения относительно вертикальной оси, длина пластины, к которой прикладывалась нагрузка, принималась не менее L=3t от оси симметрии. Пример вычислительной модели с изолиниями напряжений по Мизесу при нагружении изгибом показан на рис. 2.

Конечно-элементная сетка имела размеры: в зоне концентратора по дуге радиуса размер сетки – 0,000001 м; в зоне радиуса сопряжения - 0,00005…0,0001 м, в остальной части – 0,0005-0,001 м. При построении сетки использовался элемент PLANE183. Определялись напряжения при плоскодеформированном (ПД) и плосконапряженном (ПН) состояниях.

Коэффициенты концентрации напряжений K_t оценивались при ПН состоянии. Фрагмент сетки конечных элементов в зоне радиуса сопряжения R=4 мм с изолиниями напряжений показан на рис.2.

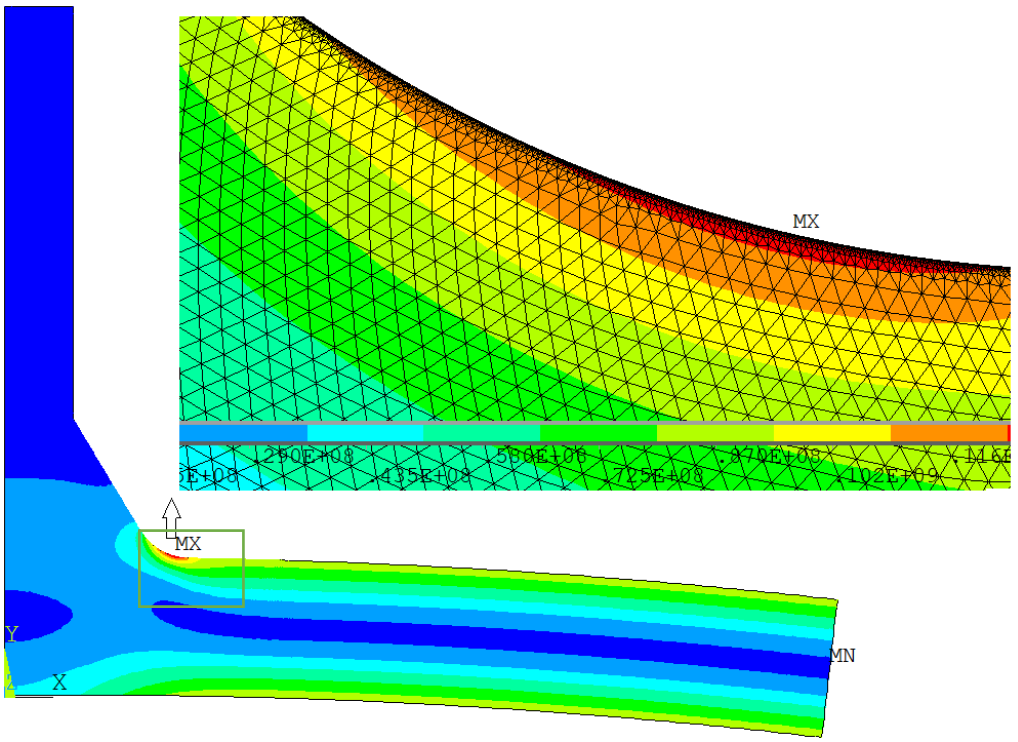


Рис. 2. Вычислительная модели с изолиниями напряжений по Мизесу при изгибе с фрагментом сетки конечных элементов в зоне радиуса сопряжения R=4 мм

Диапазон варьирования геометрических параметров, рассмотренный в расчетах, показан в табл. 1. Значительная часть расчетов проводилась с целью верификации с известными в литературе расчетами.

Таблица 1. Диапазон варьирования параметров

t, мм	t_1, мм	K_g, мм	K_b, мм	θ, град	R, мм
6…70	3…54	5,7…28	4,6…28	30…60	0.1…6

При построении моделей соединений выбиралась определенная комбинация параметров, соответствующая ее геометрическому представлению. В 160 расчетных моделях сочетания численных значений геометрических параметров были приняты такими же, как и работе [14]. Расхождение результатов значений K_t составило от 0 до 1%, что свидетельствует об идентичности выполненных вычислительных экспериментов в обеих работах.

Для графического сравнения результатов K_t, определенных МКЭ, с рассчитанными по приведенным выше зависимостям радиусы сопряжения назначались с определенными значениями R = 0.2; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0; 3.0; 4.0 мм. Отношения рассмотренных параметров составили: R/t = 0,005…0,4; Θ = 30º…60º, K_g/t = 0,4…1; $K_b/t1$ = 0,6…1; t_1/t = 0,4…1.

Обсуждение

Сравнение результатов расчета K_t по приведенным выше зависимостям с результатами расчетов МКЭ рассматривается отдельно при растяжении и изгибе соединения. Для сравнения из всего набора выполненных расчетов МКЭ была отобрана только часть, представленная на рис. 3… 8, характерная по толщинам для машиностроительных конструкций. Графики строились в виде зависимости K_t от радиуса R сопряжения при остальных фиксированных геометрических параметрах. Диапазон изменения радиуса принят равным R = 0,2…4 мм, значения фиксированных параметров указаны на рисунках.

Некоторые из рассматриваемых зависимостей ранее анализировались в работе [20], однако сравнение с результатами вычислительного эксперимента не проводилось, а оценивалась зона «достоверных рекомендаций», как зона средних значений , полученная в результате статистической обработки.

Растяжение

На вертикальной оси графиков показаны значения K_t. Анализ графиков на рис. 3…5 показывает, что практически все зависимости правильно отражают характер влияния радиуса R на K_t, особенно в области малых радиусов, но количественно не все одинаково.

Зависимость Hellier (17) применима только при больших толщинах элементов и малых радиусах сопряжения, хотя по соотношению $e/t = (t_1 + 2K_g)/t = (10 + 2 \cdot 10)/10 = 3$ соответствует заявленному диапазону варьирования параметров e/t = 0.3…4. Поэтому при толщинах t = 10…20 мм

область ее применения ограничена радиусом сопряжения R<1 мм. При толщине t = 40 мм зависимость хорошо соответствует МКЭ.

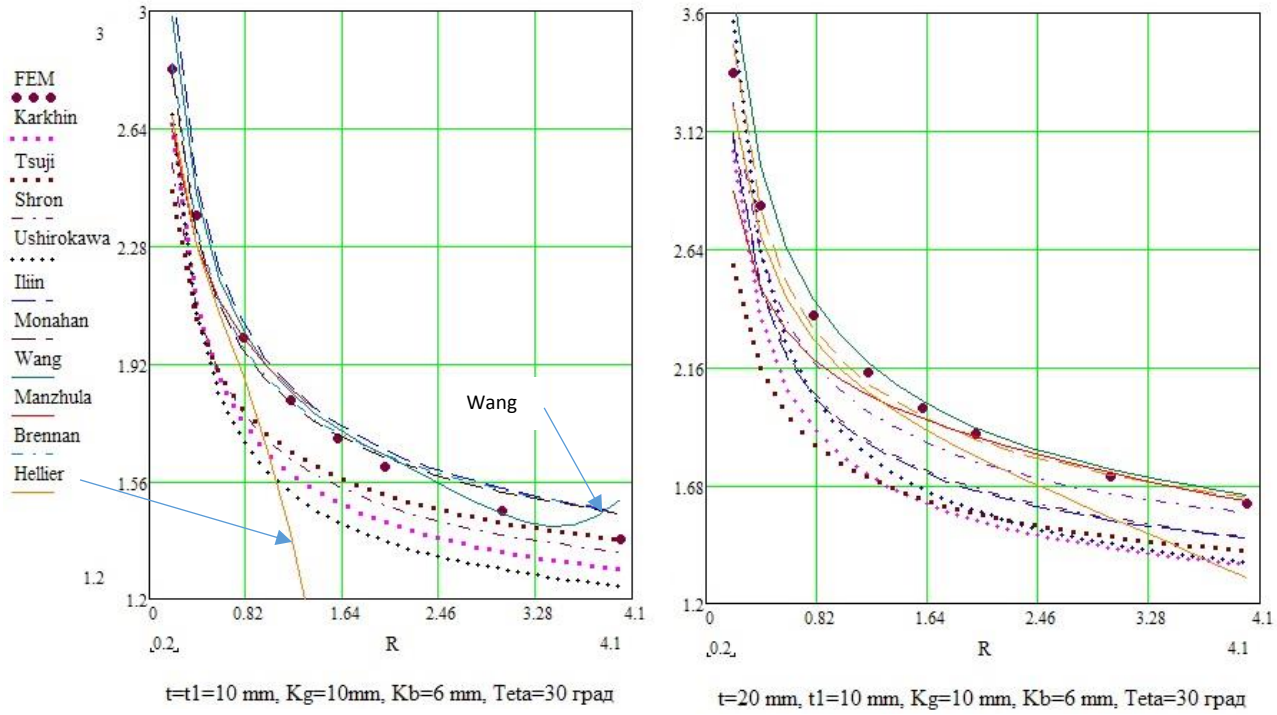


Рис. 3. Сравнение результатов расчета K_t в тавровом соединении при растяжении по зависимостям (3), (5), (7), (9), (10), (12)-(14), (17), (18) с расчетом МКЭ при θ = 30°

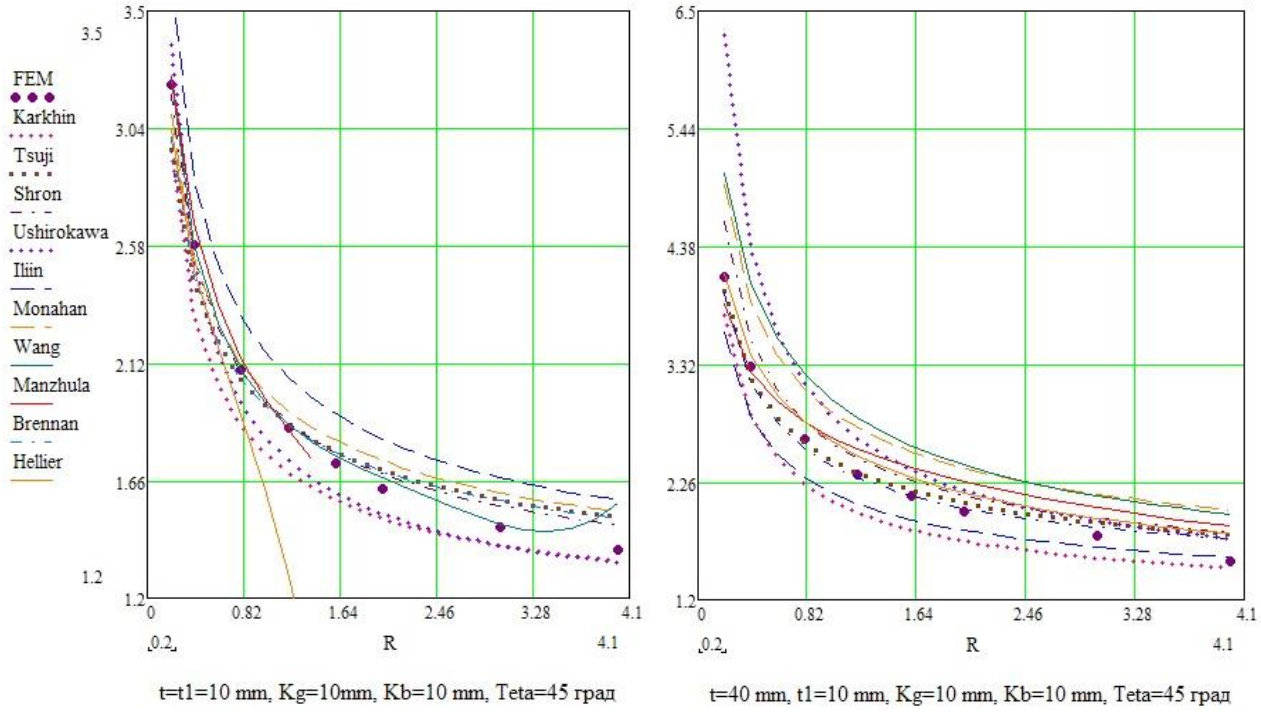


Рис. 4. Сравнение результатов расчета K_t в тавровом соединении при растяжении по зависимостям (3), (5), (7), (9), (10), (12)-(14), (17), (18) с расчетом МКЭ при θ = 45°

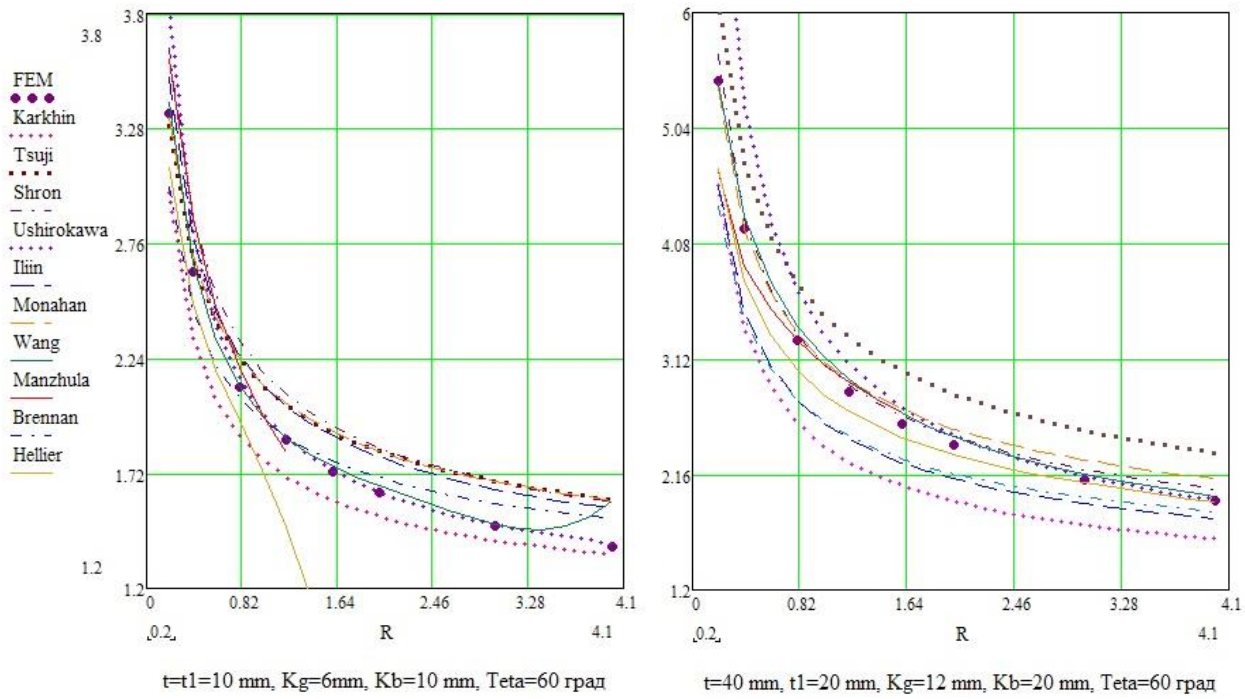


Рис. 5. Сравнение результатов расчета K_t в тавровом соединении при растяжении по зависимостям (3), (5), (7), (9), (10), (12)-(14), (17), (18) с расчетом МКЭ при $\theta = 60°$

Зависимость Wang (18) резко меняет характер на увеличение K_t при толщинах 10 мм уже при $R/t > 3/10 = 0{,}3$, хотя это укладывается в заявленный диапазон применения $R/t = 0{,}01…0{,}66$. При толщинах $t > 20$ мм данный эффект исчезает.

При $\theta = 30°$ и диапазоне параметров, изображенном на рис.3, зависимости (3), (5), (9), (10) дают заниженные оценки K_t. Зависимость (5) показывает заниженные результаты при $\theta = 45°$ и 60°. Зависимость (13) применима при R<2 мм.

Зависимость Tsuji (10) показывает высокую сходимость при $\theta = 45°$ и, как отмечается в работе [21], была получена при этом угле наклона гипотенузы шва.

Зависимость Ushirokawa (5) ограничена радиусом сопряжения R>0,5 мм, при меньших радиусах показывает завышенные значения K_t.

Простая трехпараметрическая зависимость Monahan (12), хотя и получена при $(t+2Kg)/t$=2.8, показывает хорошую сходимость с МКЭ во всех представленных на рисунках случаях.

Изгиб

На рисунках 6 – 8 представлены графики рассматриваемых при изгибе зависимостей K_t (вертикальная ось) в функции изменения радиуса сопряжения R, а также результаты расчетов, выполненные МКЭ при указанных геометрических параметрах.

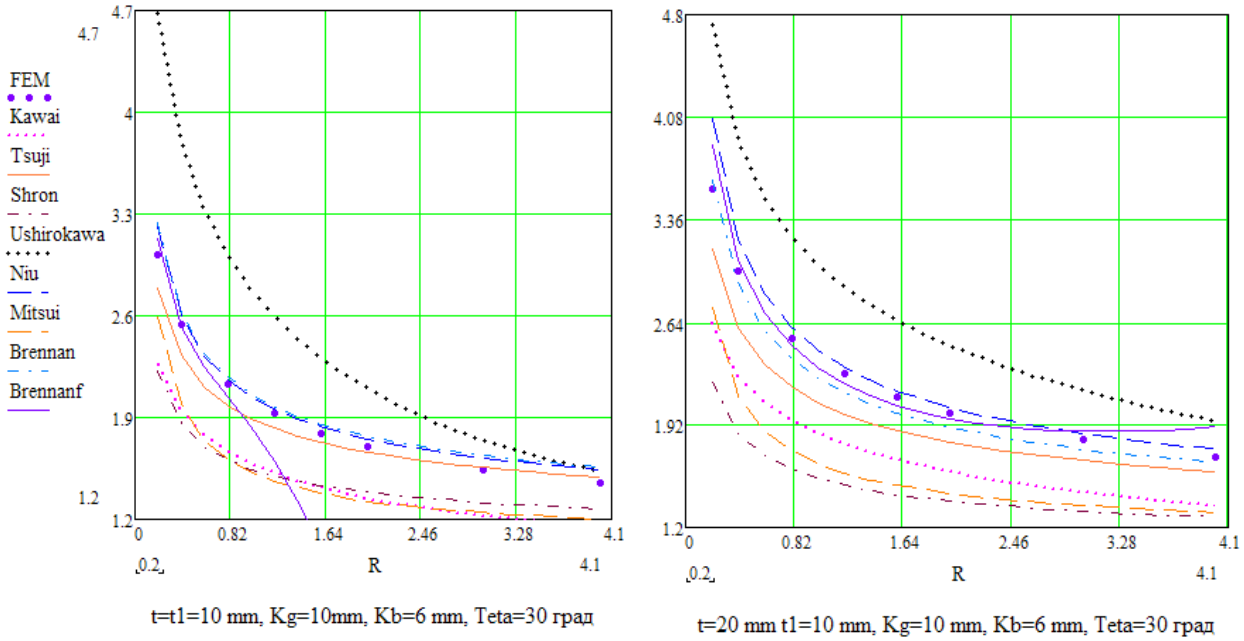


Рис. 6. Сравнение результатов расчета K_t в тавровом соединении при изгибе по зависимостям (1), (2), (4), (6), (8), (11), (15), (16) с расчетом МКЭ при $\theta = 30°$

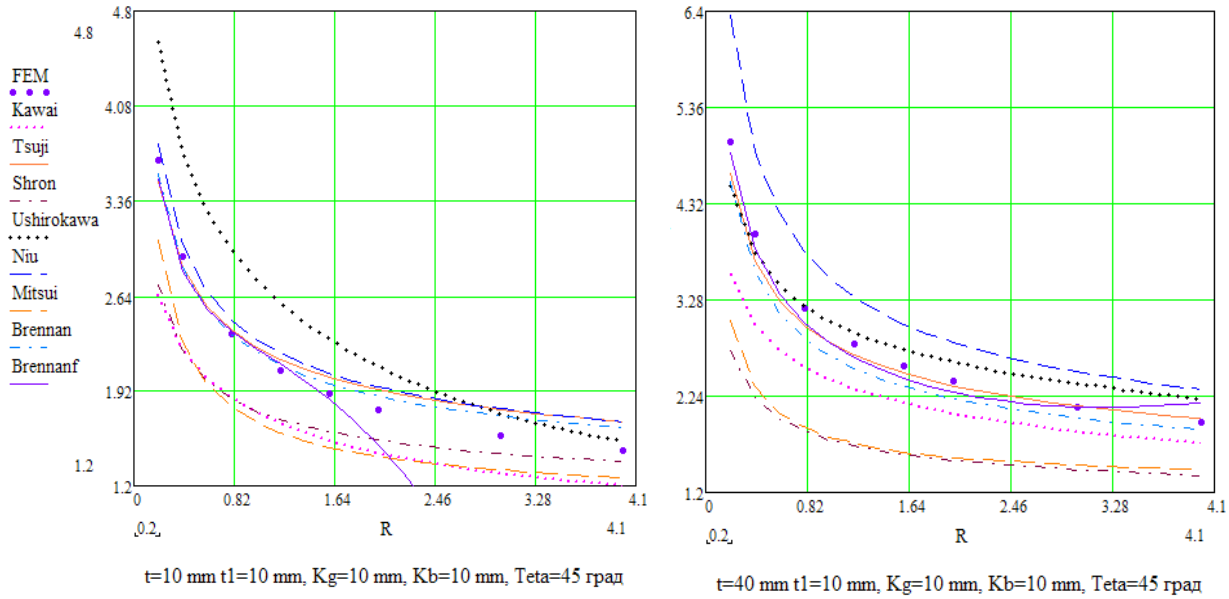


Рис. 7. Сравнение результатов расчета в тавровом соединении при изгибе по зависимостям (1), (2), (4), (6), (8), (11), (15), (16) с расчетом МКЭ при $\theta = 45°$

Во всех рассмотренных вариантах расчета видно, что зависимости Kawai (1), Mitsui (2) и Shron (4) определяют значения K_t ниже рассчитанных МКЭ. Диапазон варьирования параметров на графиках соответствует в целом рекомендуемому этими зависимостями.

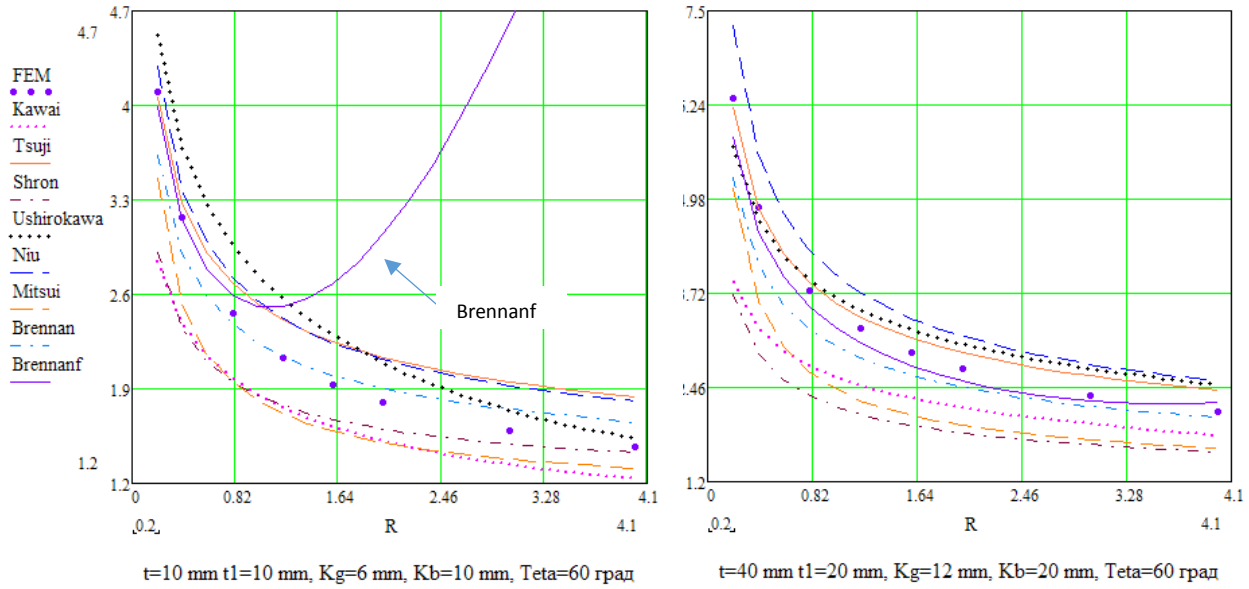


Рис. 8. Сравнение результатов расчета K_t в тавровом соединении при изгибе по зависимостям (1), (2), (4), (6), (8), (11), (15), (16) с расчетом МКЭ при $\theta = 60°$

Зависимость Ushirokawa (6) при толщинах соединяемых элементов t = 10…20 мм определяет завышенные значения K_t и только при толщине t = 40 мм совпадает с расчетом МКЭ.

Полная зависимость Brennanf (16) в правой половине представленных графиков достаточно хорошо совпадает с результатами МКЭ, в левой половине представленных графиков показывает хорошую сходимость только для $R< 1$ мм, а при больших радиусах характер зависимости резко меняется в отрицательную область значений K_t или показывает их степенной рост. А экспресс зависимость (15) лишена этих недостатков и во всех рассмотренных случаях хорошо согласуется с МКЭ.

Трехпараметрическая зависимость Niu (8) достаточно близко соответствует МКЭ.

Заключение

Результаты исследований показывают, что влияние радиуса сопряжения R на K_t рассмотренными инженерными зависимостями отражается примерно одинаково и правильно. В конечном итоге на значения K_t оказывает влияние сочетание остальных геометрических параметров. Рекомендуемых диапазонов применения в виде отношения t_1/t, K_g/t; $K_b/t1$ или e/t, w/t в зависимостях K_t не достаточно, если они получены на ограниченном числе проведенных вычислительных экспериментов или с учетом специфики конструкций. Необходимо также указывать и рекомендуемые диапазоны применения в абсолютных величинах. Так зависимости, хорошо совпадающие с результатами, полученными МКЭ при

больших толщинах, могут быть не применимы при малых толщинах, несмотря на то, что они рекомендованы в диапазоне относительных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Kawai S., Koibuchi K. Effect of ground and peened on fatigue strength of joint under high mean stresses. Ibid., 1975, N 7, pp. 62-69.

[2] Mitsui Y., Kurobane Y., Harada K., Konomi M. Fatigue crack growth behaviors at the toe of fillet welded joints under plane bending load. J. Jap Weld. Soc. 1983, №3. pp. 58-65.

[3] Шрон Л. Б. Исследование влияния геометрических параметров на концентрацию напряжений в тавровых и нахлесточных сварных соединениях и разработка методики ее расчетной оценки: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Свердловск. 1983. 15 с.

[4] Ильин А.В., Карзов Г.П., Леонов В.П. и др. Методы расчета циклической прочности сварных соединений. Л.: ЛДНТП. 1983. 32 с.

[5] Ushirokawa, O., Nakayama, E. Stress concentration factor at Welded Joints. Ishikawajima-Harima Eng. Rev. 1983. 23. pp. 351-355.

[6] 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

[7] Niu, X.; Glinka, G. The weld profile effect on stress intensity factors in weldments. Int J. Fract. 1987, 35, 3–20.

[8] 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.

[9] Monahan, C.C. Early Fatigue Crack Growth at Welds (Topics in Engineering)*;* Computational Mechanics: Southampton, UK. 1995. pp. 112–116.

[10] Манжула К.П., Теория и методы расчета сопротивления усталости металлических конструкций грузоподъемных машин: дис. … д-ра техн. наук: СПб, 1997. 356 с.

[11] Brennan F.P., Peleties P, Hellier A.K. Predicting weld toe stress concentration factors for T and skewed T-joint plate connections. Int J Fatigue 22, 2000. pp. 573–584

[12] Hellier A.K., Brennan F.P., Carr D.G. Weld toe SCF and stress distribution parametric Equations for Tension (Membrane) Loading. Advanced materials research Vols. 891-892. 2014. pp. 1525-1530.

[13] Wang Y., Luo Y., Tsutsumi S. Parametric Formula for Stress Concentration Factor of FilletWeld Joints with Spline Bead Profile. Materials. 2020, 13, 4639.

[14] Molski K., Tarasiuk P. Stress Concentration Factors for Welded Plate T-Joints Subjected to Tensile, Bending and Shearing Loads. Materials 2021, 14, 546. pp. 1-23.
[15] Shlepetinskiy A., Manzhula K. Size of a Zone Dangerous by Damage at the Root of Cruciform Weld Joint. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, May 2018. pp. 181-191.
[16] Manzhula K., Shlepetinskiy A. Stress and Strain Concentration in Weld-Joint Flaws. Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, No. 9, pp. 722–726.
[17] Ерофеев В.В., Игнатьев А.Г., Олейник Н.И., Шарафиев Р.Г., Кульневич В.Б., Щепеткин В.В. Математическая модель для оценки коэффициентов концентрации напряжений в сварных тавровых соединениях. Информационные технологии в науке, образовании и производстве. 2020. С. 28-36.
[18] Saini D., Karmakar D., Ray-Chaudhuri S. A review of stress concentration factors in tubular and non-tubular joints for design of offshore installations. Journal of Ocean Engineering and Science. No. 1. 2016. pp. 186–202.
[19] Neuhäusler J., Rother K. Determination of notch factors for transverse non-load carrying stiffeners based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2022, 66. pp. 753–766.
[20] Махненко В.И., Мосенкис Р.Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами. Автоматическая сварка. 1985. №8 (389). С. 7-18.
[21] Iida K.; Uemura T. Stress Concentration Factor Formulae Widely Used in Japan. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. No.6, 19. 1996. pp. 779–786.

K.P.Manzhula[1], A.Y. Shlepetinskiy[2]

CALCULATED DEPENDENCES FOR DETERMINING THEORETICAL STRESS CONCENTRATION FACTORS IN A WELDED T-JOINT

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia
[2]Engineering Center JSC "Nevsky Zavod"

Abstract

The engineering dependencies are investigated for calculating the theoretical stress concentration factor in welded T-joints. Based on the comparison of the dependences under consideration with the results of studies of joints by the finite element method, formulas are established for most accurately determine the

theoretical stress concentration factor in given range of variation of geometric parameters.

Key words: welded T-joint, stress concentration factor, finite element analysis, tensile load, bending load, engineering dependencies.

REFERENCES

[1] Kawai S., Koibuchi K. Effect of ground and peened on fatigue strength of joint under high mean stresses. Ibid., 1975, N 7, pp. 62-69.
[2] Mitsui Y., Kurobane Y., Harada K., Konomi M. Fatigue crack growth behaviors at the toe of fillet welded joints under plane bending load. J. Jap Weld. Soc. 1983, №3. pp. 58-65.
[3] Shron LB Investigation of the effect of geometric parameters on the stress concentration in tee and lap welded joints and development of a methodology for its calculation assessment: Abstract of the thesis. dis. … cand. tech. Sciences. Sverdlovsk. 1983. 15 p.
[4] Iliin A.V., Karzov G.P., Leonov V.P. and other. Methods for calculating the cyclic strength of welded joints. L.: LDNTP. 1983. 32 p.
[5] Ushirokawa, O., Nakayama, E. Stress concentration factor at Welded Joints. Ishikawajima-Harima Eng. Rev. 1983. 23. pp. 351-355.
[6] 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
[7] Niu, X.; Glinka, G. The weld profile effect on stress intensity factors in weldments. Int J. Fract. 1987, 35, 3–20.
[8] Karkhin V.A., Kostylev V.I., Stakanov V.I.: Influence of geometric parameters of butt, tee and cross joints on the stress concentration factor. Automatic welding. 1988. No. 3. pp. 6-11.
[9] Monahan, C.C. Early Fatigue Crack Growth at Welds (Topics in Engineering)*;* Computational Mechanics: Southampton, UK. 1995. pp. 112–116.
[10] Manzhula, K.P. Theory and methods for calculating the fatigue resistance of metal structures of hoisting machines: dis. … Dr. tech. Sciences: St. Petersburg, 1997. 356 p.
[11] Brennan F.P., Peleties P, Hellier A.K. Predicting weld toe stress concentration factors for T and skewed T-joint plate connections. Int J Fatigue 22, 2000. pp. 573–584
[12] Hellier A.K., Brennan F.P., Carr D.G. Weld toe SCF and stress distribution parametric Equations for Tension (Membrane) Loading. Advanced materials research Vols. 891-892. 2014. pp. 1525-1530.
[13] Wang Y., Luo Y., Tsutsumi S. Parametric Formula for Stress Concentration Factor of Fillet Weld Joints with Spline Bead Profile. Materials. 2020, 13, 4639.

[14] Molski K., Tarasiuk P. Stress Concentration Factors for Welded Plate T-Joints Subjected to Tensile, Bending and Shearing Loads. Materials 2021, 14, 546. pp. 1-23.
[15] Shlepetinskiy A., Manzhula K. Size of a Zone Dangerous by Damage at the Root of Cruciform Weld Joint. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference "Modern Engineering: Science and Education", Saint Petersburg, Russia, May 2018. pp. 181-191.
[16] Manzhula K., Shlepetinskiy A. Stress and Strain Concentration in Weld-Joint Flaws. Russian Engineering Research, 2016, Vol. 36, No. 9, pp. 722–726.
[17] Erofeev V.V., Ignatiev A.G., Oleinik N.I., Sharafiev R.G., Kulnevich V.B., Shchepetkin V.V. Mathematical model for estimating stress concentration factors in welded tee joints. Information technologies in science, education and production. 2020. S. 28-36.
[18] Saini D., Karmakar D., Ray-Chaudhuri S. A review of stress concentration factors in tubular and non-tubular joints for design of offshore installations. Journal of Ocean Engineering and Science. No. 1. 2016. pp. 186–202.
[19] Neuhäusler J., Rother K. Determination of notch factors for transverse non-load carrying stiffeners based on numerical analysis and metamodeling. Welding in the World. 2022, 66. pp. 753–766.
[20] Makhnenko V.I., Mosenkis R.Yu. Calculation of stress concentration factors in welded joints with butt and fillet welds. Automatic welding. 1985. No. 8 (389). pp. 7-18.
[21] Iida K.; Uemura T. Stress Concentration Factor Formulae Widely Used in Japan. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. No.6, 19. 1996. pp. 779–786.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 620.16

Э.И. Мансырев[1], А.В. Емельянов[2], О.Г. Зотов[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ И МАСШТАБНОМУ ФАКТОРУ ОТОЖЖЕННОЙ МЕДИ М3Р

[1]Мансырев Энвер Ибрагимович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921)907-68-53, E-mail: enver.mansyrev@yandex.ru

[2]Емельянов Антон Владимирович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(981)711-91-54, E-mail: em-ant1990@yandex.ru

[2]Зотов Олег Геннадиевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921)658-69-31, E-mail: zog58@mail.ru

Аннотация

На основании результатов испытаний двух типов образцов на многоцикловую усталость при симметричном растяжении-сжатии из отожженной меди М3Р при температурах +20^{O}С и +85^{O}С (база испытаний 10^9 циклов) определены зависимости основного параметра статистической теории усталостного разрушения В.П. Когаева, – коэффициента чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ, от прогнозируемой долговечности.

Ключевые слова: испытания на многоцикловую усталость, долговечность детали, сплав отожженной меди М3Р, статистическая теория усталостного разрушения, коэффициент чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору.

1. Введение

Оценка усталостной прочности металлических деталей обычно производится расчетным способом с привлечением экспериментально полученных кривых усталости из соответствующего материала. Основной параметр усталостной прочности, – предел выносливости σ_{-1}, определяют по результатам испытаний стандартных образцов, либо, что несколько реже, по результатам испытаний образцов с максимально приближенной геометрией к представляющей интерес детали. Практически любая деталь имеет концентраторы напряжений и размеры, отличающиеся от размеров стандартных образцов, поэтому в расчетной практике появляется необходимость использовать так называемые эффективные коэффициенты, зависящие от разных факторов, и позволяющие оценивать усталостную прочность деталей по результатам испытаний образцов.

Основными факторами, влияющими на усталостную прочность деталей, являются напряженное состояние детали, концентрация напряжений в зонах возможного прогнозируемого разрушения, абсолютные размеры детали, состояние поверхности и способ ее технологической обработки и многие другие. «Прямой» способ учета влияния этих факторов состоит в проведении дополнительных испытаний на усталость образцов с соответствующими особенностями [1, 2, 8], что сопряжено со значительными временными затратами и далеко не всегда выполнимо.

Разработанная В.П. Когаевым, Н.А. Махутовым, В.В. Болотиным и другими авторами [3 – 6] статистическая теория подобия усталостного разрушения допускает использование меньшего количества экспериментальных данных при оценке прочности деталей. Введенный в рассмотрение В.П. Когаевым параметр материала, – коэффициент чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ, который по мнению автора является еще одной характеристикой механических свойств материала, позволяет учитывать влияние на усталостную прочность деталей концентрации напряжений и масштабного фактора одновременно.

Применение такого подхода оказалось достаточно состоятельным для изделий из ряда металлов и сплавов, обладающих физическим пределом выносливости [5, 6]. Как известно, сплавы меди и иных цветных металлов, таким свойством не обладают. Поэтому определенный интерес представляет возможность распространения статистической теории подобия усталостного разрушения к объектам из таких материалов. В предлагаемой работе на основе выполненных испытаний на многоцикловую усталость двух типов образцов предлагается вариант определения основного параметра указанной теории для изделий из отожженного сплава меди МЗР при двух температурах: комнатной (+20^{O}C) и повышенной температуре (+85^{O}C).

2. Методы и испытательное оборудование

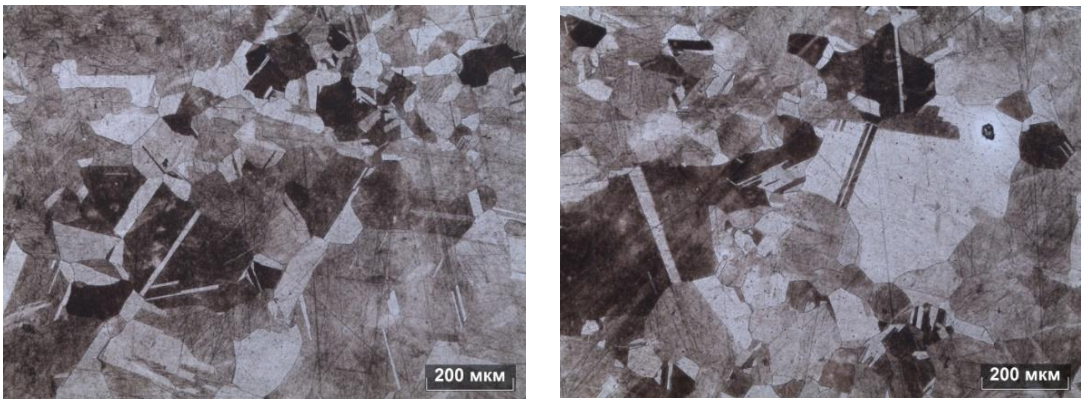
Предоставленные для изготовления образцов заготовки из сплава меди в первую очередь подверглись химическому и металлографическому анализу в соответствии с методами, представленными в ГОСТ 31382-2009 [15] и ГОСТ 21073.1-75 [16]. Химический анализ выполнен на оборудовании PolySpek методом оптической электронной спектроскопии. Микроструктурный анализ выполнен с помощью оптического микроскопа LeicaDMI 5000, в результате которого определен размер зерна исследованного медного сплава.

Циклическим испытаниям подвергались образцы на высокоскоростном пульсаторе Zwick/Roell HFP 100 в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [8], точность измерения динамического усилия соответствовала 0,5% от измеряемой величины. Пульсатор резонансного типа позволял проводить усталостные испытания при частотах в диапазоне 110 – 120 Гц. Контроль температуры образцов выполнялся закрепленной в рабочих областях образцов поверенной термопарой (точность измерения ±1 °C), а также средствами измерения температуры во входящей в состав пульсатора термокамере Zwick/Roell BW91250 (точность измерения ±2 °C). Геометрические размеры образцов контролировались с помощью поверенного цифрового штангенциркуля Vogel C0231(точность измерения ±0,01 мм).

3. Результаты испытаний

3.1. Результаты химического и микроструктурного анализа

Химический анализ, позволивший установить химический состав представляющего интерес сплава меди в процентах (таблица 1), а также микроструктурный анализ (диапазон размеров зерен сплава находился в диапазоне 70 – 350 мкм, рис. 1) позволили классифицировать сплав меди как М3Р, что соответствует международной классификации [18] как сплав, близкий к отожженной меди С14200 (содержание меди более 99,4%).



(а) (б)

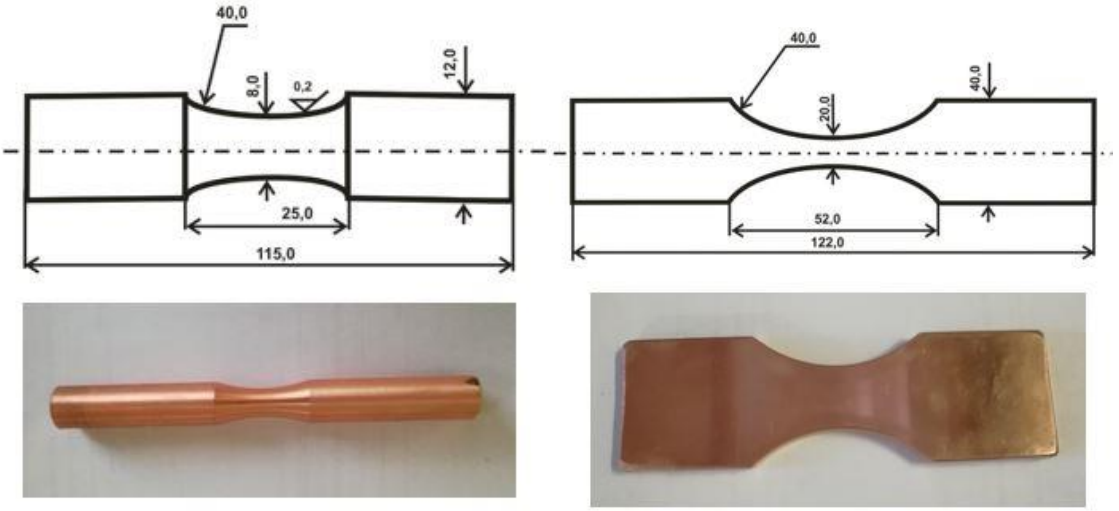
Рис. 1. Образцы для микроструктурного анализа после травления: (а) и (б) соответствуют различным зонам вырезки образцов для микроструктурного анализа

Таблица 1.

	Cu, %	Sn, %	Pb, %	Ni, %	Fe, %	Bi, %	Sb, %	As, %
Result	99,5	-	0,024	0,01	0,042	-	0,009	0,006
GOST 859-2014	99,5	≤0,05	≤0,03	≤0,2	≤0,05	≤0,003	≤0,05	≤0,05

3.2. Результаты циклических испытаний

Испытаниям на усталость при осевом симметричном растяжении-сжатии ($R_\sigma = -1$) подвергались образцы цилиндрического и плоского типа (рис. 2) при температурах +20^{O}C и +85^{O}C.



(а) (б)

Рис. 2. Образцы для испытаний на усталость: (а) – цилиндрический и (б) – плоский образцы (тип I и III по ГОСТ 25.502-79)

Испытания выполнялись с базой $N_b = 10^8$ циклов и повышенной базой $N_b = 10^9$ циклов, в процессе испытаний производилась цифровая запись циклограмм амплитуды напряжения и температуры в рабочей области образца (пример циклограммы приведен на рис. 3). В указанном диапазоне частот саморазогрев образцов не наблюдался. Математическая обработка данных испытаний производилась методом наименьших квадратов в соответствии с изложенным в [8, 9]. Результаты математической обработки, – кривые усталости (S-N кривые)

$$\lg(N) = \lg(C) - m\,(\lg\sigma_a - \lg\overline{\sigma}), \qquad (1)$$

позволили определить параметры уравнений кривых $\lg(C)$, m и $\lg(\overline{\sigma})$ (таблица 2), а также получить их графическое представление (рис. 4).

Таблица 2.

Температура образцов T, °C	Образцы цилиндрического типа			Образцы плоского типа		
	$\lg(C)$	m	$\lg(\overline{\sigma})$	$\lg(C)$	m	$\lg(\overline{\sigma})$
+20	7,002	12,98	1,849	7,102	13,62	1,794
+85	6,960	12,92	1,784	6,882	11,96	1,784

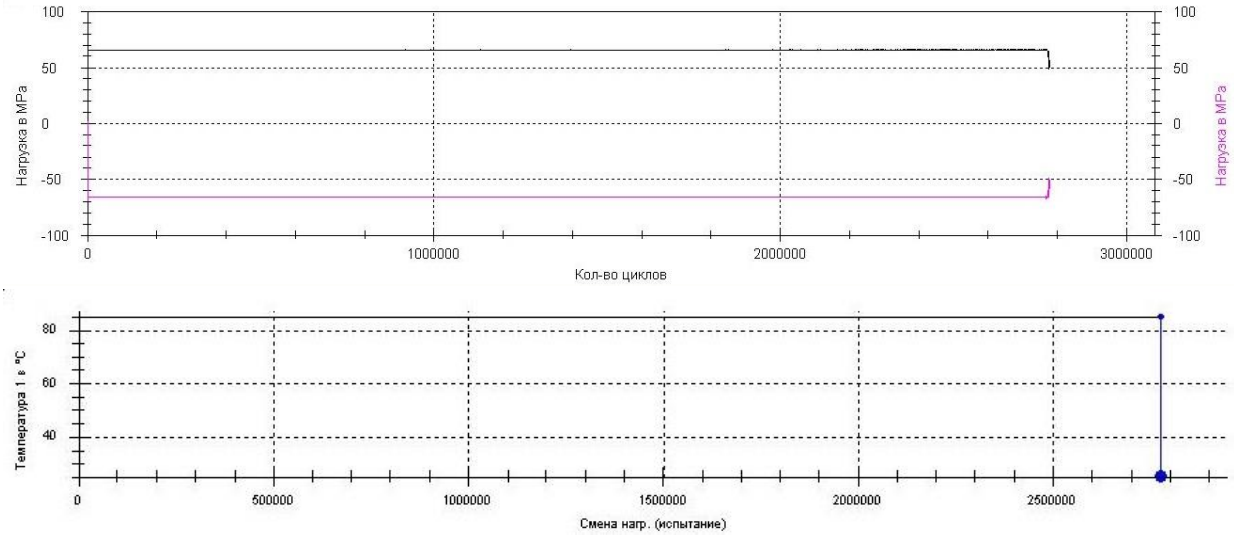


Рис. 3. Циклограммы напряжения и температуры на рабочей поверхности образца. Режим нагружения: амплитуда напряжения 66 МПа. Долговечность образца: 2 776 619 циклов

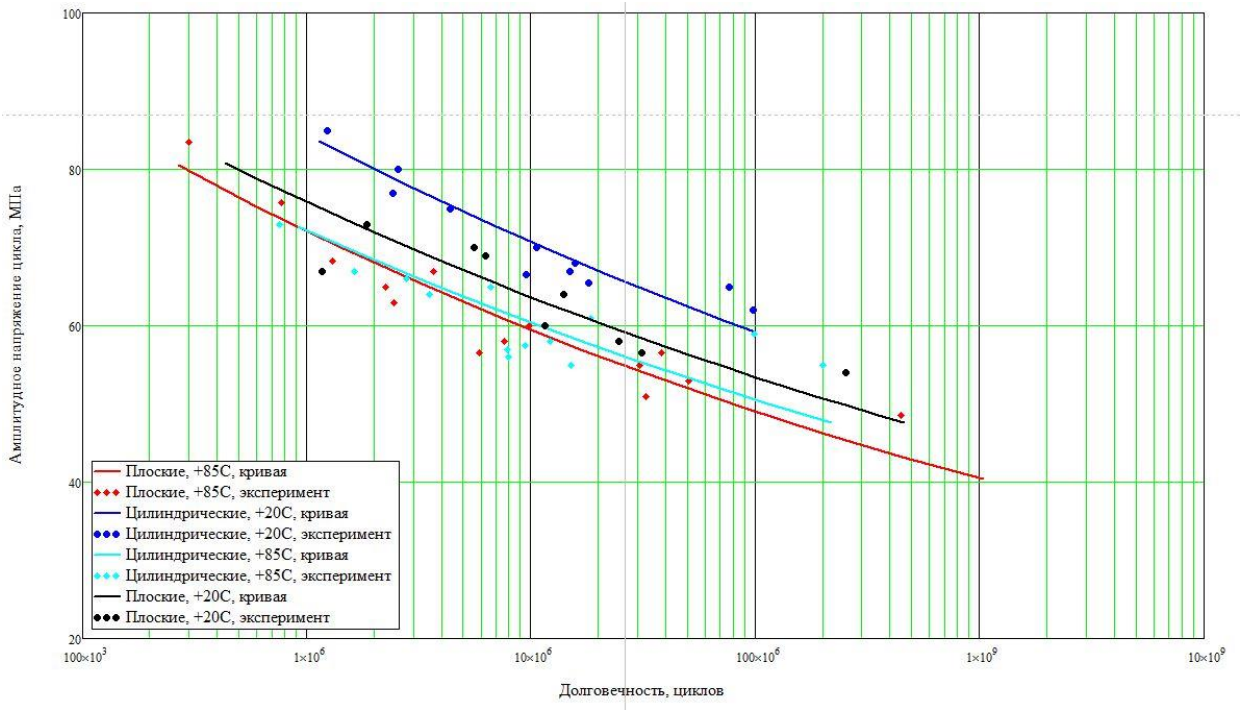


Рис. 4. Экспериментальные кривые усталости меди (полулогарифмическая шкала)

Полученные кривые усталости сопоставлялись с экспериментальными данными, представленными в литературных источниках [10 – 14] и относящимися к сплавам C10100, C14200 и CU-OF. Результаты сопоставления кривых указанных сплавов в области меньших долговечностей показали некоторое отличие от полученных кривых для сплава М3Р, для которого сведения о циклической прочности авторам настоящей работы неизвестны.

4. Определение коэффициента чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ для сплава меди М3Р

Используемый в технической справочной литературе термин «предел выносливости» (fatigue strength) для цветных металлов обычно подразумевает величину ограниченного предела выносливости $\sigma_{-1,N}$ при базовой долговечности 100 млн. циклов. В практике расчетов прочности деталей нередко востребованными оказываются меньшие и большие долговечности, в таких случаях прибегают к интерполяции или экстраполяции кривых усталости до требуемой долговечности. Поэтому далее для определения коэффициента чувствительности меди к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ взамен предела выносливости будем понимать предельную амплитуду цикла $\sigma_{a,N}$ – напряжение, отвечающее соответствующей кривой усталости при назначенной долговечности N.

Для определения величин коэффициента чувствительности меди к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ воспользуемся соотношением [5]

$$v_\sigma = \frac{\lg\left(\frac{\xi_\text{ц} - 1}{\xi_\text{п} - 1}\right)}{\lg\left(\frac{\theta_\text{п}}{\theta_\text{ц}}\right)} \tag{2}$$

где индексами «ц» и «п» обозначены параметры, относящиеся к цилиндрическому и плоскому образцам; $\xi = \frac{\alpha_\sigma \cdot \sigma_{a,N}}{u}$, полагается что $\alpha_\sigma \sigma_{a,N}$ совпадает с первым главным напряжением в зоне концентрации напряжений; $\theta = \frac{L/\overline{G}}{(L/\overline{G})_0}$ – относительный критерий подобия усталостного разрушения; u – минимальная граница величины $\sigma_{a,N}$, ниже которой вероятность усталостного разрушения принимается нулевой; L – часть периметра рабочего сечения образца с повышенными напряжениями в зоне концентрации напряжений (для цилиндрического образца – это полный периметр рабочего сечения, для плоского – удвоенная толщина образца); $\overline{G}$ – относительный градиент напряжений, для цилиндрических и плоских образцов «корсетного» типа [1, 5] $\overline{G} = \frac{2}{\rho}$; ρ – радиус кривизны поверхности в зоне концентрации напряжений; $(L/\overline{G})_0 = 88{,}3$ мм^2 – критерий подобия для «эталонного» образца.

Некоторую неопределенность составляет величина u. В [1, 5] предлагается назначать ее как половину предела выносливости, установленного по испытаниям на изгиб с вращением «эталонных» образцов с диаметром рабочей части 7,5 мм. Такие данные в пределах выполненных испытаний отсутствуют, поэтому представляется целесообразным назначить величину u как половину уровня нижней границы доверительной области (рис. 5) для наиболее «низкой» из полученных кривых усталости, – кривой усталости для плоских образцов при температуре $+85^{O}$C и долговечности 10^{11} циклов. Таким образом, в расчетах минимальная граница предельной амплитуды цикла была принята u = 10 МПа, что для долговечности 10^{11} циклов и меньших полностью соответствует смысловому содержанию этого параметра.

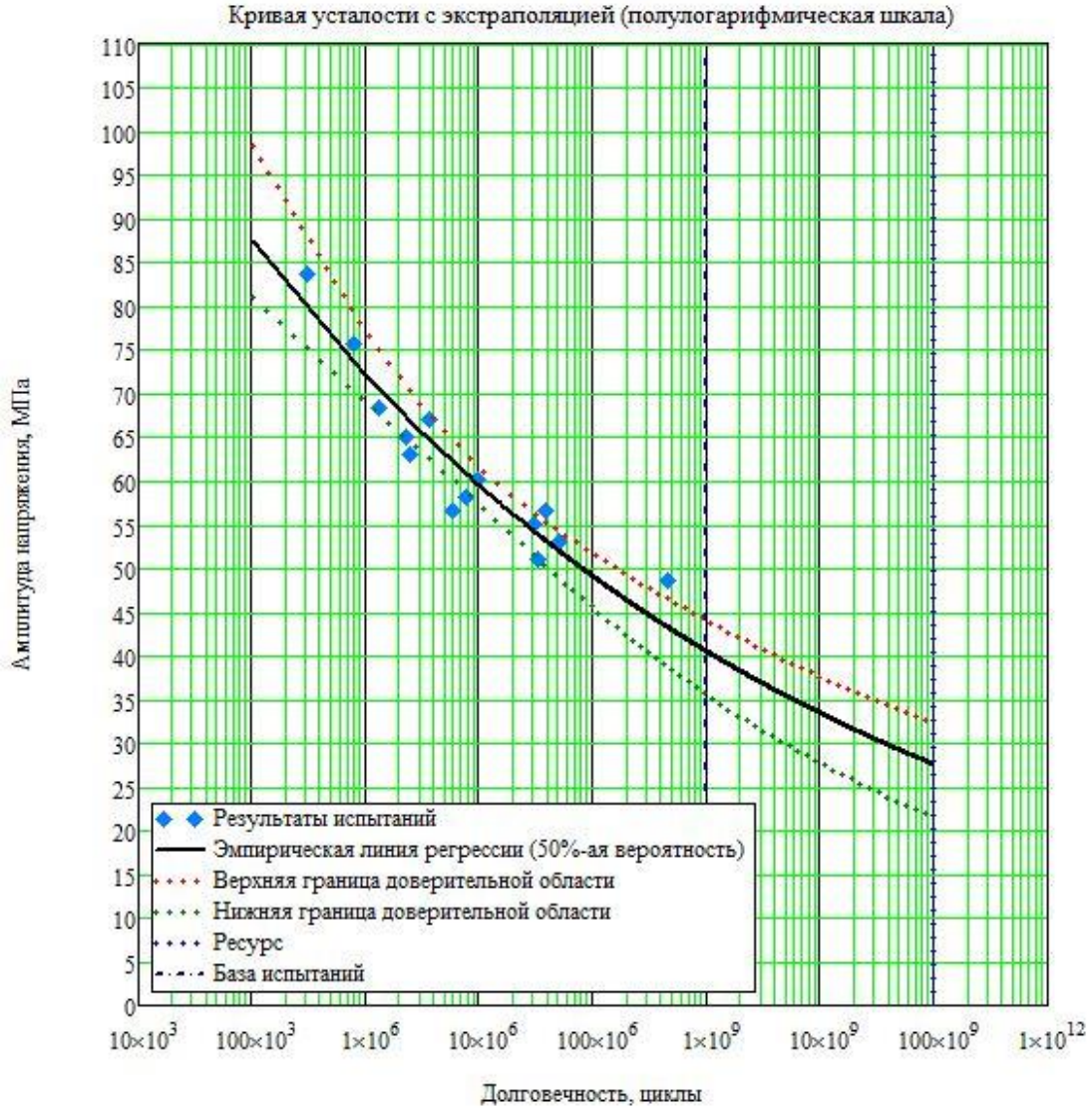


Рис. 5. Экстраполированная кривая усталости для плоских образцов из меди (полулогарифмическая шкала), температура образцов $+85^{O}$C.

Выполнив необходимые вычисления, приходим к результатам, приведенным в таблице 3.

Таблица 3.

Температура, ^{O}C	+20^{O}C						+85^{O}C					
Долговечность, циклов	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}
Предельная амплитуда цикла $\sigma_{a,N}$, МПа *)												
Цилиндр. образцы	84,4	70,7	59,2	49,6	**41,5**	**34,8**	72,2	60,4	50,5	42,3	**35,4**	**29,6**
Плоские образцы	74,9	63,2	53,4	45,1	**38,1**	**32,2**	72,1	59,5	49,0	40,5	**33,4**	**27,5**
Коэффициент чувствительности меди к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ												
	0,00	0,00	0,016	0,041	0,075	0,107	0,312	0,281	0,244	0,212	0,174	0,130

*) Результаты экстраполяции выделены жирным шрифтом.

5. Обсуждение полученных результатов

Представленные в таблице 3 результаты вычислений коэффициента чувствительности меди к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ позволяют определить зависимости этой механической характеристики материала от назначаемой долговечности и температуры (рис. 6), причем при комнатной и повышенной температурах эти зависимости имеют различный характер. Вероятно, этот эффект связан с эволюцией микроструктуры рассматриваемого сплава по мере увеличения циклической наработки, причем эволюция микроструктуры происходит различно при температурах +20^{O}C и +85^{O}C.

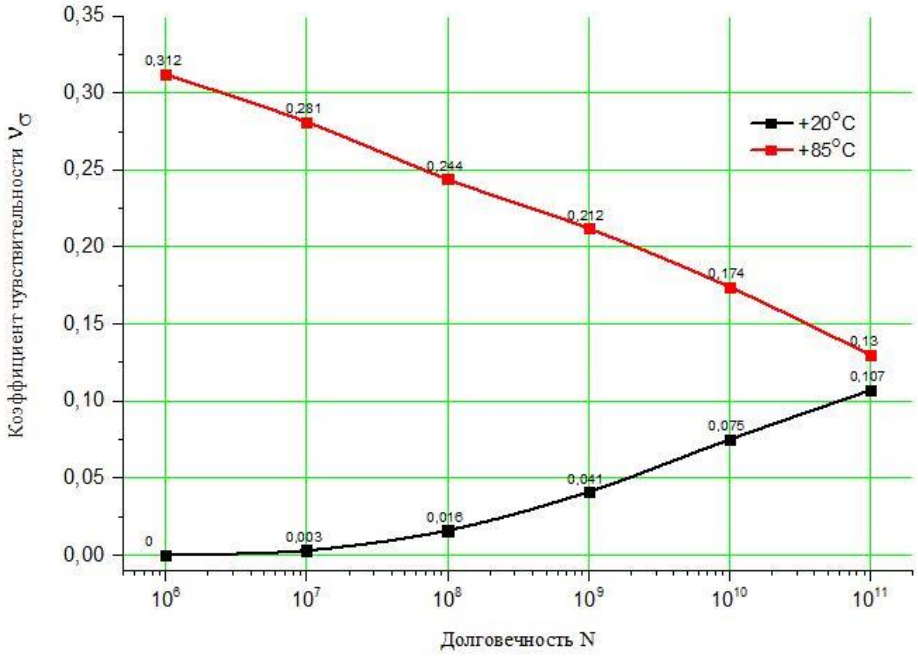


Рис. 6. Зависимости ν_σ от назначаемой долговечности для меди CuOF при комнатной и повышенной температурах (полулогарифмическая шкала).

Полученные величины коэффициента чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору (таблица 3) предоставляют возможность вычислить эффективные коэффициенты снижения предельной амплитуды цикла для подвергнутых испытаниям «не эталонных» образцов цилиндрического и плоского типа [5]

$$K_\sigma /_{K_{d\sigma}} = \frac{2 \cdot \alpha_\sigma}{1 + (\theta)^{-\nu_\sigma}} , \tag{3}$$

а также расчетным способом «восстановить» предельные амплитуды цикла и для «эталонных» образцов в зависимости от назначаемой долговечности

$$\sigma_{a,N,Э} = \frac{K_{d\sigma}}{K_\sigma} \cdot \sigma_{a,N} . \tag{4}$$

Таблица 3.

Эффективные коэффициенты снижения предельной амплитуды цикла $K = K_\sigma / K_{d\sigma}$							
Температура, ^{O}C		+20^{O}C					
Долговечность, циклов		10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}
$K_\sigma / K_{d\sigma}$	Цилиндр. образец	1,050	1,053	1,064	1,088	1,119	1,147
	Плоский образец	1,170	1,172	1,182	1,203	1,229	1,254
Предельная амплитуда цикла «эталонных» образцов $\sigma_{a,N,Э}$, МПа							
Испытания образцов цилиндрического типа		88,6	74,4	63,0	54,0	46,4	39,9
Испытания образцов плоского типа		87,6	74,1	63,1	54,3	46,8	40,4

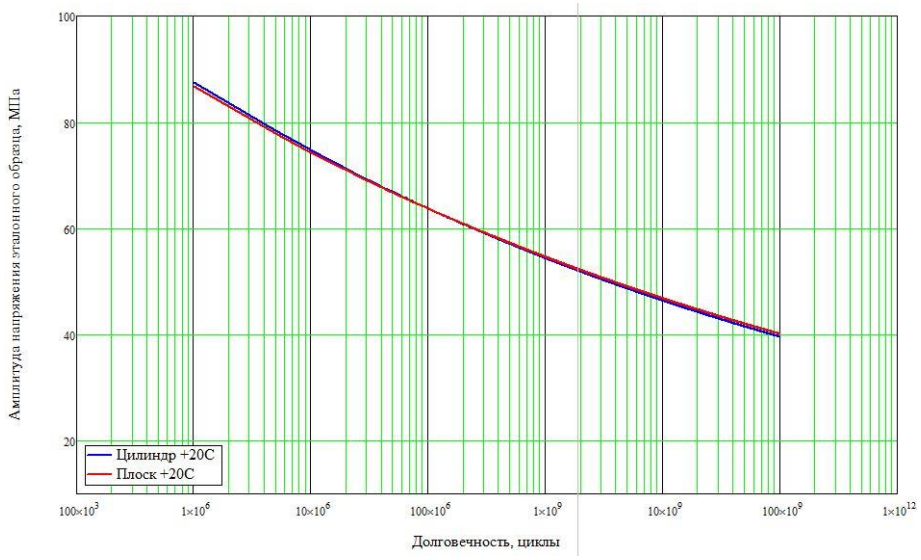


Рис. 7. Расчетные кривые усталости, соответствующие образцам «эталонного» типа (диаметр рабочей части 7,5 мм, изгиб с вращением), температура +20^{O}C.

Построенные по результатам этих вычислений «восстановленные эталонные» кривые усталости меди М3Р при температуре +20^{O}С практически совпадают (рис. 7, расчетные кривые, соответствующие испытаниям цилиндрических и плоских образцов при симметричном изгибе с вращением) и могут служить основой для оценки усталостной прочности проектируемых деталей.

Заслуживает внимания тенденция изменения ν_σ, вызванная увеличением числа циклов, то есть увеличением долговечности (рис. 6). Достаточно пластичный материал, – сплав меди М3Р, при комнатной температуре изначально (долговечность 1 млн. циклов) имеет высокую чувствительность к концентрации напряжений и малую чувствительность к абсолютным размерам (ν_σ близко к нулю). В то же время при повышенной температуре начальная чувствительность к концентрации напряжений оказывается более слабой, а чувствительность к абсолютным размерам оказывается более заметной, чем при комнатной температуре (ν_σ = 0,31 при долговечности 1 млн. циклов). По мере же циклической наработки различие для ν_σ при комнатной и повышенной температурах постепенно уменьшается ($\nu_\sigma \approx 0{,}1$ при обеих температурах и долговечности 100 млрд. циклов) и становиться весьма малым, что, возможно, представляет некоторую тенденцию к «стабилизации» частных свойств сопротивления усталости по мере циклической наработки. Однако для окончательной констатации этого эффекта требуются проведение дополнительных металлографических и механических исследований.

6. Заключение

Экспериментально установленное влияние долговечности и температуры на сопротивление усталости сплава меди М3Р в «гигацикловом» диапазоне долговечностей (долговечности выше 10^9 циклов) свидетельствует о тенденции к заметному изменению чувствительности сплава М3Р к концентрации напряжений и масштабному фактору по мере циклической наработки. Полученные результаты изменений ν_σ при комнатной и повышенной (+85^{O}С) температурах имеют различную тенденцию по мере увеличения долговечности, что, видимо, связано с эволюцией прочностных свойств сплава при циклических воздействиях.

Установленные результаты по определению коэффициента чувствительности к концентрации напряжений и масштабному фактору ν_σ могут быть полезны при проектировании элементов и деталей машин, изготовленных из сплава меди М3Р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

[2] ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, – М., Энергоатомиздат, 1989, 515 с.

[3] Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М. Машиностроение, 1977. – 232 с.

[4] Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М. Машиностроение, 1984. – 312 с.

[5] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. – М. «Машиностроение», 1985 – 224 с.

[6] Борисов С.П. Прогнозирование влияния конструктивных факторов на сопротивление усталости материалов. – Научный вестник МГТУ ГА, № 205, 2014. – С. 67 – 73.

[7] Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: «Мир», 1977, – 303 с.

[8] ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.

[9] Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. – М., «Машиностроение», 1985, – 232 с.

[10] L.Collini. Cooper alloys – early applications and current performance – enhancing procrsses, Intechweb.org, 2012, 186 p.

[11] N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures. – Natl. Inst. Stand. Technol. Mono. 177, U.S. Government Printing Office, Washington: 1992. – 850 p.

[12] Tanaka T., Sugioka T., Kobayashi T., Shohji I., Shimada Y., Watanabe H., Kamakoshi Y. Low-Cycle Fatigue Characteristics of Oxygen-Free Copper for Electric Power Equipment. Materials 2021, 14, 4237.

[13] Haftirman, Teguh Prioyono, Muhammad Kholil, Dinalant Al Tanggaraju, Mohd Arif Anuar Mohd Salleh, Farah Farhana Zainal, Prediction of fatigue strength of micro-specimen on copper and aluminium alloys under rotating bending load. AIP Conference Proceedings 2291, 020059, 2020.

[14] C. Mareau, F. Morel, A continuum damage mechanics-based approach for the high cycle fatigue behavior of metallic polycrystals., Int. Journal of Damage Mechanics, April 2018, – 21 p.

[15] ГОСТ 31382-2009. Медь. Методы анализа.

[16] ГОСТ 21073.1-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур.

[17] ГОСТ 859-2014. Медь. Марки.

[18] ASTM B601-18A Standard Classification for Temper Designations for Copper and Copper Alloys – Wrought and Cast, Standard by ASTM International, 2018.

E.I. Mansyrev[1], A.V. Emelyanov[1], O.G. Zotov[1]

ANNEALED COPPER M3P FATIGUE SENSITIVITY TO STRESS CONCENTRATION AND SCALE FACTOR INVESTIGATION

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

Abstract

Based on the test results for two types specimens at high-cycle fatigue under symmetric tension-compression for annealed copper M3P at temperatures of +20°C and +85°C the sensitivity to stress concentration and scale factor fatigue fracture have been investigated.

Key words: high-cycle fatigue test, durability, annealed copper M3P, statistical theory of fatigue fracture, coefficient of sensitivity to stress concentration and scale factor.

REFERENCES

[1] GOST 25.504-82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation.
[2] Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants, – M., “Energoatomizdat”, 1989, 515 p.
[3] Kogaev V.P. Strength calculations at stresses variable in time. – M. “Machinostroenie”, 1977. – 232 p.
[4] Bolotin V.V. Machines and structures fatigue life prediction. – M. “Machinostroenie”, 1984. – 312 p.
[5] Kogaev V.P, Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Machine parts and structures strength and durability calculation. Handbook. – M. “Machinostroenie”, 1985 – 224 p.
[6] Borisov S.P. Forecasting the influence of structural factors on resistance to materials fatigue. – MGTU Scientific bulletin, № 205, 2014. – P. 67 – 73.
[7] Peterson R.E. Stress concentration factors. – M.: «Mir», 1977, – 303 p.
[8] GOST 25.502-79. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue tests.
[9] Stepnov M.N. Statistical analysis methods of mechanical tests results. Handbook. – M., «Mechanical Engineering», 1985 – 232 p.

[10] L.Collini. Cooper alloys – early applications and current performance – enhancing processes, Intechweb.org, 2012, 186 p.
[11] N.J. Simon, E.S. Drexler, R.P. Reed. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures. – Natl. Inst. Stand. Technol. Mono. 177, U.S. Government Printing Office, Washington: 1992. – 850 p.
[12] Tanaka T., Sugioka T., Kobayashi T., Shohji I., Shimada Y., Watanabe H., Kamakoshi Y. Low-Cycle Fatigue Characteristics of Oxygen-Free Copper for Electric Power Equipment. Materials 2021, 14, 4237.
[13] Haftirman, Teguh Prioyono, Muhammad Kholil, Dinalant Al Tang-garaju, Mohd Arif Anuar Mohd Salleh, Farah Farhana Zainal, Pre-diction of fatigue strength of micro-specimen on copper and alumin-ium alloys under rotating bending load. AIP Conference Proceedings 2291, 020059, 2020.
[14] C. Mareau, F. Morel, A continuum damage mechanics-based ap-proach for the high cycle fatigue behavior of metallic polycrystals., Int. Journal of Damage Mechanics, April 2018, – 21 p.
[15] GOST 31382-2009. Copper. Methods of analysis.
[16] GOST 21073.1-75. Non-ferrous metals. Determination of grain Size by comparison with microstructure scale.
[17] GOST 859-2014. Copper. Grades.
[18] ASTM B601-18A Standard Classification for Temper Designations for Copper and Copper Alloys – Wrought and Cast, Standard ASTM International, 2018.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Н.Б.Мельникова[1], Е. В. Кудряшов[2]

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ФИЛЬТРАЦИЯ КОНТАКТНОГО НАЖАТИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПАНТОГРАФА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

[1]Наталия Борисовна Мельникова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7770, E-mail: melnikova_nb@spbstu.ru.

[2]Евгений Владимирович Кудряшов,
АО “Универсал-контактные сети”
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 323-16-16, E-mail: kev@uks.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены спектральные свойства колебаний контактной подвески высокоскоростной железнодорожной магистрали при движении поезда. Изучено влияние различных алгоритмов фильтрации динамики силы контактного взаимодействия пантографа и подвески на параметры, характеризующие качество токосъема. Результаты исследования показали, что границы полосных фильтров, рекомендованные стандартами проектирования, возможно должны быть пересмотрены, особенно для ВСМ со скоростью движения 400 км/ч, так как при повышенных скоростях движения возрастает частота периодических возмущений, действующих на пантограф и подвеску. По результатам тестирования методов фильтрации контактного нажатия необходимо отметить, что, несмотря на отсутствие требований к ФЧХ фильтра в стандарте проектирования, важно использовать фильтр с нулевой ФЧХ. В этом случае динамика контактного нажатия не сдвигается по времени, и можно адекватно судить о том, когда и где именно возникают пики значений контактного нажатия.

Ключевые слова: высокоскоростная железнодорожная магистраль, пантограф, контактная сеть, спектральный анализ, многополосный фильтр

Введение

Необходимым условием функционирования электрифицированной высокоскоростной железнодорожной магистрали является высокое качество токосъема, обеспечиваемое надежным контактом между контактным проводом и токоприемником. Значения силы контактного взаимодействия при этом ограничены как снизу (во избежание возникновения электрической дуги), так и сверху (для предотвращения интенсивного износа контактируемых поверхностей). При скоростях движения поезда, превышающих 200 км/ч, на динамику подвески вообще и динамику контактного нажатия, в частности, оказывают существенное влияние колебательные и волновые явления в контактной подвеске. Математическое моделирование широко применяется в мире при проектировании железнодорожных магистралей [1-3,5]. В рамках представляемого авторами проекта, ранее были разработаны нестационарные, геометрически нелинейные конечно-элементные модели механики контактных подвесок [1-3] и реализованы соответствующие программные средства. Модели прошли валидацию на соответствие европейскому стандарту EN 50318:2018 [[4]] путем сравнения результатов моделирования динамики взаимодействия эталонных моделей токоприемника и контактной подвески с нормированными стандартом данными и с результатами расчетов, представленными в статьях [9-20]. Разработанный программный комплекс был успешно применен для проектирования действующей контактной сети КС-250 Москва – Санкт-Петербург, а также проектов контактных сетей КС-400 Москва – Казань и КС-400 Москва – Санкт-Петербург [1-3].

Интегрирование динамики подвески во времени осложнено рядом факторов: во-первых, наличие высокочастотных составляющих колебаний подвески приводит к необходимости использования достаточно малого шага интегрирования и значительной трудоемкости вычислений (вопросы выбора оптимальных методов численного интегрирования, а также оптимизации и распараллеливания вычислений были рассмотрены в [Мельникова]). Во-вторых, конечно-элементная дискретизация подвески как системы гибких нитей вносит погрешность в ее частотные характеристики, приводя к появлению нефизичных высокочастотных осцилляций, подавляемых специальными техниками решения, включающими использование специальных интеграторов по времени (некоторых схем бета-Ньюмарка, обобщенных альфа методов) [[3]] и фильтрацию получаемых решений с помощью многополосных фильтров.

Алгоритмы фильтрации численных решений регламентированы стандартами проектирования [[4]], предусматривающими ограничение скорости поезда до 350 км/ч.

В данной работе анализируется применимость рекомендованных в [[4]] параметров фильтрации для скорости движения поезда 400 км/ч. Проведен спектральный анализ динамики контактного нажатия и изучено влияние алгоритмов фильтрации на выходные параметры решения, характеризующие качество токосъема.

Методы

Конечно-элементная модель контактной подвески

Пример цепной контактной подвески приведен на рис. 1. Элементы подвески (контактный и несущий тросы, поддерживающие струны, рессорные тросы) моделируются как идеально гибкие нити с использованием конечных элементов, работающих только на растяжение, с учетом разгрузки при возникновении отрицательной осевой силы. Несущие конструкции (поворотные консоли и фиксаторы) моделируются как элементы фермы, соединенные с контактной сетью. Несущие конструкции включены в модель для учета влияния их перемещений (например, вращения консолей) на положение и натяжение тросов контактной сети.

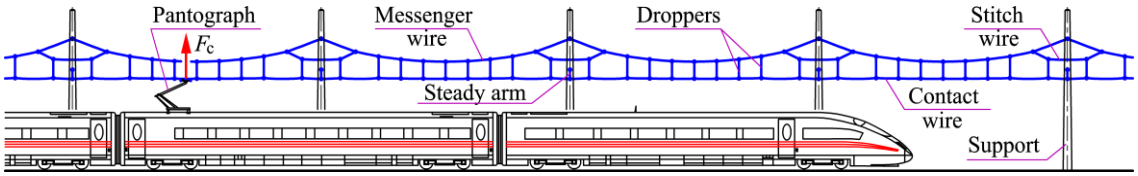


Рис. 1. Цепная контактная подвеска

На первом этапе моделирования решается геометрически нелинейная задача статики, далее на втором этапе решается линейная задача динамики - колебания подвески предполагаются достаточно малыми относительно статических прогибов. Уравнения, описывающие статику и динамику подвески, были подробно рассмотрены в [[3]].

Аналитическая оценка спектральных свойств колебаний подвески при движении пантографа

Для того чтобы оценить спектр частот колебаний подвески при движении пантографа, рассмотрим модельную задачу – колебания предварительно натянутого троса под действием движущейся сосредоточенной нагрузки.

Колебания троса будут описываться неоднородным уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} = F \cdot \delta(x - (x_0 + Vt)), \quad (1)$$

где *u(x,t)* – поперечное смещение сечения троса, *x* – продольная координата, *F* – величина приложенной нагрузки, отнесенная к погонной массе провода, x_0 – положение нагрузки в момент *t*=0, *V* – скорость движения нагрузки, $c = \sqrt{\frac{T}{m}}$ - скорость распространения поперечных колебаний по длине троса, β – коэффициент демпфирования.

Для простоты в дальнейшем считаем, что x_0=0.

Начальные условия в (1) предполагаются однородными:

$$u(x,t)\big|_{t=0} = 0, \quad \left.\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right|_{t=0} = 0.$$

Граничные условия для (1) задаются следующим образом:

$$u(x,t)\big|_{x=0} = u(x,t)\big|_{x=L} = 0$$

Частное решение уравнения (1) может быть найдено в виде:

$$u_{частное}(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} U_j(t) \sin\frac{j\pi x}{L}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), умножая обе части уравнения на $\sin\frac{k\pi x}{L}$ и интегрируя от 0 до *L*, с учетом ортогональности собственных функций, получаем обыкновенное дифференциальное уравнение для функции U_j:

$$\ddot{U}_j(t) + 2\beta\dot{U}_j(t) + \mu_j^2 U_j(t) = \frac{2F}{L}\sin\frac{j\pi Vt}{L}, \quad (3)$$

где $\mu_j = \frac{c\pi j}{L}$

Так как решение однородного уравнения при наличии демпфирования затухает, то со временем остаются только вынужденные колебания, которые определяются частным решением неоднородного уравнения (3). Оно будет иметь вид:

$$U_j(t) = \frac{2F}{L\sqrt{a_j^{\,2} + b_j^{\,2}}}\sin\frac{j\pi(Vt - x_j)}{L}, \quad \tan\frac{j\pi x_j}{L} = \frac{a_j}{b_j}, \quad (4)$$

где $a_j = 2\beta\left(\frac{j\pi V}{L}\right)$, $b_j = \mu_j^2 - \left(\frac{j\pi V}{L}\right)^2$.

Максимальное значение амплитуды $U_j(t)$ достигается при условии b_j=0, откуда получаем, что критическая (резонансная) скорость равна скорости распространения поперечных колебаний:

$$V_{кр} = c$$

Амплитуды первых 20 гармонических составляющих вынужденных колебаний троса, определяемых по формуле (4), проанализированы на рис. 2 для двух расчетных вариантов. В первом варианте, погонная масса и сила натяжения троса соответствуют параметрам контактного провода в валидационной эталонной подвеске А1 из стандарта [[4]]; длина троса

равна длине пролета эталонной подвески. Во втором варианте, рассмотрены параметры контактного провода для цепной подвески КС-400 (контактная сеть для скорости 400 км/ч). Значения параметров задачи для двух вариантов расчета приведены в табл. 1.

Амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний троса приведена на рис. 2. Из рис. 2 видно, что аналитическая оценка дает невысокий вклад мод с частотой выше 20 Гц; тем не менее, расчеты для эталонной задачи не согласуются с этой оценкой и показывают существенные высокочастотные колебания.

Таблица 1 – Параметры троса для аналитического расчета спектра колебаний

Вариант	Погонная масса, кг/м	Сила натяжения, кН	Длина, м	Скорость движения нагрузки (поезда), км/ч	Скорость распространения поперечных колебаний $c=\sqrt{\frac{T}{m}}$, км/ч
1. Пролет эталонной подвески А1	1,35	22	55	320	460
2. Пролет подвески КС-400	1.34	33,7	55	400	571

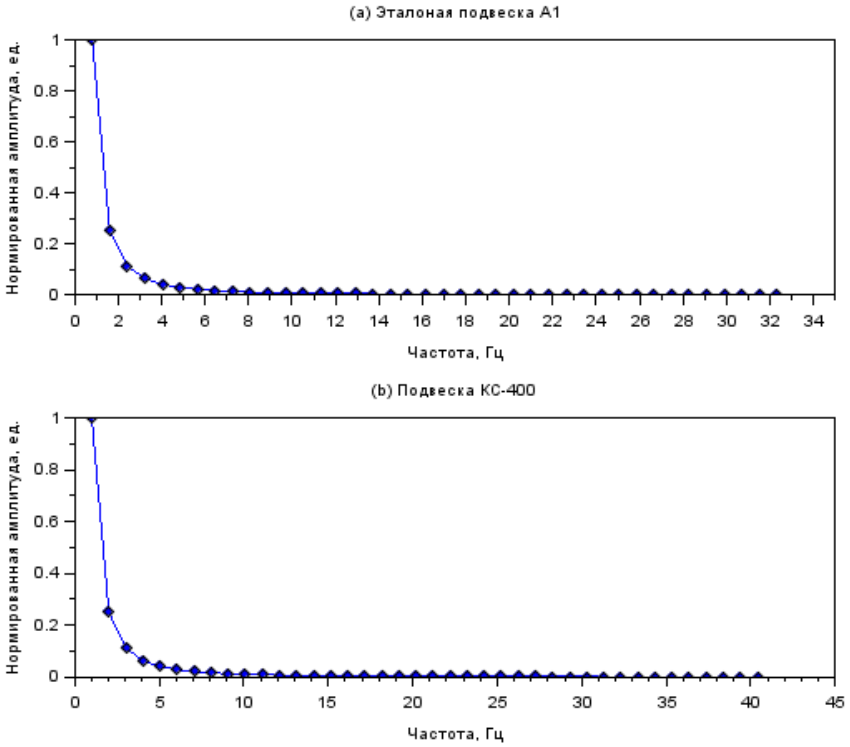


Рис. 2. Спектры вынужденных колебаний троса с параметрами (а) эталонной подвески А1 и (б) подвески КС-400 под действием движущейся нагрузки. Амплитуды колебаний нормированы к амплитуде первой гармоники.

Алгоритмы фильтрации выходного сигнала

При моделировании взаимодействия подвески и токоприемника зависимость контактного нажатия от времени *f(t)* фильтруется методами теории цифровой обработки сигналов [6-7]. Международный стандарт [[4]] предписывает обрабатывать контактное нажатие тремя различными фильтрами в полосах пропускания соответственно 0-20, 0-5 и 5-20 Гц, причем в некоторых случаях указано, что анализ необходимо проводить во временной области фильтром 6 порядка (или более), а в некоторых случаях – в частотной области посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). Выбор границ полос фильтрации обусловлен характерными частотами воздействия пантографа на подвеску: частоты прохождения пантографом железнодорожных опор и поддерживающих струн находятся в диапазонах 0-5 и 5-20 Гц, соответственно.

АЧХ классического фильтра Баттерворта нижних частот определяется выражением

$$|H(v)| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(v / v_{cut}\right)^{2n}}},$$

где v – частота, v_{cut} – частота среза, n – порядок фильтра.

Недостатком классического фильтра Баттерворта является ненулевая нелинейная ФЧХ: отфильтрованный сигнал сдвинут во времени относительно исходного.

Фильтр Баттерворта с нулевой ФЧХ обрабатывает входной сигнал дважды: в прямом и в обратном направлениях, и его АЧХ является квадратом АЧХ обычного фильтра Баттерворта:

$$|H(v)| = \frac{1}{1+\left(v / v_{cut}\right)^{2n}}.$$

На рис. 3 приведено сравнение АЧХ этих фильтров для частоты среза v_{cut}= 20 Гц и порядков фильтра 3 и 6. Если у классического фильтра Баттерворта частота среза соответствует уровню ослабления сигнала $1/\sqrt{2} \approx 0,707$, то у фильтра с нулевой ФЧХ – уровню 0,5. Кривая АЧХ фильтра с нулевой фазой – круче, чем у классического фильтра того же порядка, но все же более пологая, чем у классического фильтра удвоенного порядка.

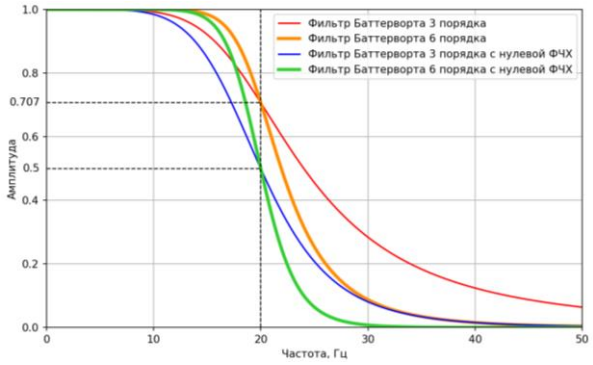


Рис. 3. АЧХ фильтров Баттерворта

Следующий рассмотренный фильтр – фильтр низких частот (ФНЧ), близкий к идеальному, реализован путем преобразования Фурье сигнала из временной области в частотную, обнуления в частотной области всех гармоник, превышающих частоту среза, и обратного преобразования Фурье во временную область. На выходе получаем сигнал с полным подавлением частот выше частоты отсечки и с сохранением без изменения остальных частот. Однако, в соответствии с теорией цифровых фильтров [6-7], такая внешне простая и эффективная реализация ФНЧ может давать искажения, связанные с дискретностью, а также конечностью сигнала во времени.

Для сглаживания искажений применяют различные методы на основе оконных функций. Для построения подобных фильтров не требуется даже выполнять БПФ, поскольку результат обратного преобразования Фурье от прямоугольной функции, соответствующей идеальной АЧХ, хорошо известен и представляет собой sinc-функцию. Свертка такой функции с исходным сигналом даст ровно тот же результат, что и описанный выше алгоритм ФНЧ с прямым и обратным преобразованием Фурье. Такой подход реализуется в оконном sinc-фильтре, представляющем собой нерекурсивный КИХ-фильтр с почти идеальной АЧХ. Оконный sinc-фильтр прост в реализации; он может быть выполнен с нулевой ФЧХ и иметь заданную ширину переходной зоны, имитирующей фильтры различного порядка других типов.

Результаты

Алгоритмы фильтрации тестировались на эталонной задаче А1 из [[4]] о нерессорной подвеске переменного тока с одним контактным проводом. Скорость движения поезда 320 км/ч. Численное интегрирование динамики подвески производилось методом бета-Ньюмарка с параметрами $\beta = 0.3025$, $\gamma = 0.6$. Несмотря на первый порядок точности данного метода, в [[3]] на исследовании ряда модельных задач было показано, что, при

достаточно малом шаге (порядка 1 мс), он обладает наилучшим демпфированием нефизичных высокочастотных мод, возникающих вследствие конечно-элементной дискретизации подвески.

Входной (подаваемый на фильтр) сигнал представляет собой динамику контактного нажатия, характеризуемую распределением (гистограммой) частоты попадания контактной силы в тот или иной интервал, а также спектральной характеристикой, полученной на основе анализа Фурье (см. “исходный сигнал” на рис. 4, 6, 7). На рис. 4 показано применение к исходному сигналу (контактному нажатию) фильтров Баттерворта 6 порядка – классического и с нулевой ФЧХ. На рис. 4 хорошо видно, что: (а) классический фильтр Баттерворта сдвигает сигнал во времени (и, следовательно, искажает информацию о том, где именно вдоль пути происходят те или иные эффекты); (б) фильтр Баттерворта с нулевой фазой сигнал не сдвигает, но «срезает» больше гармоник в верхней части спектра.

Применение к тому же сигналу фильтра низких частот показано на рис. 5. Как видно из рисунка, данный метод ближе к идеальному фильтру: все гармоники менее 20 Гц сохранены с высокой степенью точности, более 20 Гц – срезаны.

Применение к сигналу оконного sinc-фильтра с различными параметрами (с оконной функцией Блэкмана) показано на рис. 6. Значения параметров выбраны так, чтобы имитировать рассмотренные выше фильтры.

Характеристики фильтра с полной отсечкой частот более 20 Гц после БПФ и оконного sinc-фильтра с узкой переходной полосой 0,1 Гц практически совпадают – это почти идеальные фильтры. Оконный sinc-фильтр нижних частот с переходной полосой 12 Гц хорошо имитирует фильтр нижних частот Баттерворта с нулевой ФЧХ 6 порядка. Несколько хуже оконный sinc-фильтр «справляется» с имитацией классического фильтра нижних частот Баттерворта, но здесь расхождения могут быть связаны со сдвигом сигнала по времени фильтром Баттерворта.

Выше обсуждалось, что сдвиг сигнала допускать не следует, нам необходим фильтр с нулевой ФЧХ. Поэтому классический фильтр Баттерворта реализовывать не имеет смысла. Всем требованиям, в целом, соответствует оконный sinc-фильтр, и ему следует отдать предпочтение.

В табл. 1 приведены статистические характеристики сигнала после различных фильтров. Сгруппированы пары фильтров: «исходный» и оконный sinc-фильтр, который его имитирует.

Таблица 1 – Статистические характеристики сигнала после различных фильтров

Тип фильтра	F_m, Н	σ, Н	F_{max}, Н	F_{min}, Н
1.1. Фильтр нижних частот Баттерворта 6 порядка, 20 Гц	168,2	55,5	295,5	57,6
1.2. Оконный sinc-фильтр нижних частот, 22 Гц, переходная полоса 15 Гц	168,3	55,6	310,8	50,0
2.1. Фильтр нижних частот Баттерворта с нулевой ФЧХ 6 порядка, 20 Гц	168,3	53,8	298,5	52,5
2.2. Оконный sinc-фильтр нижних частот, 20 Гц, переходная полоса 12 Гц	168,3	53,8	297,7	52,9
3.1. Фильтр с полной отсечкой частот более 20 Гц после БПФ	168,3	55,6	293,2	36,9
3.2. Оконный sinc-фильтр нижних частот, 20 Гц, переходная полоса 0,1 Гц	168,3	55,6	293,1	36,8

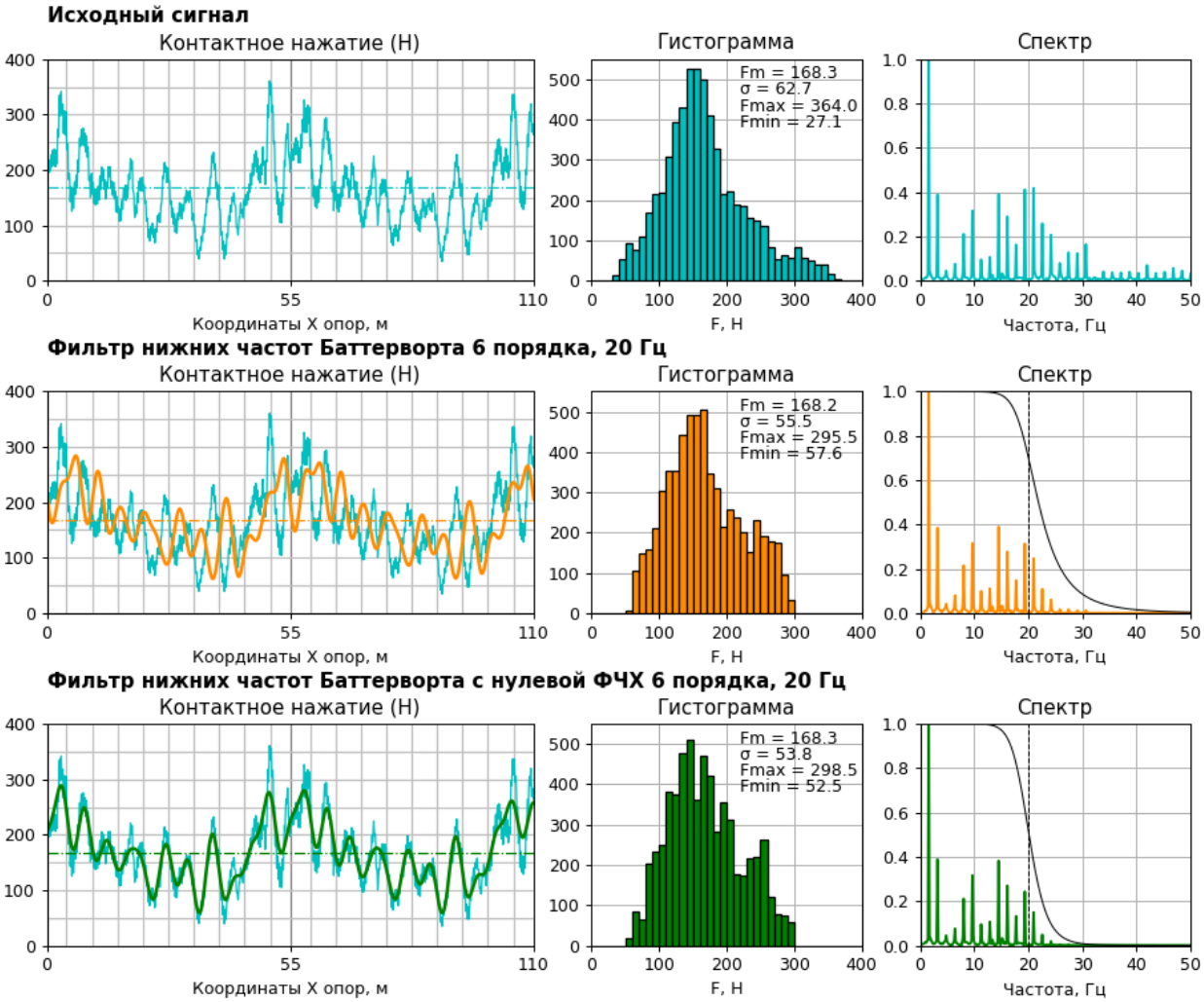


Рис. 4. Применение к сигналу различных фильтров Баттерворта

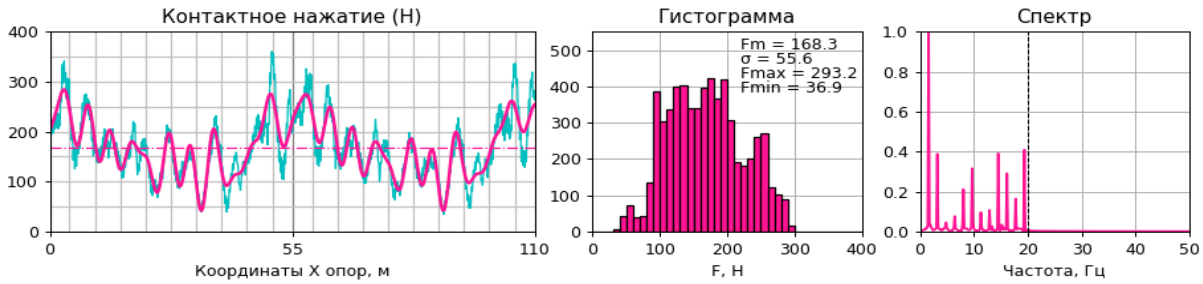


Рис. 5. Применение к сигналу фильтра низких частот (на основе отсечки верхних частот после БПФ). Исходный сигнал показан на рис.4.

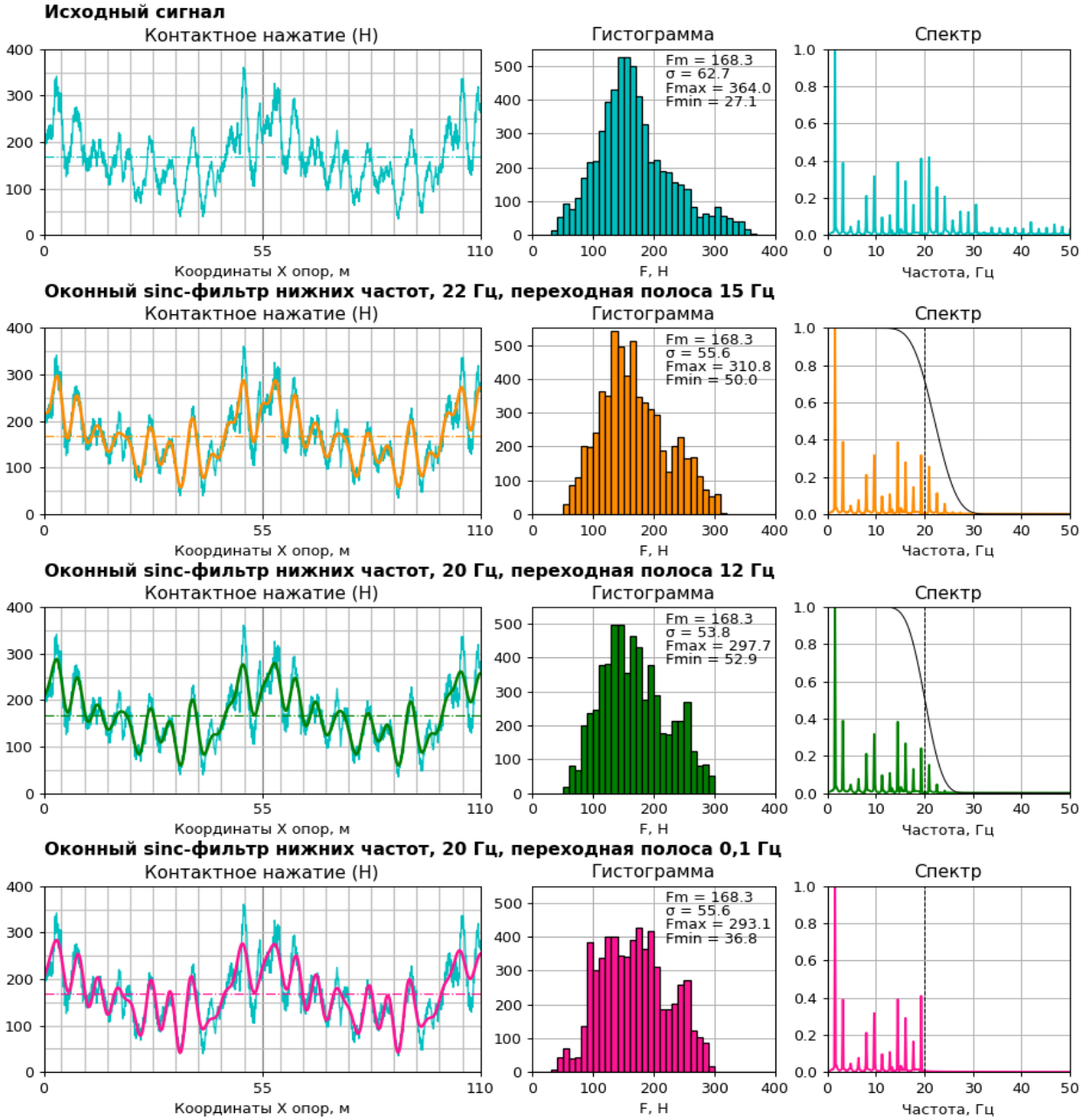


Рис. 6. Применение к сигналу оконного sinc-фильтра с различными параметрами (с оконной функцией Блэкмана)

Таким образом, для обеспечения соответствия требованиям EN 50318:2018 в части фильтрации контактного нажатия следует:

- Отфильтровать исходный сигнал ФНЧ с частотой среза 20 Гц с параметрами, соответствующими фильтру Баттерворта 6 порядка (классическому или с нулевой ФЧХ – предпочтение одному из них можно будет отдать в процессе валидации мат. моделей).
- Отфильтровать полученный по п. 1 сигнал ФНЧ с частотой среза 5 Гц с параметрами, имитирующими идеальный фильтр.
- Отфильтровать полученный по п. 1 сигнал ФПЧ с полосой 5-20 Гц с параметрами, имитирующими идеальный фильтр.

Пример соответствующей обработки сигнала приведен на рис. 7.

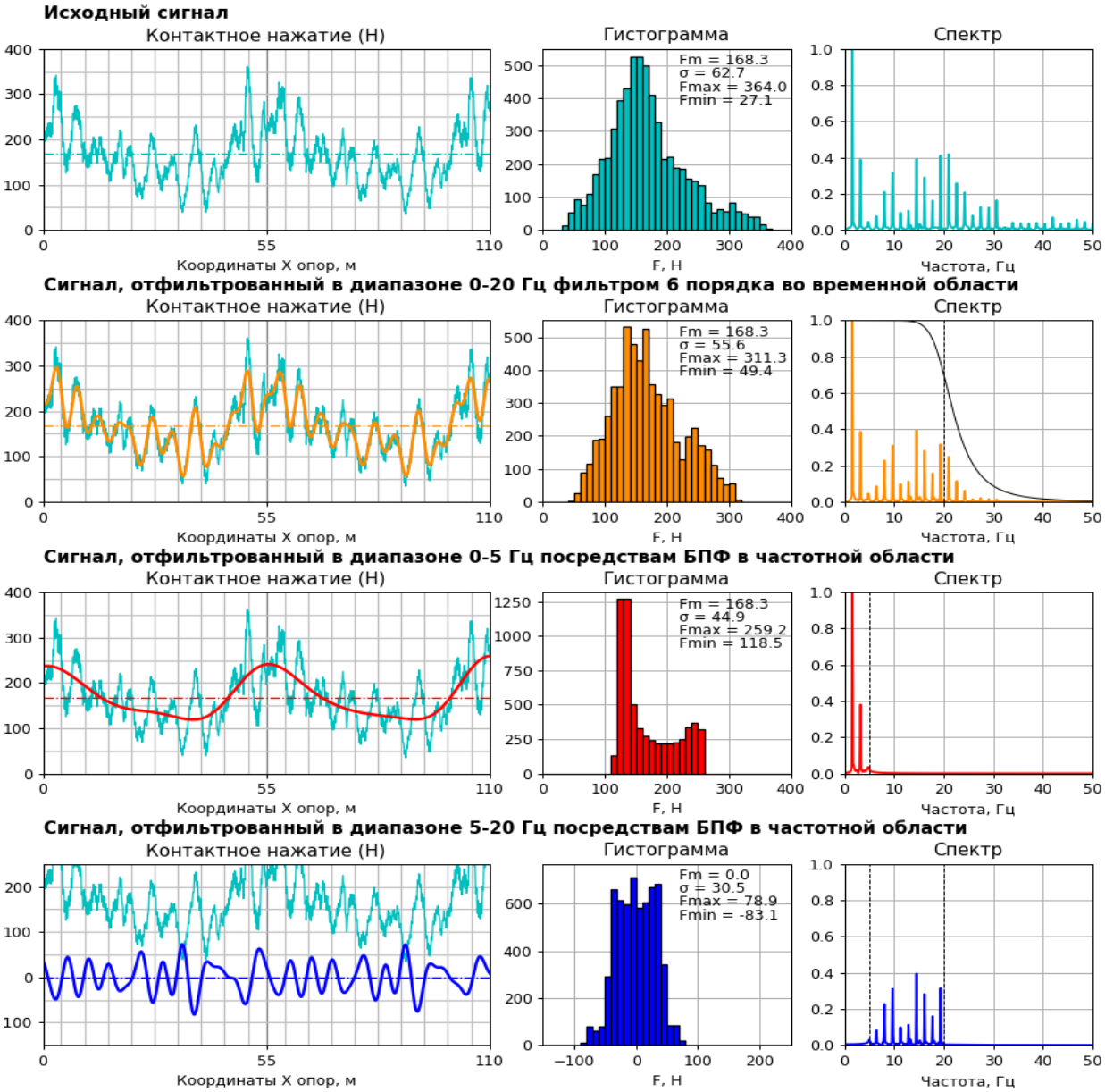


Рис. 7. Обработка сигнала тремя фильтрами в соответствии с требованиями EN 50318:2018

Обсуждение

В спектрах контактного нажатия при вынужденных колебаниях эталонной контактной подвески А1, полученных с помощью математического моделирования для скорости поезда 320 км/ч, выявлен значительный вклад мод с частотой выше 20 Гц. Частота прохождения струн пантографом при этом составляет около 10 Гц.

Стандарт проектирования [[4]] требует отфильтровывать моды выше 20 Гц. Однако, есть основания предполагать, что колебания с частотой выше 20 Гц возбуждаются в подвеске в реальности, и что они не являются целиком искусственным побочным эффектом, связанным с искажением частотных свойств подвески вследствие конечно-элементной дискретизации. Данное предположение высказывалось также в [8], и оно основано на том, что в результате отражения волн поперечных колебаний в подвеске, имеющей достаточно сложную конфигурацию, динамика контактного нажатия формируется как результат суперпозиции волн, отраженных от опор с фиксаторами, узлов крепления струн и от второго пантографа. Так как в аналитической, геометрически линейной модельной задаче с постоянной движущейся нагрузкой не имелось подобных препятствий, и сила контактного нажатия была постоянной (в силу линейности задачи), в спектре вынужденных колебаний модельной задачи значащего вклада частот выше 20 Гц замечено не было. Для дальнейшего исследования этой проблемы, планируется предпринять следующие шаги: (а) рассмотреть модельную задачу о колебаниях одиночного троса под действием движущейся осциллирующей нагрузки; (б) подробнее изучить влияние отражения волн на динамику контактного нажатия; (в) возможно, учесть дисперсию волн, возникающую в системе вследствие ненулевой изгибной жесткости тросов.

По результатам тестирования методов фильтрации контактного нажатия необходимо отметить, что, несмотря на отсутствие требований к ФЧХ фильтра в стандарте проектирования [[4]], важно использовать фильтр с нулевой ФЧХ. В этом случае динамика контактного нажатия не сдвигается по времени, и можно адекватно судить о том, когда и где именно возникают пики значений нажатия.

Заключение

В работе был проанализирован спектр вынужденных колебаний эталонной контактной подвески А1 при ее взаимодействии с пантографом для скорости движения поезда 320 км/ч. Получен значительный вклад мод с частотой выше 20 Гц. Существующие стандарты проектирования контактной сети требуют отсекать моды с частотой выше 20 Гц в

частотном домене. Скорость движения поезда ограничена стандартами значением 350 км/ч. По результатам моделирования, выдвинуто предположение о том, что границы полосных фильтров должны быть пересмотрены, особенно для ВСМ со скоростью движения 400 км/ч, так как при повышенных скоростях движения возрастает частота периодических возмущений, действующих на пантограф и подвеску.

Были протестированы алгоритмы фильтрации контактного нажатия. Для анализа во временном домене, фильтр Баттерворта 6-го порядка с нулевой ФЧХ дал наилучшее соответствие данным из стандарта [4]. В частотном домене, оконный sinc-фильтр наиболее приближен к идеальному фильтру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Григорьев Б.С., Головин О.А., Викторов Е.Д., Кудряшов Е.В. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог. Материаловедение. Энергетика. 2012. №4 (159)

[2] Кудряшов Е. В. Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 – СПб., 2010. – 187 с.

[3] Kudryashov Eu.V., Melnikova N.B. Parallel simulations of dynamic interaction between train pantographs and overhead catenary line. 2022. Communications in Computer and Information Science

[4] EN 50318:2018. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. 2018.

[5] Елисеев К.В. Тензометрическая колесная пара. Практическая реализация и некоторые результаты тестирования. Современное машиностроение: наука и образование 2021 (MMESE-21). Материалы 10-й Международной научной онлайн-конференции, с. 717-734.

[6] Smith S. W. The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing // California Technical Publishing San Diego, California, 2000. 654 p.

[7] Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / [пер. с англ. И. Ю. Дорошенко, А. В. Назаренко ; под ред. А. В. Назаренко]. 2-е изд. М. ; СПб. ; Киев : Вильямс, 2004. 992 с

[8] Y. Song, A. Rønnquist, P. Nåvik, "Assessment of the High-Frequency Response in Railway Pantograph-Catenary Interaction Based on Numerical Simulation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 10, pp. 10596-10605, Oct. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3015044.

[9] Facchinetti A., Bruni S. Special issue on the pantograph–catenary interaction benchmark // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 303–304.
[10] Finner Lars, Poetsch Gero, Sarnes Bernhard, Kolbe Michael. Program for catenary–pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318. // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 305–313.
[11] Ambrósio Jorge, Pombo João, Antunes Pedro, Pereira Manuel. PantoCat statement of method // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 314–328.
[12] Cho Yong Hyeon. SPOPS statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 329–340.
[13] Jönsson Per-Anders, Stichel Sebastian, Nilsson Cecilia. CaPaSIM statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 341–346.
[14] Collina Andrea, Bruni Stefano, Facchinetti Alan, Zuin Andrea. PCaDA statement of methods // Vehicle System Dynamics, 2015. 53(3), pp. 347–356.
[15] Ikeda Mitsuru. 'Gasen-do FE' statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 357–369.
[16] Massat Jean-Pierre, Balmes Etienne, Bianchi Jean-Philippe, Van Kalsbeek Guido. OSCAR statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 370–379.
[17] Zhou Ning, Lv Qingsong, Yang Yi, Zhang Weihua. <TPL-PCRUN> Statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 380–391.
[18] Sánchez-Rebollo C., Carnicero A., Jiménez-Octavio J.R. CANDY statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 392–401.
[19] Tur M., Baeza L., Fuenmayor F.J., García E. PACDIN statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 402–411.
[20] Bruni S., Ambrosio J., Carnicero A., Cho Y.-H., Finner L., Ikeda M. et al. The results of the pantograph–catenary interaction benchmark // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 412–435.

N.B.Melnikova[1], .Eu.V.Kudryashov[2]

SECTRAL ANALYSIS AND FILTRATION OF CONTACT INTERACTION FORCE BETWEEN HIGH-SPEED TRAIN PANTOGRAPH AND OVERHEAD CATENARY LINE

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Universal-Contact Nets, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

The paper presents the study of spectral characteristics of driven oscillations of the catenary – pantograph interaction at the high-speed railway line. The influence of various algorithms for filtering the dynamics of the contact force on the parameters characterizing the quality of the current collection has been studied. The results of the study have shown that the boundaries of the band filters recommended by the design standards may need to be revised, especially for high-speed lines with a speed of 400 km/h, since at higher speeds the frequency of periodic disturbances acting on the pantograph and suspension increases. According to the results of testing methods for filtering contact pressure, it should be noted that, despite the absence of requirements for the filter phase response in the design standard, it is important to use a filter with a zero phase response. In this case, the dynamics of the contact pressure does not shift in time, and one can adequately judge when and where exactly the peaks of the contact pressure values occur.

Key words: high-speed railway line, pantograph, overhead catenary line, multiband filter

REFERENCES

[1] Grigoryev B.S., Golovin O.A., Viktorov Ye.D., Kudryashov Eu.V. Matematicheskoe modelirovanie mehanicheskogo vzaimodeystviya tokopriemnikov i kontaktnoy podveski dlya-skorostnyh electrificirovannih zheleznih dorog. Nauchno-Tehnicheskiye Vedomosti SPbSTU 4, 155-162 (2012).

[2] Kudryashov, E.: Sovershenstvovaniye mehanicheskih raschetov kontaktnih podvesok na osnove staticheskih konechno-elementnih modeley (in Russian). PhD Thesis. Saint-Petersburg (2010)

[3] Kudryashov Eu.V., Melnikova N.B. Parallel simulations of dynamic interaction between train pantographs and overhead catenary line. 2022. Communications in Computer and Information Science

[4] EN 50318:2018. Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. 2018.
[5] Eliseev K.V. Instrumented wheelset. Practical implementation and some results of practical testing. Advances in Mechanical Engineering. 2021 (MMESE-21). 10-th International scientific online conference, pp. 717-734.
[6] Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing // California Technical Publishing San Diego, California, 2000. 654 p.
[7] Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход / [пер. с англ. И. Ю. Дорошенко, А. В. Назаренко ; под ред. А. В. Назаренко]. 2-е изд. М. ; СПб. ; Киев : Вильямс, 2004. 992 с
[8] Y. Song, A. Rønnquist, P. Nåvik, "Assessment of the High-Frequency Response in Railway Pantograph-Catenary Interaction Based on Numerical Simulation," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 10, pp. 10596-10605, Oct. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3015044.
[9] Facchinetti A., Bruni S. Special issue on the pantograph–catenary interaction benchmark // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 303–304.
[10] Finner Lars, Poetsch Gero, Sarnes Bernhard, Kolbe Michael. Program for catenary–pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318. // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 305–313.
[11] Ambrósio Jorge, Pombo João, Antunes Pedro, Pereira Manuel. PantoCat statement of method // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 314–328.
[12] Cho Yong Hyeon. SPOPS statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 329–340.
[13] Jönsson Per-Anders, Stichel Sebastian, Nilsson Cecilia. CaPaSIM statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 341–346.
[14] Collina Andrea, Bruni Stefano, Facchinetti Alan, Zuin Andrea. PCaDA statement of methods // Vehicle System Dynamics, 2015. 53(3), pp. 347–356.
[15] Ikeda Mitsuru. 'Gasen-do FE' statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 357–369.
[16] Massat Jean-Pierre, Balmes Etienne, Bianchi Jean-Philippe, Van Kalsbeek Guido. OSCAR statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 370–379.
[17] Zhou Ning, Lv Qingsong, Yang Yi, Zhang Weihua. <TPL-PCRUN> Statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 380–391.
[18] Sánchez-Rebollo C., Carnicero A., Jiménez-Octavio J.R. CANDY statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 392–401.
[19] Tur M., Baeza L., Fuenmayor F.J., García E. PACDIN statement of methods // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 402–411.
[20] Bruni S., Ambrosio J., Carnicero A., Cho Y.-H., Finner L., Ikeda M. et al. The results of the pantograph–catenary interaction benchmark // Vehicle System Dynamics. 2015, 53 (3) pp. 412–435.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

С. В. Никитин[1], Д.Е.Бортяков[2], А.А. Грачев[3]

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НОЖНИЧНОГО ПОДЪЕМНИКА

[1]Сергей Васильевич Никитин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: sergey_nikj@mail.ru

[2]Бортяков Данил Евгеньевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: bortyakov@mail.ru

[3]Алексей Андреевич Грачев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-8401, E-mail: springbird@mail.ru

Аннотация

При оптимизации сложных технических систем часто не представляют сам алгоритм оптимизации и не говорят об эффективности используемого метода, показывая только конечный результат. Однако сам процесс мог занять значительное время или прийти к одному из локальных оптимумов, не найдя глобального.

В статье исследуется эффективность процесса оптимизации конструкции ножничного подъемника. Представлен алгоритм оптимизации, математическая модель объекта и проведенные численные эксперименты. Результаты численных экспериментов позволяют судить об эффективности предложенного алгоритма. Под эффективностью здесь понимается процент случаев расчета давших наилучшие результаты в сравнении с полным количеством попыток решения этой же задачи при различных начальных условиях.

Ключевые слова: методы оптимизации, методы оптимизации с учетом ограничений, техническая система, многосекционный ножничный подъемник, статическая модель

Введение

Оптимизации технических систем сегодня уделяется значительное внимание при их проектировании и использовании.

Во многих случаях проектирование систем и технических объектов часто ведется при помощи интуитивной оптимизации, когда создатель, основываясь на своем опыте, выбирает “наилучшие”, с его точки зрения, параметры, или рассматривает только несколько вариантов реализации системы из которых выбирается лучший [1, 2].

Прямое использование известных методов оптимизации считается сложным в инженерной практике. Эти методы часто применяются на уровне исследования объектов и систем, или встроены в специализированное ПО, где способ их реализации скрыт от инженера.

Существующие базовые методы оптимизации хорошо описаны в известных источниках [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Они включают в себя методы минимизации функций одной переменной, методы минимизации функций нескольких переменных с возможностью учета ограничений различных типов. Здесь обычно приводят основные математические соотношения, алгоритмы и решение нескольких простых абстрактных задач, не имеющих ничего общего с реальными техническими системами.

Эффективность использования этих методов для реальных систем обычно зависит от поставленной задачи и начальных приближений параметров оптимизируемой системы. Начальные приближения параметров системы задаются случайным образом. Критерий оптимизации часто оказывается нелинейной разрывной функцией. При таких условиях велика вероятность найти одно из локальных решений, которое будет далеко от оптимального. В большинстве работ на эти обстоятельства закрывают глаз [9, 10, 11], а алгоритм оптимизации и используемые методы остаются за кадром.

В данной работе предлагается оценить эффективность методики оптимизации, построенной на базовых методах, простой механической системы, многосекционного ножничного подъемника. Несмотря на то, что данный объект имеет простую конструкцию, ее расчет в аналитическом виде часто вызывает проблемы у инженеров и решается с применением CAD систем [12, 13]. С точки зрения предлагаемого ниже метода оптимизации необходимо рассматривать его аналитическую модель [14, 15, 16].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана двухуровневая процедура оптимизации, в которой варьировались непрерывные и дискретные параметры исследуемого объекта и учитывались заданные технические ограничения. Основным критерием является минимум массы металлоконструкции ножничного механизма;
- создана расчетная модель многосекционного ножничного подъемника;
- проведен ряд численных экспериментов при различных начальных параметрах объекта оптимизации и исследованы полученные результаты.

Методика оптимизации конструкции ножничного подъемника

Схема оптимизируемой конструкции представлена на рисунке 1, а. Заданными являются следующие параметры: ns – количество секций подъемника; m_L, l_{CL} – масса груза и длина проекции на горизонтальную ось расстояния от неподвижного шарнира до его центра тяжести; m_P, l_{CP} – масса платформы подъемника и длина проекции на горизонтальную ось расстояния до её центра тяжести; f_S – коэффициент трения между ползуном и основанием, и ползуном и грузовой платформой; f_J – коэффициент трения в шарнирах подъемника; d_J – диаметр осей шарниров; H_{MAX*}, H_{MIN*} – требуемые максимальная и минимальная высоты подъема; K_X – параметр минимально допустимого положения ползуна, равный отношению минимального расстояния (X_{MIN}) от неподвижного шарнира подъемника к максимальному (X_{MAX}).

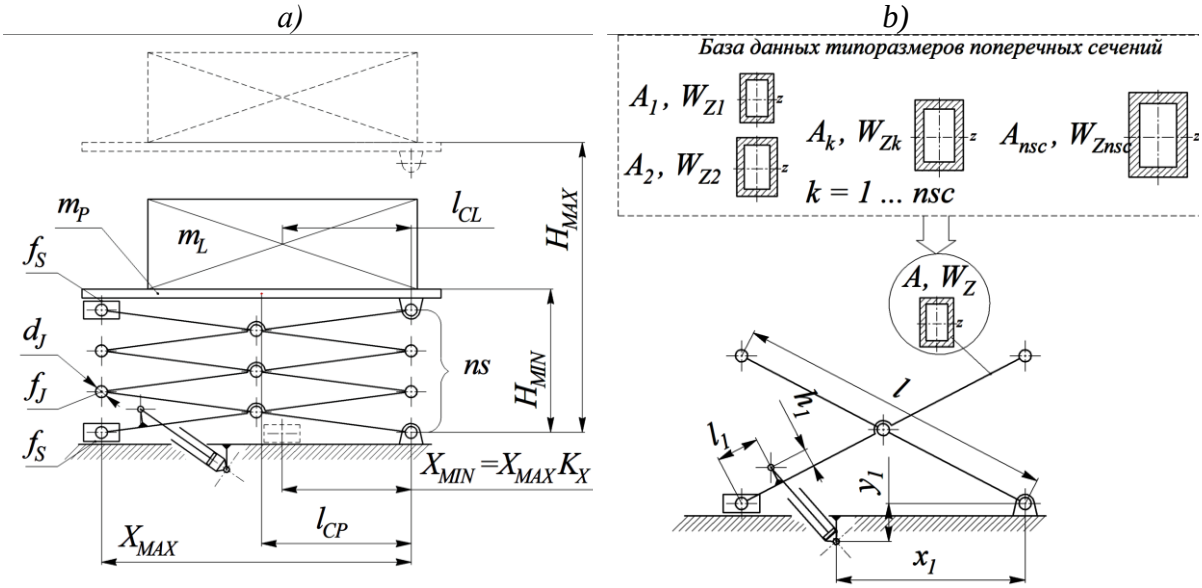


Рис.1. Схема ножничного подъемника. Исходные данные к оптимизации конструкции ножничного подъемника (а), оптимизируемые параметры (b)

Прочность конструкции определяется допускаемыми изгибными напряжениями [σ] в рычагах подъемника.

Оптимизируемые параметры представлены на рис. 1, b. К ним относятся: длина рычагов l подъемника, координаты расположения креплений силового агрегата к основанию (x_1, y_1) и к рычагу подъемника (l_1, h_1), параметры поперечного сечения рычагов подъемника – площадь поперечного сечения A и момент его сопротивления Wz. Принято, что в процессе оптимизации каждой секции подъемника могут быть подобраны свои размеры поперечных сечений рычагов, так как их нагруженность будет различной. При этом выбор сечений производится из ряда стандартных поперечных сечений профилей.

В представленных алгоритмах оптимизируемые параметры сведены в два вектора: $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{q}$.

Вектор $\boldsymbol{p}$ содержит набор непрерывно изменяющихся параметров (l, x_1, y_1, l_1, h_1) (рис.1, b), относящихся ко всей конструкции.

Вектором $\boldsymbol{q}$ определяются параметры сечений рычагов подъемника. Он содержит «ns» элементов, по количеству секций подъемника, которые указывают номера типоразмеров сечений из базы данных. Поэтому запись $\boldsymbol{q}(i)$ обозначает – номер поперечного сечения из базы данных для i-й секции подъемника, причем верхняя секция считается первой (i=1).

Глобальным критерием оптимизации является масса металлоконструкции ножничного механизма, без учета опорных конструкций и грузовой рамы. Она определяется длиной рычагов подъемника l, площадью поперечного сечения A (рис. 1, b) и плотностью материала ρ

$$M(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q}) = 4{,}5 \cdot \boldsymbol{p}(l) \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{ns} A(\boldsymbol{q}(i)). \qquad (1)$$

Коэффициентом 4,5 учтена дополнительная масса четырех рычагов секций и условная дополнительная масса конструкции от поперечин, шарниров и т.д.

Обобщенный алгоритм вычислений представлен на рис.2. Он включает в себя стадию введения начальных значений параметров конструкции, стадию определения начальных значений оптимизируемых параметров в векторах $\boldsymbol{p0}$, $\boldsymbol{q0}$ и требуемой точности оптимизации параметров вектора $\boldsymbol{p}$ – epsP и массы конструкции epsM. Потом осуществляется предварительный подбор поперечных сечений конструкции при помощи функции OPTIMIZE_Q. После этого запускается собственно цикл оптимизации, заканчивающийся проверкой условия окончания итерационного процесса.

Цикл оптимизации включает два этапа. На первом этапе изменяются параметры вектора $\boldsymbol{p}$ при помощи функции p1=OPTIMIZE_P, а на втором этапе в функции q1=OPTIMIZE_Q подбираются поперечные сечения

рычагов подъемника. Затем вычисляется новое значение массы конструкции M1 и сравнивается с исходным M0. Сравниваются начальное и конечное значения вектора $\boldsymbol{p}$. Если массы конструкции M1 и M0 оказываются близки друг к другу на величину меньшую, чем epsM, и вектора p1 и p0 также оказываются близки на величину меньшую, чем epsP, то цикл заканчивается.

Каждый этап оптимизации выполняет преобразования над своим набором параметров, поэтому порядок их следования в алгоритме может быть иным (рис. 2, variant B), что может привести к получению других результатов, даже при одних и тех же заданных начальных параметрах $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{q}$.

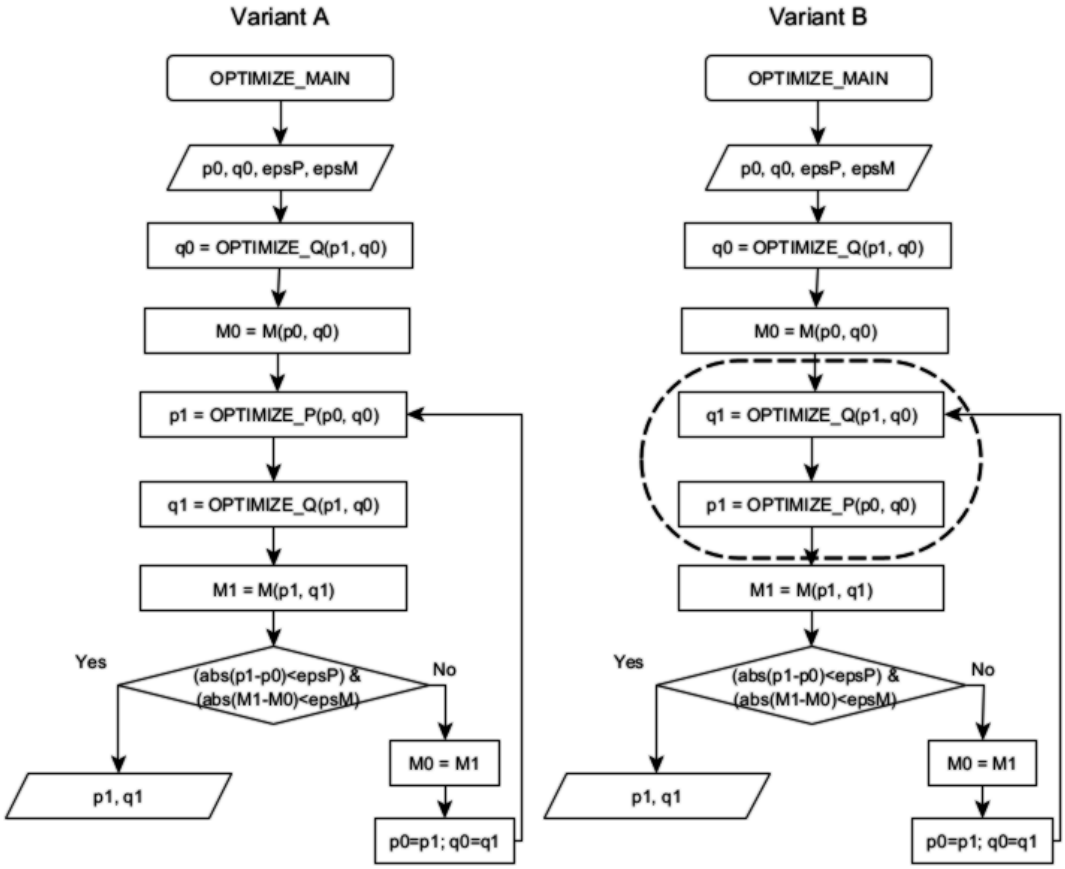


Рис.2. Обобщенный алгоритм оптимизации конструкции ножничного подъемника

Первый этап цикла оптимизации осуществляется функцией $\boldsymbol{p}_{new}$ = OPTIMIZE_P($\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$). Из выражения (1) ясно, что изменение параметров вектора $\boldsymbol{p}$, кроме длины рычагов подъемника, не приведет к изменению массы всей конструкции. Поэтому в качестве критерия оптимизации на данном этапе применять условие минимума массы нерационально.

Нагрузки, а значит и напряжения в элементах подъемника будут различны на различной высоте его подъема. При этом на некоторых высотах, особенно близких к мертвым положениям механизма напряжения в конструкции при определенных ее параметрах могут превышать

допускаемые. Следовательно, нужно искать такие значения параметров вектора $\boldsymbol{p}$, чтобы условие прочности удовлетворялось на всем заданном диапазоне высот от H_{MIN*} до H_{MAX*}.

Таким образом, в качестве критерия оптимальности на первом этапе принято условие максимизации действительного рабочего диапазона высот ножничного подъемника, который будет отличаться от заданного при неудовлетворении требований прочности механизма

$$\Delta H = H_{MAX} - H_{MIN} \rightarrow max. \quad (2)$$

Задачу поиска текущего рабочего диапазона высот осуществляет функция SCISSOR_Hminmax($\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$), используемая в алгоритме (рис. 3). Она рассчитывает максимальные изгибные напряжения в конструкции при нескольких различных высотах положения подъемника; выбирает те положения, максимальные напряжения при которых близки к допускаемому (метод перебора); затем находит более точным методом (методом дихотомии или золотого сечения) граничных значения рабочих высот H_{MIN} и H_{MAX}.

Алгоритм функции оптимизации OPTIMIZE_P($\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$), параметров вектора $\boldsymbol{p}$ представлен на рис. 3. Он представляет собой шаг метода наискорейшего спуска или же проход по всем оптимизируемым параметрам для метода покоординатного спуска [3, 4, 6, 7].

После получения начальных значений векторов $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{q}$, и задания требуемой точности вычислений eps, производится вычисление направления изменения вектора $\boldsymbol{p}$ – вектор $\Delta\boldsymbol{p}$.

Затем выполняется цикл, выделенный прямоугольником 1 (рис.3), поиска области параметров [**Pa**, **Pb**] в которой находится искомое их значение, соответствующее максимальному диапазону высот ΔH (эвристический метод Свена).

Поиск вектора параметров $\boldsymbol{p}$, максимизирующего функционал $\Delta H(\boldsymbol{p})$, в алгоритме осуществляется методом дихотомии [4, 6, 7]. Соответствующий этой процедуре цикл в алгоритме выделен прямоугольником 2 (рис. 3). Каждая итерация цикла уменьшает область поиска [**Pa**, **Pb**] в два раза. Цикл завершается, когда длина области становится меньше требуемой точности вычислений eps.

Второй этап осуществляется процедурой OPTIMIZE_Q($\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$), которая подбирает параметры поперечных сечений рычагов подъемника таким образом, чтобы удовлетворялись условия работоспособности механизма и значения характеристик сечения были бы минимальны. Алгоритм процедуры OPTIMIZE_Q($\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$) представлен на рис. 4.

Каждый элемент вектора $\boldsymbol{q}$ содержит номер поперечного сечения из базы данных (рис.1) для конкретной секции подъемника. Количество элементов в векторе $\boldsymbol{q}$ соответственно равно «ns» и совпадает с количеством секций подъемника.

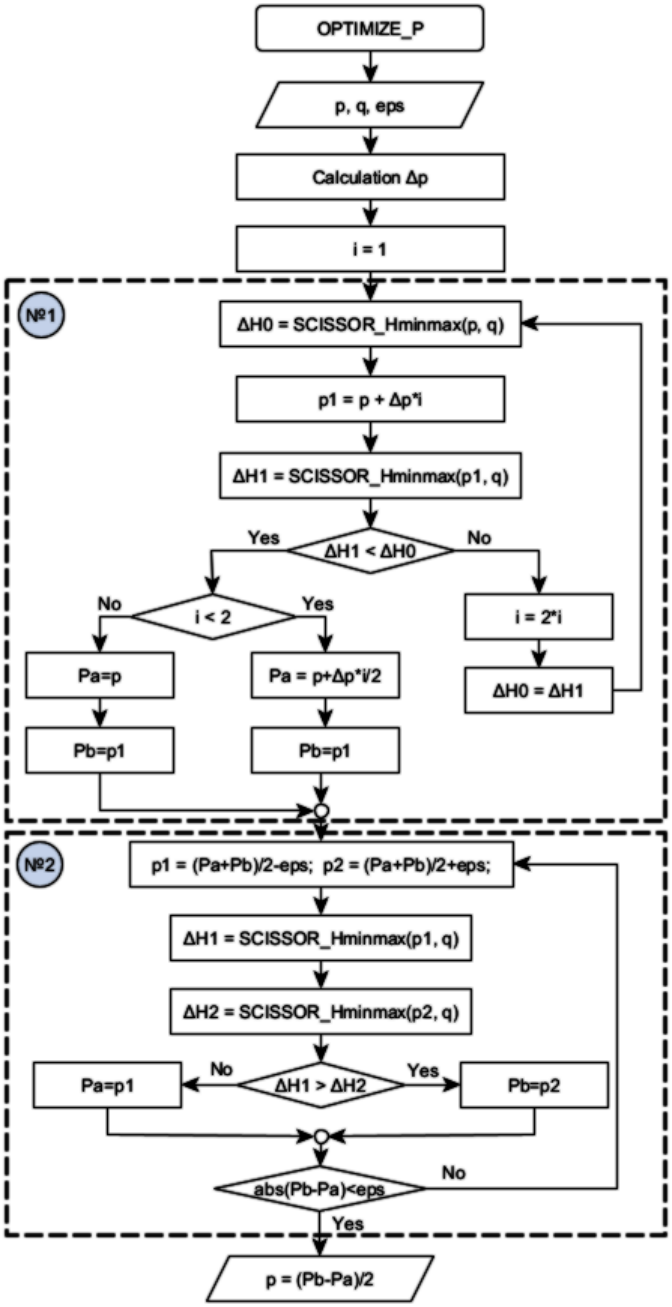


Рис.3. Алгоритм оптимизации параметров вектора ***p*** конструкции ножничного подъемника

Характеристики поперечных сечений – площадь сечения *A(k)*, момент сопротивления *Wz(k)* и др. содержатся в базе данных (рис.1). Количество элементов в базе данных задано параметром «ncs». Все поперечные сечения в базе отсортированы по возрастанию параметра *Wz(k)* , т.к. он в явном виде входит в условие работоспособности механизма

$$\sigma(j) = \frac{M_{MAX}(j)}{Wz(q(j))} \leq [\sigma], \quad j = 1 \dots ns, \tag{3}$$

где j – номер секции подъемника; $M_{MAX\ j}$ – максимальный изгибающий момент в рычагах j-й секции подъемника, [σ] – допускаемое напряжение изгиба. Не явно в условие работоспособности входит и площадь поперечного сечения, т.к. она определяет нагрузки элементов конструкции, которые учитываются при расчете изгибающих моментов.

Можно так же в алгоритм добавить и другие условия работоспособности – жесткости, упругой устойчивости и др.

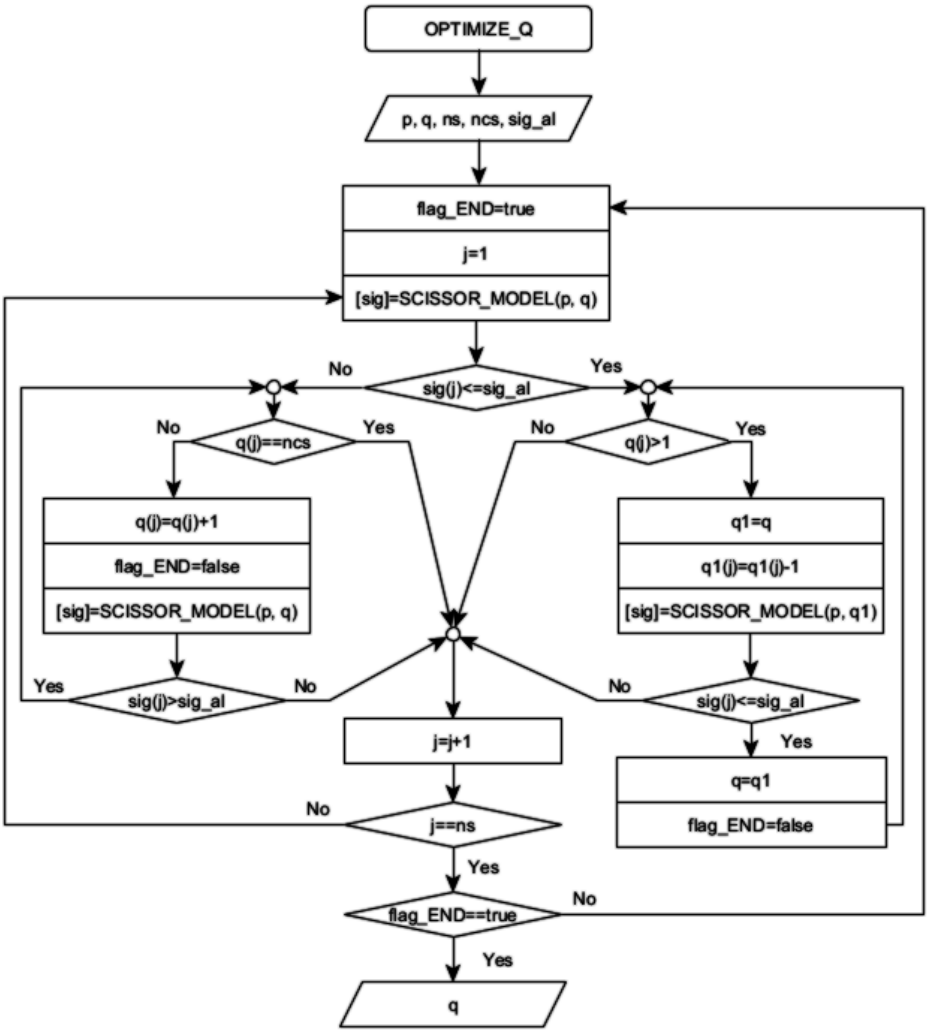


Рис.4. Алгоритм оптимизации параметров поперечных сечений рычагов ножничного подъемника

В алгоритме (рис. 4) изгибные напряжения «sig» рассчитываются подпрограммой SCISSOR_MODEL(***p***, ***q***), содержащей математическое описание модели ножничного подъемника.

Алгоритм функции OPTIMIZE_Q содержит общий цикл в котором перебираются все секции подъемника, начиная с верхней секции (j=1) и заканчивая последней. Выход из этого цикла и окончание подпрограммы

происходит, когда была рассмотрена последняя секция (j=nc) и, если переменная «flag_END» останется равной «true».

Внутри общего цикла имеются два внутренних цикла – левый и правый.

Левый цикл выполняется если напряжения в текущей, j-й, секции больше допускаемых. Здесь типоразмер поперечного сечения рычагов подъемника увеличивается, пока не будет выполнено условие прочности или база данных не закончится.

В правом цикле осуществляется проверка, будет ли механизм работоспособен если уменьшить типоразмер сечения. Если такая проверка оказывается удачной, то для текущей секции типоразмер поперечного сечения уменьшается. После изменения типоразмера сечения цикл продолжится до тех пор, пока не перестанет выполняться условие прочности или же не будет взято первое, наименьшее, сечение из базы данных.

При изменении типоразмера сечений рычагов какой-либо из секций в правом или левом цикле, переменная «flag_END» становится равной «false», что означает необходимость проведения повторного общего цикла. Необходимость выполнения повторного цикла связана с тем, что в результате изменения типоразмеров сечений в одной из секций изменятся нагрузки на весь механизм (3), поэтому необходима повторная проверка условий работоспособности.

Математическая модель ножничного подъемника

Модель ножничного подъемника, реализуемая функцией SCISSOR_MODEL(h, $\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$), по заданной высоте подъема h и векторам входных параметров $\boldsymbol{p}$, и $\boldsymbol{q}$ определяет усилия и действующие напряжения в элементах конструкции. Для этого выполняется статический расчет конструкции с учетом сил трения в шарнирах [21, 22, 23, 24].

При расчете учитываются номинальный вес груза, вес грузовой платформы и веса рычагов подъемника. Подъемник неподвижен на заданной высоте «h». Усилие, действующее на него со стороны приводного механизма, стремится поднять груз на платформе подъемника вверх. Этого усилия достаточно, чтобы преодолеть все весовые нагрузки и возникающие в шарнирах силы трения покоя. Инерция звеньев не учитывается в виду малости рабочих скоростей и ускорений.

При определении усилий в элементах ножничного подъемника рассматривают каждую секцию по отдельности, начиная с верхней.

Рассмотрим только часть модели ножничного механизма для его нижней секции, нагруженность которой будет зависеть от величин варьируемых при оптимизации параметров. Расчетная схема представлена на рис. 5.

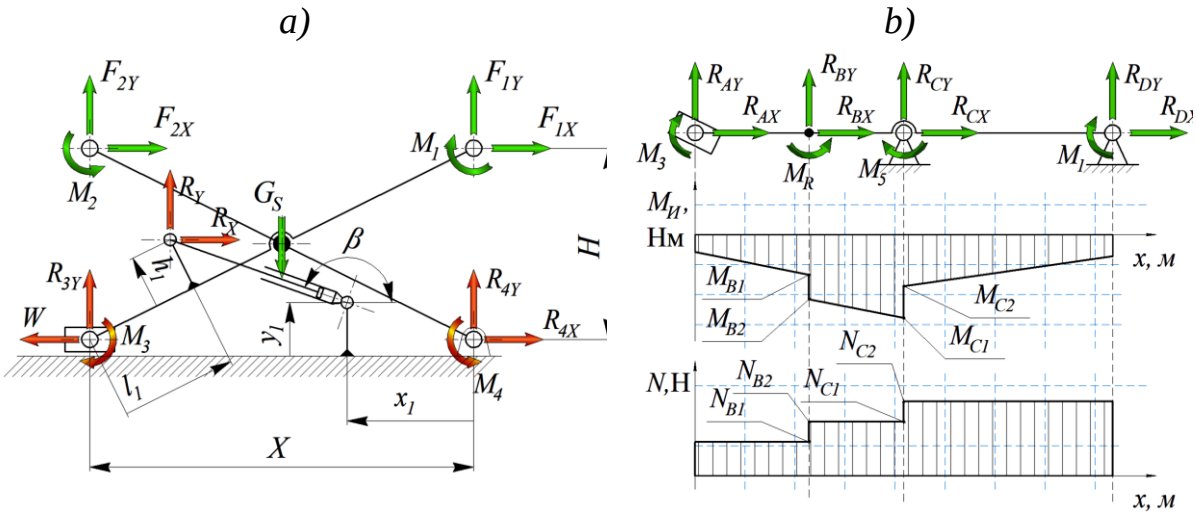


Рис. 5. Расчетные схемы для определения усилий в приводной секции

Неизвестные реакции определяются решением системы уравнений (4)

$$\begin{cases} F_{1X}^{(ns)} - \left|R_{3Y}^{(ns)}\right| f_S + R_{5X}^{(ns)} + R_X = 0 \\ F_{1Y}^{(ns)} + R_{3Y}^{(ns)} + R_{5Y}^{(ns)} + R_Y - \dfrac{G_S^{(ns)}}{2} = 0 \\ -F_{1X}^{(ns)} \cdot H + F_{1Y}^{(ns)} \cdot X - R_{5X}^{(ns)} \cdot \dfrac{H}{2} + R_{5Y}^{(ns)} \cdot \dfrac{X}{2} - R_X \cdot l_2 \cdot \sin(\alpha) + \\ +R_Y \cdot l_2 \cdot \cos(\alpha) - \dfrac{G_S^{(ns)} \cdot X}{4} - M_1^{(ns)} - M_3^{(ns)} - M_5^{(ns)} + M_R = 0 \\ F_{2X}^{(ns)} + R_{4X}^{(ns)} - R_{5X}^{(ns)} = 0 \\ F_{2Y}^{(ns)} + R_{4Y}^{(ns)} - R_{5Y}^{(ns)} - \dfrac{G_S^{(ns)}}{2} = 0 \\ -F_{2X}^{(ns)} \cdot H - F_{2Y}^{(ns)} \cdot X + R_{5X}^{(ns)} \cdot \dfrac{H}{2} + R_{5Y}^{(ns)} \cdot \dfrac{X}{2} + \dfrac{G_S^{(ns)} \cdot X}{4} + \\ +M_2^{(ns)} + M_4^{(ns)} + M_5^{(ns)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Параметры H, X определяются расчетным положением ножничного подъемника заданным высотой подъема h

$$H = \frac{h}{ns},$$

$$X = \sqrt{\boldsymbol{p}(l)^2 - H^2}.$$

Вес нижней секции определяется длиной рычага l, определенной вектором параметров $\boldsymbol{p}$ (обозначено как $\boldsymbol{p}(l)$) и площадью поперечного сечения $A(\boldsymbol{q}(ns))$

$$G_S^{(ns)} = 4 \cdot \boldsymbol{p}(l) \cdot \rho \cdot A\big(\boldsymbol{q}(ns)\big) \cdot g.$$

В системе уравнений (4) реакции R_X и R_Y – составляющие неизвестного усилия R, действующего со стороны силового агрегата. M_R – момент усилия R вокруг точки расположенной на оси рычага.

$$R_X = R \cdot \cos(\beta);\ \ R_Y = R \cdot \sin(\beta);$$

$$M_R = R \cdot h_1 \cdot (\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)),$$

где α – угол наклона рычагов к горизонту, β – угол наклона силового агрегата.

Углы определяются соотношениями

$$\sin(\alpha) = \frac{H}{\boldsymbol{p}(l)};\quad \cos(\alpha) = \sqrt{1 - sin^2(\alpha)};$$

$$\sin(\beta) = \frac{(l_1 \cdot \sin(\alpha) + h_1 \cdot \cos(\alpha) - y_1)}{l_R};$$

$$\cos(\beta) = \frac{(x_1 - l_1 \cdot \cos(\alpha) + h_1 \cdot \sin(\alpha))}{l_R};$$

$$l_R = \sqrt{(l_1 \cdot \sin(\alpha) + h_1 \cdot \cos(\alpha) - y_1)^2 + (x_1 - l_1 \cdot \cos(\alpha) + h_1 \cdot \sin(\alpha))^2}.$$

Усилия F_{1X}, F_{1Y}, F_{2X}, F_{2Y} для последней секции должны быть известны из расчетов для первых секций.

Моменты сил трения (рис.5, а) определяются итерационным процессом по расчетным значениям реакций в шарнирах зависимостями

$$M_{3,4}^{(ns)} = \frac{d_J \cdot f_J}{2}\sqrt{{R_{(3,4)X}^{(ns)}}^2 + {R_{(3,4)Y}^{(ns)}}^2} \text{ и } M_{1,2}^{(ns)} = \frac{d_J \cdot f_J}{2}\sqrt{{F_{(1,2)X}^{(ns)}}^2 + {F_{(1,2)Y}^{(ns)}}^2}$$

Найденные при расчете усилия и моменты сил трения используются для расчета изгибающих моментов в характерных точках рычагов подъемника (рис. 5, b) (расчетные зависимости не приведены). Максимальные напряжения (3) рассчитываются по максимальному моменту

$$M_{MAX}\,(ns) = max(M_{B1}, M_{B2}, M_{C1}, M_{C2}).$$

В процедуре SCISSOR_MODEL(h, $\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$) предусмотрен учет ограничений на вводимые параметры вектора $\boldsymbol{p}$. Так длина рычага подъемника должна находиться в пределах $l_{MIN} \le p(l) \le l_{MAX}$. Если максимальное значение длины рычага l_{MAX} может выбираться достаточно большим, то минимальный размер ограничен таким образом, чтобы обеспечить требуемую высоту подъема

$$l_{MIN} = \sqrt{\frac{{H_{MAX}}^2 - {H_{MIN}}^2 \cdot {K_X}^2}{ns^2 \cdot (1 - {K_X}^2)}}.$$

На остальные параметры, заключенные в векторе $\boldsymbol{p}$, так же задаются соответствующие ограничения $x_{1MIN} \le p(x_1) \le x_{1MAX}$, $y_{1MIN} \le p(y_1) \le y_{1MAX}$, $l_{2MIN} \le p(l_2) \le l_{2MAX}$, $h_{2MIN} \le p(h_2) \le h_{2MAX}$.

Учет ограничений осуществляется методом штрафных функций [3]. К выходному значению напряжений в конструкции прибавляется штраф, если

одно из значений входных параметров не входит в отведенный ему диапазон значений

$$\sigma_{OUT}(j) = \sigma(j) + pen\big(p(l)\big) + pen\big(p(x_1)\big) + pen\big(p(y_1)\big) + pen\big(p(l_2)\big) + pen\big(p(h_2)\big).$$

Функция штрафа, например, для параметра длины рычага $\boldsymbol{p}(l)$ имеет вид

$$pen(l) = KR \cdot [\min(0, l_{MAX} - l) + \min(0, l - l_{MIN})]^2, \qquad (5)$$

где KR – коэффициент штрафа, который увеличивается на каждой следующей итерации процесса оптимизации.

Исследование эффективности методики двухуровневой оптимизации

Исследование эффективности представленной методики проводилось для трех различных моделей (рис. 6) ножничного подъемника с одинаковыми исходными данными. Математические модели конструкций (рис. 6, b, c) схожи с представленной выше, но будут отличаться наличием других оптимизируемых параметров приводной секции, (l, x_1, y_1, l_2, h_2) – для конструкции на рис. 6, b), (l, l_1, h_1, l_2, h_2) – для конструкции на рис. 6, c).

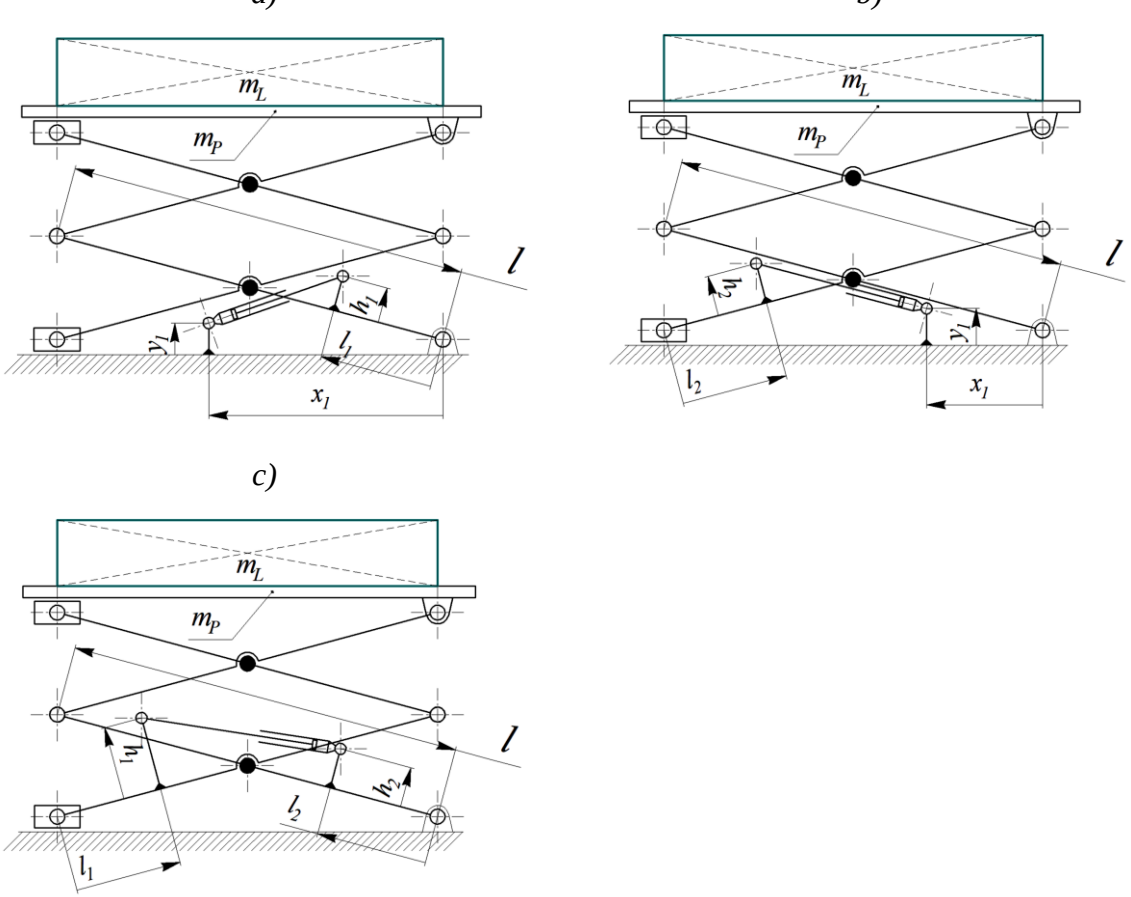


Рис. 6. Схемы тестовых вариантов конструкций ножничных подъемников

Параметры конструкции (рис. 1) имеют следующие значения:

H_{MAX} =3 м; H_{MIN} = 0,2 м; ns=2; K_X =4; m_L =500 кг; l_{CL} =0,5 м; m_P =100 кг; l_{CP} =0,5 м; d_J =0,05 м; f_J =0,15; f_S =0,15.

Ограничения на оптимизируемые параметры представлены в табл.1.

Таблица. 1. Ограничения на оптимизируемые параметры конструкции ножничного подъемника

Обозна-чение	Схема, рис.8, a		Схема, рис.8, b		Схема, рис.8, c	
	min	max	min	max	min	max
l, м	1,636	2,45	1,636	2,45	1,636	2,45
x_1, м	-0,5	2,45	-0,5	2,5	-	-
y_1, м	-0,5	0,5	-0,5	0,5	-	-
l_1, м	0	l	-	-	0	l
h_1, м	-0,5	0,5	-	-	-0,5	0,5
l_2, м	-	-	0	l	0	l
h_2, м	-	-	-0,5	0,5	-0,5	0,5

Параметры точности оптимизации были подобраны в процессе предварительных прогонов расчетной модели с целью ускорить расчет при достаточном уровне точности. Для общего алгоритма оптимизации параметры точности epsM = 5кг, epsP = 0,02 м. При оптимизации параметров вектора $\boldsymbol{p}$ (рис. 4) – eps = 0,002 м. При расчете штрафа по выражению (5), начальное значение коэффициента штрафа KR = 100000. С каждой итерацией оптимизационного процесса коэффициент KR увеличивается в два раза.

Ряд численных экспериментов проводился при равномерно распределенных значениях начальных параметров в ограничивающих их диапазонах (табл. 1). Полное количество экспериментов для каждой из схем механизма (рис. 6) для двух вариантов алгоритма оптимизации (рис. 2) составило 1350.

Эти эксперименты показали, что:

1. алгоритмы Variant A и Variant B практически идентичны. При одинаковых начальных условиях получаются одинаковые результаты вычислений;

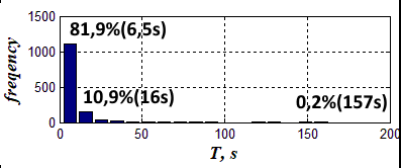
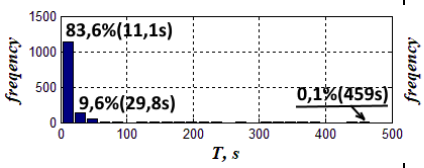
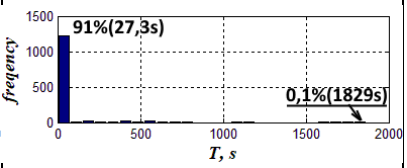
2. результаты близкие к оптимальным по массе ножничного механизма получаются не при любых начальных приближениях параметров. 25 – 33% годных результатов дали варианты конструкции с массой до 170 кг. Причем алгоритм дал 20 - 30% не годных результатов, не удовлетворяющих заданным параметрам или условию прочности;

3. Массы конструкций остальных 75-67% годных результатов распределены в диапазон 200 – 400 кг. Отдельные варианты имеют массу до 700 кг;

4. Наилучшие из найденных результатов имеют массу конструкции ножничного механизма 125-130 кг;

5. Суммарное время выполнения такого количества расчетов велико, что показано в статистиках в табл. 2

Таблица 2. Статистика по времени выполнения задачи оптимизации

Конструкция, рис. 8, a)	Конструкция, рис. 8, b)	Конструкция, рис. 8, c)
Выборка – 1350 (Var. A и Var.B)	Выборка – 1350 (Var. A и Var.B)	Выборка – 1350 (Var. A и Var.B)
		
мин. знач. макс. знач. 1,73 s 163,2 s	мин. знач. макс. знач. 1,78 s 468,2 s	мин. знач. макс. знач. 1,98 s 1865,8 s
Суммарное время 13601 s ~ 3,78 h	Суммарное время 23092 s ~ 6,4 h	Суммарное время 77088 s ~ 21,4 h

На гистограммах таблицы 2 приведены данные по количеству задач оптимизации, решенных за время, указанное по оси T. Цифрами, для наиболее существенных данных, показан процент от общего числа решенных задач, а в скобках – среднее значение времени решения каждой из этих задачи оптимизации.

Длительность выполнения задач оптимизации имеют значительный разброс. Минимальные времена для разных конструкций не превышают 2 с. Максимальные времена достигают от 163 до 1866 с, в зависимости от схемы оптимизируемого механизма (табл. 2). Однако задач, выполненных за большое время не много, их количество суммарно не превышает 1%.

Эти же данные демонстрируют то, что оптимизируемые конструкции (рис. 6) не равнозначны по вычислительным затратам, при том, что они являются схожими по конструкции и начальным параметрам.

Для уменьшения времени, затрачиваемого на расчеты, предлагается выполнять ограниченное число расчетов со случайно заданными начальными приближениями параметров.

В следующих опытах для каждой расчетной схемы конструкции (рис. 6), для алгоритмов оптимизации «Variant A» и «Variant B» (рис. 2) было выполнено 10 экспериментов по 10 расчетов в каждом. Начальные приближения параметров задавались случайно, согласно равномерному распределению вероятностей.

Для каждого эксперимента фиксировалось число решений, масса конструкции для которых была меньше 170 кг и 160 кг. Соответствующие статистики приведены в таблице 3.

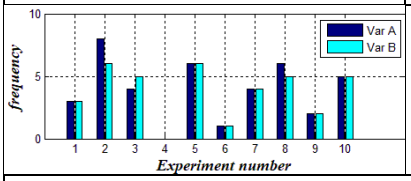
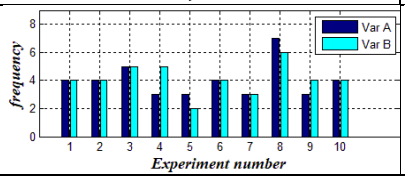
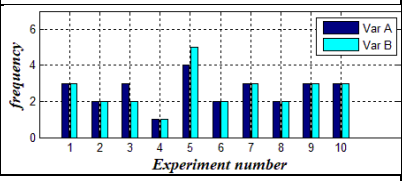
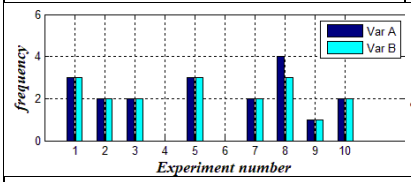
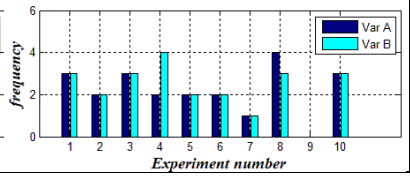
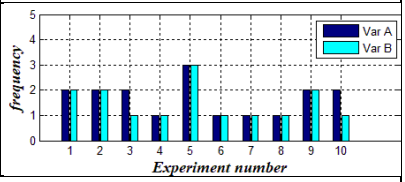
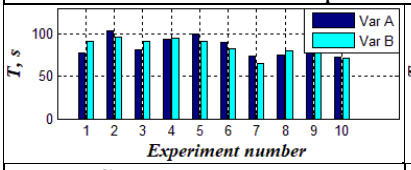
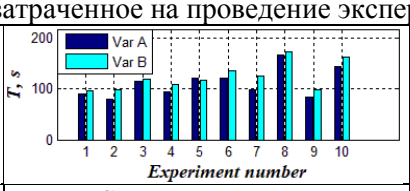
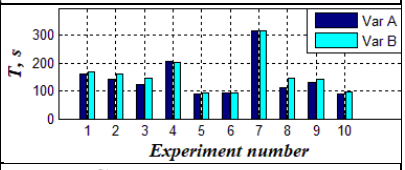
На гистограммах таблицы 3 каждый столбец показывает количество решений, из десяти, масса конструкций для которых оказалась меньше

указанной величины. Общий процент от выборки показывает суммарное количество результатов, удовлетворяющих условию эксперимента от полного числа решений для всех десяти экспериментов.

Для конструкций рис. 6, a) и b) общий процент результатов с массой меньшей, чем 170 кг оказался достаточно высок, 38–40%, хотя и наблюдались эксперименты, не содержащие решений с указанными характеристиками. Вероятность получения результатов с меньшей массой ниже 160 кг – порядка 18–22%. Для конструкции рис. 6, c) вероятность получения результатов с массой до 170 кг составил 26%.

Среднее время проведения эксперимента по десять расчетов в каждом составило от 85 до 150 с, в зависимости от расчетной схемы (рис. 6).

Таблица 3. Статистика по экспериментам со случайно заданными начальными приближениями параметров

Конструкция, рис. 8, a)	Конструкция, рис. 8, b)	Конструкция, рис. 8, c)
Выборка – 2x10x10=200	Выборка – 2x10x10=200	Выборка – 2x10x10=200
Масса ножничного механизма <170 кг		
Общий процент от выборки 38%	Общий процент от выборки 40,5%	Общий процент от выборки 26%
		
Масса ножничного механизма <160 кг		
Общий процент от выборки 18,5%	Общий процент от выборки 22,5%	Общий процент от выборки 16%
		
Время затраченное на проведение эксперимента		
		
Среднее время на эксперимент 85 s	Среднее время на эксперимент 118 s	Среднее время на эксперимент 151 s

Заключение

В статье рассматриваются возможности оптимизации параметров технических систем с применением численных алгоритмов и исследуется эффективность разработанных решений.

Предложенный алгоритм двухстадийной оптимизации применен для поиска оптимальной по массе конструкции ножничного подъемника с двумя секциями. На первой стадии осуществляется оптимизация конструкции по непрерывным параметрам с учетом заданных ограничений. Вторая стадия служит для подбора поперечного сечения рычагов подъемника.

Процедура оптимизации исследована на тестовых конструкциях двухсекционного ножничного подъемника, имеющих различия в схеме установки приводного устройства на нижней секции.

Эксперименты показали, что около 33-25% вариантов конструкций ножничного механизма из «годных» результатов оптимизации имеют массу до 170 кг. Наилучшие из найденных решений имею массу конструкции 125-130 кг, в зависимости от расчетной схемы (рис.6).

В дальнейшем, необходимо изучить возможности предложенной методики для более сложных конструкций, например, для подъемников с расположением точек крепления приводного устройства между отдельными секциями. Так же, при необходимости повышения эффективности алгоритма, предлагается рассмотреть более сложные методы оптимизации параметров, позволяющие добиться лучшего результата, при поиске глобального оптимума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Чибисова Е.В. Разработка рекомендаций по обработке резанием титанового сплава TI-6AL-4V путем оптимизации режимов термической обработки // Современное машиностроение: Наука и образование. 2017, с.560-571

[2] Махмутов М.М., Сахапов Р.Л. Оптимизация процесса буксования колесного движителя // Современное машиностроение: Наука и образование. 2019, с.733-745

[3] Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов.- Мн.: ДизайнПРО, 2004.- 640с. - ISBN 985-452-080-3

[4] Формалев В.Ф. Ревизников Д.Л. Численные методы.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 400с. - ISBN 5-9221-0479-9

[5] Безгачев Ф.В. Методы глобальной оптимизации на основе различных подходов оптимизации // E-Scio. 2020. №12 (51)

[6] Griffiths, D.V., Smith, I.M..Numerical methods for engineers, second edition. Numerical Methods for Engineers, Second Edition (2006), ISBN 978-142001024-4, 978-158488401-9

[7] Rothwell, A. (2017). Numerical Methods for Unconstrained Optimization. In: Optimization Methods in Structural Design. Solid Mechanics and Its

Applications, vol 242., c. 83-106, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55197-5_4
[8] Rothwell, A. (2017). Numerical Methods for Constrained Optimization. In: Optimization Methods in Structural Design. Solid Mechanics and Its Applications, vol 242., 107-145, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55197-5_5
[9] Мельникова Г.В., Шорр Б.Ф., Сальников А.В., Нигматуллин Р.З. Автоматизированная динамическая оптимизация рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей. // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 76 – 85.
[10] Волков А.Э., Медведев В.И., Матвеенков Д.С. Алгоритм оптимизационного синтеза спирально-конических зубчатых передач // Современное машиностроение: Наука и образование. 2018, с.693-709
[11] Лебедев С.Ю., Бабичев Д.Т. Две методологии оптимизационного синтеза цилиндрических передач: локальная и глобальная // Современное машиностроение: Наука и образование. 2019, с.215-223
[12] Tian, H., Zhang, Z.Design and simulation based on Pro/E for a hydraulic lift platform in scissors type. Procedia Engineering (2011), ISSN 18777058, DOI10.1016/j.proeng.2011.08.1153
[13] Rasovic, N., Vučina, A., Obad, M. Stress analysis of lifting table using finite element method IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , (1) (2019), ISSN 17578981, DOI 10.1088/1757-899X/659/1/012012
[14] Sirotenko, A.N., Partko, S.A., Borovkov, A.S. Mathematical modeling of power loads in the construction of a parallelogram lift. Journal of Physics: Conference Series 1889(4),042030 (2021), ISSN 17426588, DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042030
[15] Кийко Л.К., Кирсанов М.Н. Аналитический расчет подъемника параллелограммного типа с произвольным числом секций // Проблемы машиностроения и автоматизации - М.: ИМАШ РАН, 2016, с.48-53
[16] Бортяков Д.Е., Соколов В.П. Учет трения в шарнирах многозвенных механизмов // Машиностроение. 2012. №3-2 (154).

S.V.Nikitin, D.E. Bortyakov, A.A. Grachev

OPTIMIZATION METHOD FOR SCISSOR LIFT DESIGN

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

When optimizing complex technical systems, authors often do not present the optimization algorithm itself and do not talk about the effectiveness of the method used, showing only the final result. However, the process itself could take

a considerable amount of time or come to one of the local optima without finding the global one. The article examines the effectiveness of the process of optimizing the design of a scissor lift. An optimization algorithm, a mathematical model of the object, and numerical experiments are presented. The results of numerical experiments make it possible to judge the effectiveness of the proposed algorithm. Efficiency here refers to the percentage of cases where the algorithm is used that gives the best results.

Key words: optimization methods, optimization methods taking into account constraints, technical system, multi-section scissor lift, static model

REFERENCES

[1] Egorova YU.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., CHibisova E.V. Razrabotka rekomendacij po obrabotke rezaniem titanovogo splava TI-6AL-4V putem optimizacii rezhimov termicheskoj obrabotki // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie. 2017, c. 560-571

[2] Mahmutov M.M., Sahapov R.L. Optimizaciya processa buksovaniya kolesnogo dvizhitelya // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie. 2019, c.733-745

[3] Tarasik V.P. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskih sistem: Uchebnik dlya vuzov.- Mn.: DizajnPRO, 2004.- 640s. - ISBN 985-452-080-3

[4] Formalev V.F. Reviznikov D.L. CHislennye metody.- M.: FIZMATLIT, 2004. - 400s. - ISBN 5-9221-0479-9

[5] Bezgachev F.V. Metody global'noj optimizacii na osnove razlichnyh podhodov optimizacii // E-Scio. 2020. №12 (51)

[6] Griffiths, D.V., Smith, I.M..Numerical methods for engineers, second edition. Numerical Methods for Engineers, Second Edition (2006), ISBN 978-142001024-4, 978-158488401-9

[7] Rothwell, A. (2017). Numerical Methods for Unconstrained Optimization. In: Optimization Methods in Structural Design. Solid Mechanics and Its Applications, vol 242., c. 83-106, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55197-5_4

[8] Rothwell, A. (2017). Numerical Methods for Constrained Optimization. In: Optimization Methods in Structural Design. Solid Mechanics and Its Applications, vol 242., 107-145, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55197-5_5

[9] Mel'nikova G.V., SHorr B.F., Sal'nikov A.V., Nigmatullin R.Z. Avtomatizirovannaya dinamicheskaya optimizaciya rabochih lopatok turbin gazoturbinnyh dvigatelej. // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. 2014. T. 21. № 1. S. 76 – 85.

[10] Volkov A.E., Medvedev V.I., Matveenkov D.S. Algoritm optimizacionnogo sinteza spiral'no-konicheskih zubchatyh peredach // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie. 2018, s.693-709
[11] Lebedev S.YU., Babichev D.T. Dve metodologii optimizacionnogo sinteza cilindricheskih peredach: lokal'naya i global'naya // Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie. 2019, s.215-223
[12] Tian, H., Zhang, Z.Design and simulation based on Pro/E for a hydraulic lift platform in scissors type. Procedia Engineering (2011), ISSN 18777058, DOI10.1016/j.proeng.2011.08.1153
[13] Rasovic, N., Vučina, A., Obad, M. Stress analysis of lifting table using finite element method IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (1) (2019), ISSN 17578981, DOI 10.1088/1757-899X/659/1/012012
[14] Sirotenko, A.N., Partko, S.A., Borovkov, A.S. Mathematical modeling of power loads in the construction of a parallelogram lift. Journal of Physics: Conference Series 1889(4),042030 (2021), ISSN 17426588, DOI 10.1088/1742-6596/1889/4/042030
[15] Kijko L.K., Kirsanov M.N. Analiticheskij raschet pod"emnika parallelogrammnogo tipa s proizvol'nym chislom sekcij // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii - M.: IMASH RAN, 2016, c.48-53
[16] Bortyakov D.E., Sokolov V.P. Uchet treniya v sharnirah mnogozvennyh mekhanizmov // Mashinostroenie. 2012. №3-2 (154).

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621

А. А. Васильев

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ВКЛАДЫША ГСО С НЕПОЛНЫМ УГЛОМ ОБХВАТА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВАЛОВ

Андрей Андреевич Васильев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)654-4599, E-mail: const333@mail.ru .

Аннотация

В работе приводится математическая модель процесса токарной обработки крупногабаритного вала на гидростатической опоре (ГСО) с неполным углом обхвата и рассматривается влияние конструктивного исполнения рабочей поверхности вкладыша опоры на технологические параметры токарной обработки вала. Результаты расчетов показали, что конструктивный вариант с двумя карманами подачи масла в опору является предпочтительным, так как амплитуда колебания заготовки значительно ниже, чем в двух других рассматриваемых вариантах.

Ключевые слова: гидростатическая опора с неполным углом обхвата, сила резания, поле давлений, переходный процесс, амплитуда, жесткость, демпфирование, частота, припуск.

Введение

Целью исследования являлось определение влияния конструкции вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на технологические характеристики процесса точения крупногабаритных валов.

Задачей исследования являлась разработка математической модели процесса точения крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата и определения влияния количества карманов на опорной

поверхности вкладыша ГСО с неполным углом обхвата на точность и шероховатость обработанной поверхности.

Математическая модель процесса точения крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата

Общий вид уравнения динамического равновесия имеет вид [1, 2, 3, 4, 5, 6, 14]:

$$m\ddot{Y} + B\dot{Y} + kY = F(t). \tag{5.1}$$

Расчетная схема для процесса точения крупногабаритного вала зажатого в патрон станка и установленного на ГСО с неполным углом обхвата для определения колебаний режущей кромки инструмента представлена на рисунке 1.

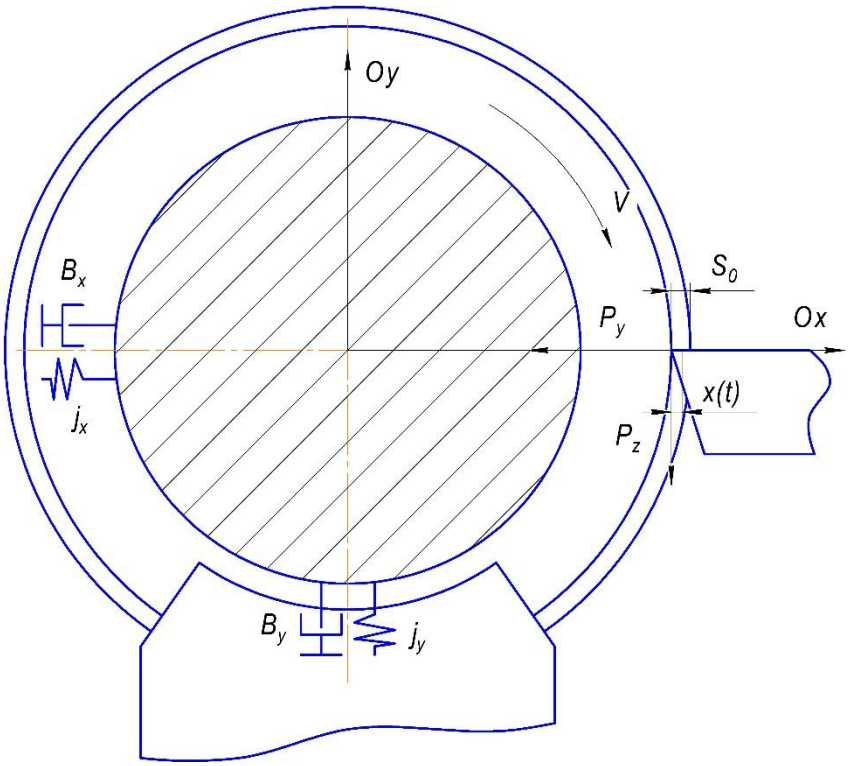


Рис. 1. Расчетная схема точения крупногабаритного вала на ГСО с неполным углом обхвата

В условиях динамического равновесия системы с учетом действия силы резания при черновом точении вала ротора линейные уравнения колебания режущей кромки инструмента [1, 3]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + h_x\dot{x} + j_x x = -P_y(x), \\ m\ddot{y} + h_y\dot{y} + j_y y = -P_z(x). \end{cases} \tag{5.2}$$

Действие силы $P_z(x)$ не рассматривается, так как вследствие больших радиусов обрабатываемых поверхностей колебания резца по оси

Oy проецируются на ось Ox незначительные отклонения (на 2-3 порядка ниже, чем возникающие от состовляющей силы резания $P_y(x)$).

Действие силы резания в плоскости Ox $P_y(x)$ в зависимости от динамической толщины срезаемого слоя [1] в следствии колебания заготовки в ГСО с неполным углом обхвата имеет вид:

$$P_y(x) = K_y\big(S_0 - x(t)\big). \tag{5.3}$$

Рассмотрим первое уравнения из системы уравнений (5.2), для автоколебательной системы с учетом линейной зависимости силы (5.3), имеет вид [1, 7, 13]:

$$m\ddot{x} + j_x x = -P_y(x). \tag{5.4}$$

Подставляя (5.3) в уравнение (5.4), получим:

$$m\ddot{x} + j_x x = -K_y S_0 + K_y x,$$

где:

m – масса колебательной системы (вала),

j_x – коэффициент жесткости, определяется согласно [7, 10, 11, 13, 16],

S_0 – припуск под обработку,

K_y – коэффициент для определения динамической толщины срезаемого слоя [1, 4].

Динамические коэффициенты определяются путем замены производных для их определения разностными аналогами, через силу реакции опоры, которая в свою очередь определяется путем интегрирования поля давлений в опоре [7, 8, 10, 11, 12, 16].

После переноса правой части и деления на массу m, имеем уравнение:

$$\ddot{x} + \left(\frac{j_x - K_y}{m}\right)x + \frac{K_y S_0}{m} = 0. \tag{5.5}$$

Для решения данного типа уравнений, необходимо ввести новую переменную X [1, 2, 4], равную:

$$X = \left(\frac{j_x - K_y}{m}\right)x + \frac{K_y S_0}{m}.$$

Выражая старую переменную x через новую X, получаем следующее уравнение:

$$x = \frac{mX}{j_x - K_y} - \frac{K_y S_0}{j_x - K_y}. \tag{5.6}$$

После подстановки новой переменной в уравнение (5.5), выражение для определения колебаний заготовки примет вид:

$$\frac{m}{j_x - K_y}\ddot{X} + X = 0. \tag{5.7}$$

Разделим уравнение (5.7) на коэффициент при $\ddot{X}$:

$$\ddot{X} + \left(\frac{j_x - K_y}{m}\right)X = 0, \tag{5.8}$$

Решение уравнения (5.8) имеет вид:

$$X(t) = C_1 e^{\alpha t} cos(\beta t) + C_2 e^{\alpha t} sin(\beta t),$$

где:

C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, определяемые из начальных условий.

Корни характеристического уравнения определяются следующим выражением:

$$k_{1,2} = \alpha \pm \beta i. \tag{5.9}$$

Исходя из уравнения (5.8) корни характеристического уравнения равны:

$$k_{1,2} = \sqrt{-\frac{j_x - K_y}{m}} = \sqrt{-\frac{j_x - K_y}{m}} = \pm\sqrt{\frac{j_x - K_y}{m}}\, i,$$

исходя из получившегося значения корней характеристического уравнения, значения коэффициентов равны:

$$\alpha = 0, \beta = \frac{j_x - K_y}{m}.$$

Исходя из (5.6), получим решение уравнения (5.2) в виде:

$$x(t) = \frac{m}{j_x - K_y}\left[C_1 cos\left(\left(\frac{j_x - K_y}{m}\right)t\right) + C_2 sin\left(\left(\frac{j_x - K_y}{m}\right)t\right)\right] - \frac{K_y S_0}{j_x - K_y}. \tag{5.10}$$

Результаты

Графики изменения рассчитанных перемещений заготовки при точении вала на ГСО с неполным углом обхвата для различных конструктивных вариантов исполнения вкладыша опоры представлены на рисунках 2-4. Рассчитанные основные параметры колебания заготовки вследствие реакции опоры на возникающую силу резания для трех вариантов опор представлены в таблице 1.

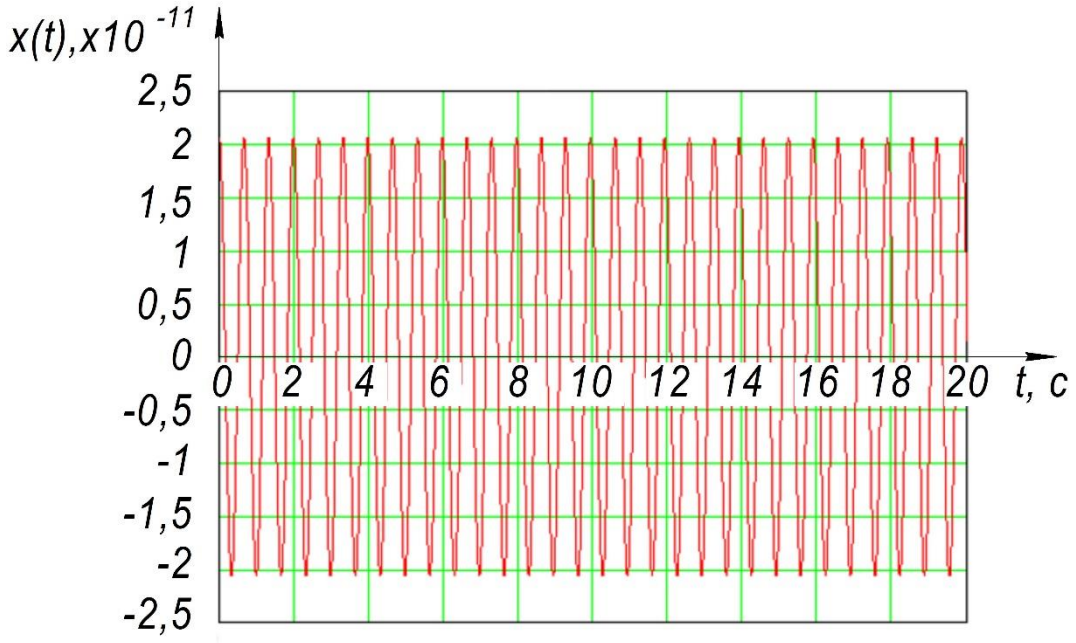


Рис. 2. График колебания заготовки в процессе точения крупногабаритного вала ротора при параметрах режима резания: h_0=4 мм, $S_0 = 0{,}1$ мм/об, $V = 60$ м/мин на ГСО с неполным углом обхвата с двумя карманами.

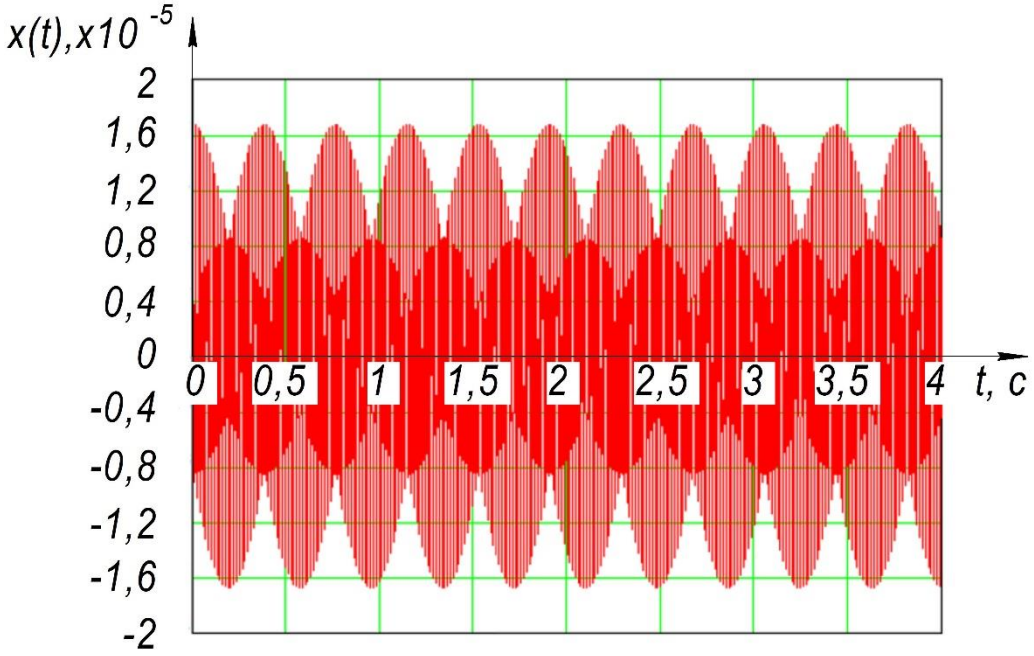


Рис. 3. График колебания заготовки в процессе точения крупногабаритного вала ротора при параметрах режима резания: h_0=4 мм, $S_0 = 0{,}1$ мм/об, $V = 60$ м/мин на ГСО с неполным углом обхвата с тремя карманами.

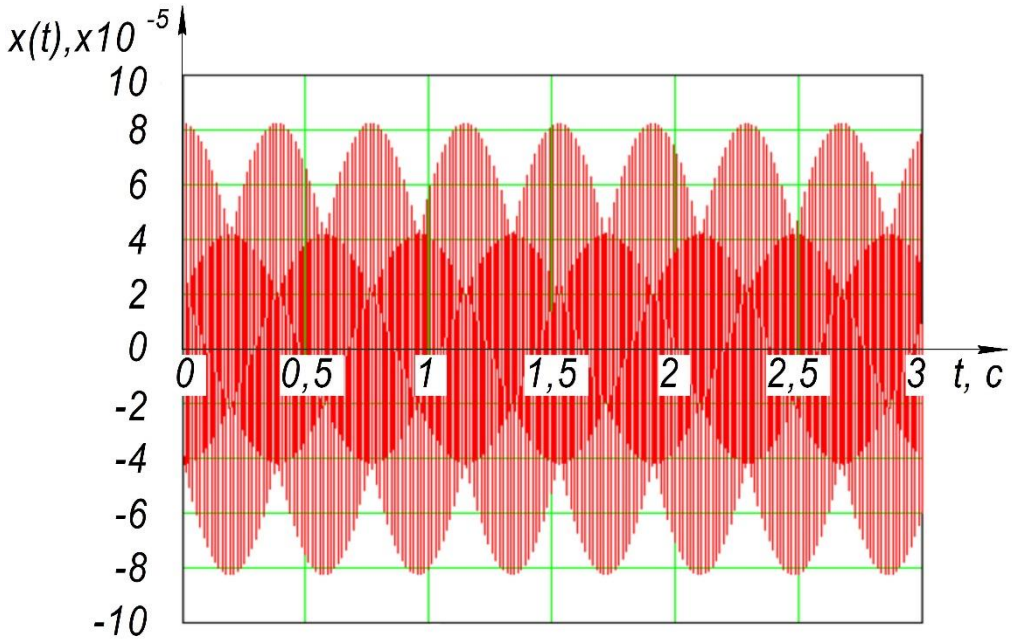


Рис. 4. График колебания заготовки в процессе точения крупногабаритного вала ротора при параметрах режима резания: h_0=4 мм, $S_0 = 0{,}1$ мм/об, $V = 60$ м/мин на ГСО с неполным углом обхвата с четырьмя карманами.

Таблица 1. Параметры процесса колебания заготовки

Число карманов, $N_к$	Амплитуда, A_m, м	Период, T, с	Частота колебания, ω, с$^{-1}$
2	$4{,}126 \cdot 10^{-11}$	$3{,}75 \cdot 10^{-7}$	$2{,}667 \cdot 10^{6}$
3	$3{,}342 \cdot 10^{-5}$	$3{,}42 \cdot 10^{-4}$	$2{,}927 \cdot 10^{3}$
4	$1{,}648 \cdot 10^{-4}$	$1{,}68 \cdot 10^{-3}$	593,333

Исходя из полученных результатов, представленных на рисунках 2-4 и в таблице 1 можно сделать вывод, что конструктивный вариант исполнения вкладыша с двумя карманами является предпочтительным при проектировании. Данный вариант обладает меньшей грузоподъёмность по сравнению с вариантами с тремя и четырьмя карманами [8, 10, 15], но показывает наилучшие динамические характеристики по сравнению с двумя другими вариантами.

Так как реакции опоры на два порядка выше, чем максимальные значения силы резания при черновом точении крупногабаритных валов, и опора обладает сравнительно высокой жесткостью (для варианта с двумя карманами $j_x = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м [10]) значения отклонения режущей кромки имеют малый порядок. Для вариантов с тремя и четырьмя карманами подачи масла в опору амплитуды колебания заготовки составили 3,34 мкм и 16,48 мкм, как представлено в таблице 1. Рассчитанные отклонения заготовки в процессе точения могут негативно повлиять на показатель

шероховатости обработанной поверхности вала ротора. В случае с двумя карманами значение максимального отклонения незначительно и составляет $4{,}126 \cdot 10^{-11}$ мкм.

Заключение

Представленная математическая модель, позволяет рассчитать отклонение вала вследствие воздействия режущей силы и реакции ГСО с неполным углом обхвата и возможность достижения заданного качества поверхности вала ротора для используемого конструктивного исполнения вкладыша опоры. По рассчитанным значениям отклонения вала в процессе точения скорректировать режимы резания (подачу S_0 и глубину резания h_0) или изменить конструкцию опорной поверхности вкладыша для достижения требуемых параметров обработанной поверхности. Результаты показали, что при токарной обработке крупногабаритных валов на ГСО с неполным углом обхвата предпочтительным является конструктивное исполнение вкладыша с двумя карманами подачи масла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Фадин Д.М., Шуваев А.В. Расчет вибраций режущей кромки инструмента при токарной обработке с автоколебаниями жаропрочных сплавов. Известия высших учебных заведений. Машиностроение – 2013. – № 4(613)/2011, С. 57 – 63.

[2] В.Л. Заковоротный, И.А. Винокурова. Влияние производства тепла на динамику процесса резания. Вестник Донского технического университета. Машиностроение и машиноведение. – 2017. – №3(90). – С. 14-26.

[3] Заковоротный В.Л. Динамика процесса резания. Состояние и перспективы // Журнал: Вестник Донского государственного технического университета. – 2005. – № 3 (25) Т. 5. – С. 329 – 346.

[4] Никитин С.П.. Математическое моделирование термомеханических процессов в зоне резания элементарных поверхностей при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающее заданный предел выносливости лопаток турбин ГТД: дис. на соиск. науч. ст. д. тех. наук : 05.02.08 : защищена 14.05.19 / Никитин Сергей Петрович. – П., 2019. – 446 с

[5] Алексеева Л. Б., Уваров В. П. Особенности поведения жесткого ротора на опорах с подшипниками скольжения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 85 – 88.

[6] Waheed Ur Rehman, Guiyun Jiang, Yuanxin Luo, YongqinWang, Wakeel Khan, Shafiq Ur Rehman, Nadeem Iqbal. Control of active lubrication for

hydrostatic journal bearing by monitoring bearing clearance // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10(4). – Pp. 17.
[7] Jialei DU, Guozhu LIANG. Dynamic coefficients and stability analysis of a water-lubricated hydrostatic bearing by solving the uncoupled Reynolds equation // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33. – P. 2110-2122.
[8] Васильев А.А. Влияние количества карманов вкладыша гидростатической опоры с неполным углом обхвата на статические и динамические характеристики// Фундоментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Научно-технический журнал. – 2021. – № 5(349). – С. 52 – 58.
[9] Васильев А.А. Разработка методики расчета поля давлений для неизотермического течения вязкой жидкости в гидростатических подшипниках при обработке крупногабаритных валов паровых турбин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021, №7. – С. 99 – 106.
[10] Васильев А. А. Динамика токарной обработки валов паровых турбин на гидростатических опорах с неполным углом обхвата. *Металлообработка*, 2021, № 1, с. 20–25. DOI 10.25960/mo.2021.1.20
[11] Корнеев А. Ю., Шенбо Ли. Расчёт полей давлений и температур в смазочном слое конических гидростатодинамических подшипников // Вестник Брянского государственного технологического университета. 2017. №1. С. 12-24.
[12] Jian Cao1, Xiaocong Zhu, Feiteng Li, Xin Jin. Modeling and constrained optimal design of an ultra-low-friction pneumatic cylinder with air bearing // Advances in Mechanical Engineering. 2019. №11. Pp. 1-13.
[13] Темис М. Ю. Расчет статических и динамических коэффициентов подшипника скольжения с учетом деформативности его рабочих поверхностей // Вестник Гомельского технологического университета им. П. О. Сухого. 2004. № 4. С. 25-32.
[14] V. Srinivasan. Analysis of Dynamic Load Characteristics on Hydrostatic Bearing with Variable Viscosity and Temperature using Simulation Technique // Indian Journal of Science and Technology. 2013. № 6. Pp. 4797 – 4803.
[15] Xibing Li, Xun Wang,Ming Li, Yunshi Ma, and Ying Huang. The Research Status and Progress of Heavy/Large Hydrostatic Thrust Bearing // Advances in Mechanical Engineering. 2014. №8. Pp. 1 – 9.
[16] Корнеев А. Ю. Динамические характеристики конических многоклиновых гидродинамических опор жидкостного трения// Российские инженерные изыскания. – 2010. – С. 1 – 8.

A.A.Vasiliev

INFLUENCE OF DESIGN INSERT OF THE HYDROSTATIC BEARINGS WITH AN INCOMPLETE RANGE ANGLE ON THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF TURNING LARGE SHAFTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the development of mathematical model of the process of turning a large-sized shaft on a hydrostatic bearing (HB) with an incomplete range angle and the influence of the design of the working surface of the bearing insert on the technological parameters of turning the shaft. The results of the calculations showed that the design option with two pockets for supplying oil to the support is preferable, since the amplitude of the workpiece vibration is much lower than in the other two considered options.

Key words: hydrostatic bearing with an incomplete range angle, cutting force, pressure field, transient process, amplitude, stiffness, damping, frequency, allowance.

REFERENCES

[1] Fadin D.M., Shuvaev A.V. Calculation of vibrations of the cutting edge of the tool during turning with self-oscillations of heat-resistant alloys. News of higher educational institutions. Engineering – 2013. – No. 4 (613)/2011, pp. 57 - 63.

[2] V.L. Zakovorotny, I.A. Vinokurov. Influence of heat production on the dynamics of the cutting process. Bulletin of the Don Technical University. Mechanical engineering and machine science. – 2017. – No. 3 (90). – pp. 14-26.

[3] Zakovorotny V.L. Dynamics of the cutting process. State and prospects // Journal: Bulletin of the Don State Technical University. – 2005. – No. 3 (25) V. 5. – Pp. 329-346.

[4] Nikitin S.P. Mathematical modeling of thermomechanical processes in the cutting zone of elementary surfaces during profile deep grinding, providing a given limit of endurance of gas turbine turbine blades: dis. for the competition scientific Art. d. tech. Sciences: 05.02.08: protected 14.05.19 / Nikitin Sergey Petrovich. – P., 2019. – 446 p.

[5] Alekseeva L. B., Uvarov V. P. Features of the behavior of a rigid rotor on bearings with plain bearings // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2014. – No. 9. – Pp. 85-88.

[6] Waheed Ur Rehman, Guiyun Jiang, Yuanxin Luo, YongqinWang, Wakeel Khan, Shafiq Ur Rehman, Nadeem Iqbal. Control of active lubrication for hydrostatic journal bearing by monitoring bearing clearance // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 10(4). – Pp. 17.
[7] Jialei DU, Guozhu LIANG. Dynamic coefficients and stability analysis of a water-lubricated hydrostatic bearing by solving the uncoupled Reynolds equation // Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Vol. 33. – Pp. 2110-2122.
[8] Vasiliev A.A. Influence of the number of pockets of the liner of a hydrostatic support with an incomplete wrap angle on the static and dynamic characteristics // Fundamental and applied problems of engineering and technology. Scientific and technical journal. – 2021. – No. 5 (349). – Pp. 52 – 58.
[9] Vasiliev A.A. Development of a method for calculating the pressure field for a non-isothermal flow of a viscous fluid in hydrostatic bearings during the processing of large-sized shafts of steam turbines. Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov. 2021, No. 7. – Pp. 99 - 106.
[10] Vasiliev A. A. Dynamics of turning the shafts of steam turbines on hydrostatic bearings with an incomplete range angle. *Metalloobrabotka*, 2021, no 1, pp. 20–25. DOI 10.25960/mo.2021.1.20.
[11] Korneev A. Yu., Shenbo Li. Calculation of pressure and temperature fields in the lubricating layer of conical hydrostatic dynamic bearings // Bulletin of the Bryansk State Technological University. 2017. No. 1. Pp. 12-24.
[12] Jian Cao1, Xiaocong Zhu, Feiteng Li, Xin Jin. Modeling and constrained optimal design of an ultra-low-friction pneumatic cylinder with air bearing // Advances in Mechanical Engineering. 2019. №11. Pp. 1-13.
[13] Temis M. Yu. Calculation of static and dynamic coefficients of a plain bearing taking into account the deformability of its working surfaces // Bulletin of the Gomel Technological University. P. O. Sukhoi. 2004. No. 4. Pp. 25-32.
[14] V. Srinivasan. Analysis of Dynamic Load Characteristics on Hydrostatic Bearing with Variable Viscosity and Temperature using Simulation Technique // Indian Journal of Science and Technology. 2013. № 6. Pp. 4797-4803.
[15] Xibing Li, Xun Wang,Ming Li, Yunshi Ma, and Ying Huang. The Research Status and Progress of Heavy/Large Hydrostatic Thrust Bearing // Advances in Mechanical Engineering. 2014. №8. Pp. 1-9.
[16] Korneev A. Yu. Dynamic characteristics of conical multi-wedge hydrodynamic bearings of liquid friction // Russian engineering surveys. 2010. Pp. 1-8.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 67.02

Д.П. Гасюк[1], В.А. Косова[2]

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

[1]Гасюк Дмитрий Петрович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 534-07-64, E-mail: cz_tipt@mail.ru

[2]Косова Валентина Андреевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 534-07-64, E-mail: kosova.va@yandex.ru

Аннотация

В работе рассмотрены современные условия и факторы появления позаказного типа производства продукции машиностроения. Проведен литературный обзор существующих типов производства. Результаты анализа показали существенное отличие позаказного типа производства от традиционных типов производства. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что обеспечение конкурентоспособности базируется на грамотном управлении технологической себестоимости за счет выбора оптимального варианта технологического процесса.

Ключевые слова: качество технологического процесса, машиностроительное предприятие, позаказное производство, удовлетворенность потребителей.

Введение

Современное состояние машиностроительного производства формируется, исходя из доминирующего типа производства, который за

время существования отрасли существенно изменился под влиянием различных политических, экономических, социальных условий и факторов.

Устоявшийся дефицит загрузки оборудования стимулирует отечественные предприятия анализировать рынок на предмет поиска новых заказов и потенциальных партнеров как с точки зрения изготовления готового продукта для конечного потребителя, так и изготовления комплектующих изделий, выступая в качестве поставщика более крупного производителя. В дополнения к этому процессу получает развитие направление контрактного производства. Компании, владеющие собственным брендом, передают производство готовой продукции на аутсорсинг по контракту. Такой способ производства распространился с 1990-х годов, в частности, в электронной, фармацевтической, автомобильной промышленности, в пищевой промышленности - производстве напитков [1]. В отличие от изготовления отдельных деталей и узлов при передаче полного цикла изготовления продукции по контракту заказчики сталкиваются с повышенными рисками обеспечения высокого уровня качества продукции, так как у последних меньше возможностей обнаружить дефекты до того, как готовая продукция поступит на рынок. С одной стороны, такая ситуация порождает здоровую конкуренцию между предприятиями, побуждает расширять номенклатуру производимых товаров и уделять особое внимание потребителям и их требованиям к продукции. С другой стороны, для успешного функционирования предприятия должны быть гибкими, быстро ориентироваться в разнообразии потребностей потребителей и уметь быстро эти потребности удовлетворять, а также грамотно решать внутренние проблемы, возникающие в процессе производства продукции. Поэтому в текущих условиях актуальными задачами становятся дифференциация и индивидуализация выпускаемого продукта [2].

На современном этапе развития рынка установилась потребность в изготовлении продукции высокого качества. Но наряду с высоким качеством продукции заказчик требует, чтобы срок с момента размещения заказа до поставки готовой продукции был минимально возможным. При этом в каждый заказ, закладываются уникальные параметры, которые необходимо учитывать при планировании процесса изготовления продукции от закупки материалов, до самого процесса изготовления. Поэтому серийный и массовый типы производства, свойственные периоду плановой экономики, становятся невыгодными ввиду того, что производители вынуждены занимать большие объемы складских площадей для хранения запасов продукции, замораживать активы в виде заготовок и полуфабрикатов [3], искать возможности для использования неликвидов, проводить работы по снижению остатков. Таким образом, фокус

производителей смещается от массового и серийного производств к системе позаказного производства продукции.

В данной статье рассматриваются основные особенности позаказного типа производства, дается сравнительная характеристика позаказного типа производства от традиционных типов производства по ГОСТ 14.004-83 «Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий», ставится задача необходимости выбора технологического процесса при позаказном типе производства в условиях неопределенного спроса и потребности в высоком качестве продукции.

Методы

На первом этапе, учитывая важность определения основного типа производства машиностроительных предприятий, проведен анализ существующих условий и факторов для функционирования предприятий. На втором этапе был сделан обзор трех основных типов производства - единичного, серийного, массового. В существующей системе развития организации производства можно сказать о появлении четвертого типа - позаказного типа производства, сочетающего в себе признаки трёх предыдущих типов производства. По результатам проведенного обзора выделены основные характеристики и отличия позаказного производства, которые свидетельствуют о том, что принципы планирования производства и разработки технологического процесса имеют существенные недостатки, которые необходимо устранять, при помощи определенных критериев выбора оптимального технологического процесса.

Результаты

Согласно ГОСТ 14.004-83 «Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий» под типом производства понимают категорию, которая отвечает определенным параметрам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска продукции [4]. В вышеуказанном ГОСТ определены три основных типа производства: единичное, серийное, массовое. В научной литературе достаточно подробно рассмотрены особенности и принципы организации единичного и мелкосерийного типов производства, в частности в [5,14,15].

К появлению позаказного производства привели существенные изменения условий для функционирования машиностроительных предприятий.

Во-первых, в начале 90х годов прошлого столетия стартовали процессы расслоения собственности. Появились новые для отечественной

экономики отношения – рыночные отношения, которые на определенном этапе обозначили появление нового явления производственных отношений с заказчиком. Статус заказчика приобрели не только государство, как это было присуще периоду плановой экономики, но юридические и физические лица. У предприятий появилась возможность приобретения статуса независимых экономических субъектов, самостоятельных в выборе направлений деятельности и принятии решений, касающихся реализации данных направлений [6].

Во-вторых, за последние годы произошли изменения в отношении потребителей к продукции. В отличие от периода плановой экономики, определение объемов производства в современных условиях строится на изучении запросов и ожиданий потребителей [13]. Планирование производственного процесса базируется на информации, поступающей от специалистов по маркетингу о заинтересованности в продукции как конечных потребителей, так и других предприятий. Таким образом, необходимость в массовом производстве однотипной продукции «на склад» потеряло свою актуальность. Чаще всего предприятия должны быть ориентированы на выполнение определенных заказов [20].

В-третьих, с развитием цифровизации и распространением информационных технологий произошли изменения в процессе выбора продукции. Появляется необходимость в продвижении продукции через социальные сети и интернет-магазины.

С точки зрения промышленного производства, коренным образом изменились цепочки создания ценности продукции. Снижение себестоимости продукции стало возможно за счет использования цифровых платформ и автоматизации, привлекая меньше рабочей силы, чем в период плановой экономики. Кроме того, реальность цифровой эры заключается в том, что многие новые компании предоставляют «информационные товары» с практически нулевыми затратами на хранение, транспортировку и тиражирование [7].

В-четвертых, параллельно с вышеописанными изменениями произошли изменения в сфере правового регулирования в части требований к продукции и её качеству. В связи с зарождением и развитием рыночной экономики были отрегулированы механизмы оценки деятельности предприятий и подтверждения соответствия продукции требованиям технических регламентов и других нормативных документов, в которых установлены требования к безопасности продукции для потребителя и окружающей среды.

Таким образом, можно выделить четыре основных условия для развития позаказного производства отечественных машиностроительных предприятий, которые представлены на рисунке 1.

Рис. 1. Условия для развития позаказного производства

Позаказное производство – это производство, в котором объем и номенклатура партий, а также повторяемость их изготовления зависит от требований конкретного заказчика.

Позаказное производство — это разработка под заказ определенного изделия, сборка готового изделия под заказ или производство ассортимента продукции, обладающей индивидуальными особенностями согласно требованиям заказчика [8].

Позаказное производство характеризуется вариативностью и уникальностью поступающих на производство заказов. Поэтому зачастую на начальном этапе планирования производственного процесса, в условиях необходимости принятия управленческих решений отсутствуют точные данные о продолжительности технологической подготовки производства, нормативов трудоемкости и расхода материалов [9].

Согласно [11] позаказному производству присуще сложные материальные потоки, которые регулируются спецификациями заказчика.

Для позаказного типа производства применяются универсальные инструменты, применение специального инструмента возможно в случаях унификации определенных составных частей изделия, детали и операции

могут быть закреплены за оборудованием, однако периодичность запуска деталей будет зависеть от поступающих заказов.

В таблице представлена характеристика позаказного типа производства [10] по основным классификационным признакам основных типов производства согласно ГОСТ 14.004-83.

Таблица. Характеристика позаказного типа производства

Классификационный признак	**Позаказный тип производства**
Номенклатура	Неограниченная
Повторяемость выпуска	Периодически повторяется
Применяемое оборудование	Универсальное, частично специальное
Расположение оборудования	Групповое и цепное
Разработка технологического процесса	Укрупненный метод
Применяемый инструмент	Универсальный и специальный
Закрепление деталей	Переменное, зависит от портфеля заказа
Квалификация рабочих	Высокая
Взаимозаменяемость	Неполная
Себестоимость единицы	Фактическая себестоимость определяется после изготовления заказа

Однако главным фактором, отличающим позаказное производство от других типов, является время. С одной стороны, заказчик требует выполнение заказа в максимально короткие сроки, что вынуждает предприятия выстраивать производственные и другие обеспечивающие процессы в жестких временных рамках. При этом требуется существенная перенастройка производства от заказа к заказу. С другой стороны, после выполнения заказа возникает неопределенность по времени поступления следующего заказа. Длительный период между заказами приводит к потерям знаний о технологии изготовления и необходимости выстраивания всех процессов заново, что становится причиной невозможности выполнения заказа в срок. Основные особенности позаказного типа производства в системе "заказчик - сроки выполнения заказа" представлены на рисунке 2.

Таким образом, на основании вышеперечисленных условий позаказного производства в [16] выделены три модели, по которым производитель может проводить постановку продукции на производство: либо создание продукции по госзаказу, либо создание продукции по заказу конкретного потребителя, либо в качестве собственной инициативы с учетом потенциального спроса и рисков.

Рис. 2. Основные особенности позаказного типа производства

Непонимание основных особенностей позаказного производства приводит к ошибкам в планировании производственной программы и, как следствие, к неравномерной загрузке оборудования, неправильному распределению нагрузки на персонал, несоответствию между потребностью и возможностью в обеспечении материалов и покупных комплектующих изделиях, срывов плана производства и нарушению контрактных обязательств.

Для успешного позаказного производства важно учитывать меняющийся спрос, объемы, стратегии ценообразования, тип продукта и гибкость поставщика в изменении предложения в соответствии с потребительским спросом [11,19].

С одной стороны, условия позаказного производства закладывают фундамент для повышения конкурентоспособности продукции, стимулируют к расширению номенклатуры выпускаемой продукции и принятию концепции повышения качества на всех этапах производственного процесса.

С другой стороны, новые требования внешней среды создают проблемы внутри предприятий, связанные с издержками производства. Современные условия заставляют специалистов технических служб проектировать технологические процессы в жестких временных и

стоимостных рамках. При этом в случае выигрыша заказа предпочтение отдаётся той продукции, которая имеет меньшую стоимость, но соизмеримое с ближайшими конкурентами качество.

Существует мнение, что в настоящее время, с учетом развития цифрового пространства, для обеспечения конкурентоспособности стратегии, преимущественно направленные на снижение затрат, окажутся менее эффективными, чем стратегии, основанные на более инновационных способах предложения продуктов и услуг [7]. Концепция развития цифровых платформ для продвижения услуг, безусловно, имеет перспективы для обеспечения доступности для потребителей и получения большего числа заказов. Однако для машиностроительной отрасли приоритетной останется направление улучшение качества внутренних процессов, способствующих повышению и продолжению устойчивого развития и получения заказов.

Уровень конкурентоспособности предприятия выражается следующей формулой:

$$К = \frac{Q}{С} \quad (1),$$

где

Q – качество продукции

С – суммарные затраты, связанные с технологической себестоимостью продукции

С одной стороны, машиностроительные предприятия должны повышать качество продукции за счет снижения потерь от брака, а с другой – снижать суммарные затраты на изготовление продукции. Уровень качества задается заказчиком, поэтому для обеспечения конкурентоспособности необходимо соответствовать заданному уровню качества и быть способным снижать до минимума затраты на производство продукции, прежде всего, путем грамотного снижения технологической себестоимости продукции.

Обсуждение

К сожалению, результаты анализа деятельности машиностроительных предприятий свидетельствуют об отсутствии критериев выбора оптимального варианта технологического процесса, применении устаревших технологических процессов, отсутствие учета особенностей работы производственного оборудования и вариативность материала изготовления деталей.

Зачастую изменения, направленные на оптимизацию и снижение себестоимости изготовления продукции, несут краткосрочный положительный экономический эффект и приводят к нарушению устоявшейся производственной системы и вводят предприятие в круг задач по постоянному снижению издержек. Поэтому возникает

необходимость в применении иных подходов к организации производства, поиску внутренних резервов в технологических процессах изготовления продукции, снижении потерь за счет оптимизации операций технологических процессов.

Качество технологического процесса – это функция от свойств технологического процесса

$$\text{Ктп} = F(v1, \dots vn) \quad (2),$$

где

$v1, \dots vn$ – свойства технологического процесса

В свою очередь, на качество технологического процесса влияют следующие факторы:

- Отсутствие времени на его разработку. Технологи вынуждены брать типовые технологические процессы, без сравнительного анализа альтернативных технологических процессов. При выполнении заказов не закладывается время на изготовление специальных приспособлений и оснастки. Данный фактор можно выразить через трудоемкость изготовления изделия.

- Отсутствие времени на отработку технологии изготовления продукции. Практически отсутствует понятие изготовления опытных партий и проведения усиленного контроля геометрических параметров продукции в процессе выпуска первых партий. Данный фактор можно выразить свойствами технологической себестоимости изделия и удельной материалоемкость изделия.

- Отсутствие на предприятии специалистов, обладающих знаниями и навыками разработки оптимальных технологических процессов. Также отсутствие опыта работы у рабочего увеличивает риск возникновения отклонений от технологического процесса и появления брака. Данный фактор можно выразить свойствами стабильности и точности технологического процесса.

- Возникновение разрывов между заказами, что фактически приводит к необходимости в разработке технологического процесса заново. Данный фактор можно выразить свойством воспроизводимости технологического процесса.

Таким образом, качество технологического процесса возможно определить из следующих свойств: трудоемкость изготовления изделия, технологическая себестоимость изделия и удельная материалоемкость изделия, стабильность, точность, воспроизводимость технологического процесса.

Обеспечение качества технологических процессов возможно за счет использования подходов по применению автоматизированных систем планирования и проектирования технологических процессов,

реализованных на едином информационном пространстве предприятия, описанных в [16,17,18].

Заключение

В условиях позаказного производства, с одной стороны, мы видим возрастающую потребность в обеспечении высокого качества продукции. При этом, с другой стороны, качество продукции либо не улучшается, либо снижается ввиду потери компетенций из-за сокращения кадрового состава и отсутствия времени на технологическую подготовку производства. Такая ситуация приводит к использованию устаревших технологических процессов без анализа их экономичности и проработки альтернативных вариантов технологических операций.

Позаказное производство породило необходимость в условиях каждого заказа в той или иной степени осуществлять технологическую подготовку производства, чтобы обеспечить выполнения особенностей требований заказчика в каждом очередном заказе с учётом динамики развития потребностей потенциального заказчика и его желания как можно быстрее их удовлетворить в условиях массового роста информационного поля о потребительских свойствах продукции [12].

Определение критериев выбора оптимального варианта технологического процесса и параметров, оказывающие наибольшее влияние на значение каждого критерия позволят находит оптимальные решения при производстве продукции на заказ с учетом меняющихся потребностей и условий рынка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] John V. Gray, Sean M. Handley. Managing contract manufacturer quality in the presence of performance ambiguity. // Journal of Operations Management. – Volume 38. – 2015. – pp. 41-55

[2] John V. Gray, Sean M. Handley. Managing capacity flexibility in make-to-order production environments. // European Journal of Operational Research. – Volume 216. – 2012. – pp. 334-345

[3] Краснов С.В. Основные проблемы организации позаказного производства в автомобилестроении и возможные пути их решения/ С.В. Краснов, С.В. Сорокин // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2011. – № 17 – С. 63-68.

[4] ГОСТ 14.004-83 «Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий»

[5] Типнер Л.М. Проблемы организации в условиях единичного и мелкосерийного производства/ Л.М. Типнер, Н.Р. Исхакова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2019. – №5-3 – С. 97-102.
[6] Котилевская Т.С. Сущность и факторы понятия внешней среды / Т.С. Котилевская // Инновационная наука. – 2017. – № 5 – С. 109-112.
[7] Клаус Шваб. Четвертая промышленная революция// Из-во Бомбора - 2016, 230 с.
[8] Питеркин С. Уравнение со всеми известными // Intelligent enterprise. – 2005. – №8 (118).
[9] Панченко Е.С. Единичное и мелкосерийное производство: позаказный метод работы // Планово-экономический отдел. – 2018. – №7.
[10] Сальникова, М. П. Характеристика разных типов производства / М.П.Сальникова, Л.Ю. Шемятихина // Международная заочная научно-практическая конференция «Экономика и управление: прошлое, настоящее, будущее» (15 мая 2012 г.). - Екатеринбург
[11] Mudgal D, Pagone E, Salonitis K. Approach to value stream mapping for make-to-order manufacturing. // Procedia CIRP. – Volume 93. – 2020. – pp.826-831
[12] Васильев А. В. Организация производства и управление предприятием/ Васильев А. В., Гасюк Д.П., Яковлев В. Б. Учебное пособие.// СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - 2012, 78 с.
[13] Косова В.А. К вопросу анализа разработки технологических процессов машиностроительных предприятий / Косова В.А., Гасюк Д.П. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №2 – С. 655-658.
[14] Лазарев Б.Н. Особенности технологической подготовки на этапе развития предприятия мелкосерийного и единичного производства в машиностроительной отрасли / Лазарев Б.Н., Кобзев В.В. // В сборнике: фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли. Сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. В 4 ч. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 198-202.
[15] Егоров М.Е. и др. Технология машиностроения. Учебник для втузов. Издание 2-е, доп.М., "Высшая школа", 1976, 534 с.
[16] Куликов Д.Д. Проектирование технологических процессов в информационно-управляющей среде. / Куликов Д.Д., Яблочников Е.И., Абышев О.А., Чукичев А.В. // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10 – С. 487-508.
[17] Tyson R. Browning A Quantitative Framework for Managing Project Value, Risk, and Opportunity // Transaction on engineering management. – VOL. 61. – NO. 4. – 2014. – pp.583-598

[18] Bulut Aslan, Mark Stevenson, Linda C. Hendry. Enterprise Resource Planning systems: An assessment of applicability to Make-To-Order companies // Computers in Industry. – NO.63. – 2012. – pp 692–705.
[19] Douglas C. Montgomery , Connie M. Borror: Systems for modern quality and business improvement, Quality Technology & Quantitative Management. – 2017.
[20] Oya I. Tukel, Ashutosh Dixit. Application of customer lifetime value model in make-to-order manufacturing // Journal of Business & Industrial Marketing – 28/6. – 2011. – pp. 468–474

D. P. Gasyuk, V.A. Kosova

THE CHOICE PROBLEM OF THE OPTIMAL VARIANT OF THE PRODUCTION PROCESS OF ENGINEERING PRODUCTS IN THE MODERN CONDITIONS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the modern conditions and factors of the appearance of a make-to-order production of engineering products. A literature review of the available types of production has been carried out. The results of the analysis have shown a considerable difference between a make-to-order production and traditional types of production. The research demonstrates that promotion of competitiveness is based on the efficient management of the production cost by choosing the optimal variant of the technological process.

Key words: quality of business process, machine-building company, make-to-order production, customer satisfaction

REFERENCES

[1] John V. Gray, Sean M. Handley. Managing contract manufacturer quality in the presence of performance ambiguity. Journal of Operations Management, Volume 38, 2015, pp. 41-55
[2] John V. Gray, Sean M. Handley. Managing capacity flexibility in make-to-order production environments. European Journal of Operational Research, Volume 216, 2012, pp. 334-345
[3] Krasnov S.V. Basic problems of organization of job order production in motor industry and its possible solutions/ S.V. Krasnov, S.V Sorokin // Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev. – 2011. – NO 17 – pp. 63-68.

[4] GOST 14.004-83 « Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts»
[5] L.M. Tipner, Problem of organization in conditions of unit and small batch. / L.M. Tipner, N.R. Ishakova // Economics and business: theory and practice. – 2019. – NO. 5-3 – pp. 97-102.
[6] Kotelevskaya T.S.The essence and factors of the concept in the external environment. / T.S. Kotelevskaya // Innovative science. – 2017. – NO 5 – pp. 109-112.
[7] Klaus Schwab The Fourth Industrial Revolution // Bombora - 2016, 230 p.
[8] Peterkin S. Equation with all known // Intelligent enterprise. – 2005. – №8 (118).
[9] Panchenko E.S. Single and small-scale production: a custom method of work // Planning and economic department. 2018. No. 7.
[10] Salnikova, M.P. Characteristics of different types of production / M.P. Salnikova, L.Yu. Shemyatikhina // International Correspondence Scientific and Practical Conference "Economics and Management: Past, Present, Future" (May 15, 2012)
[11] Mudgal D, Pagone E, Salonitis K. Approach to value stream mapping for make-to-order manufacturing. Procedia CIRP, Volume 93, 2020, pp.826-831
[12] Vasiliev A.V., Gasyuk D.P., Yakovlev V.B. Organization of production and enterprise management / Vasiliev A.V., Gasyuk D.P., Yakovlev V.B. Textbook.// St. Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" - 2012, 78 p.
[13] V.A. Kosova, D. P.Gasyuk. Revising analyses of conditions of technological processes development at machine-building plants // News of TulSU. Technical sciences . 2021. NO.2. pp. 655-658.
[14] Lazarev B.N., Kobzev V.V. Features of technological preparation at the stage of development of the enterprise of small-scale and single production in the machine-building industry. // In the collection: fundamental and applied research in the field of management, economics and trade. St. Petersburg, 2021., pp. 198-202.
[15] Егоров М.Е. и др. Mechanical engineering textbook for higher education. Edition 2.M., "Higher school", 1976, 534 p.
[16] D.D.Kulikov, E.I.Yablochnikov, O.A. Abyshev, A.V. Chukichev Design of technological processes in the information and control system // Modern mechanical engineering. Science and Education. – 2021. – NO 10 – pp. 487-508.
[17] Tyson R. Browning A Quantitative Framework for Managing Project Value, Risk, and Opportunity // TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT, VOL. 61, NO. 4, NOVEMBER 2014

[18] Bulut Aslan , Mark Stevenson 1, Linda C. Hendry 2Enterprise Resource Planning systems: An assessment of applicability toMake-To-Order companies Computers in Industry 63 (2012) 692–705.
[19] Douglas C. Montgomery , Connie M. Borror: Systems for modern quality and business improvement, Quality Technology & Quantitative Management. – 2017.
[20] Oya I. Tukel, Ashutosh Dixit. Application of customer lifetime value model in make-to-order manufacturing // Journal of Business & Industrial Marketing – 28/6. – 2011. – pp. 468–474

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022

УДК 669.295.5.018.2

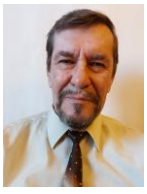
Ю.Б. Егорова[1], Л.В. Давыденко[2], Е.Н. Егоров[3], Б.Б. Былов[4], С.Б.Белова[5]

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С ГЛОБУЛЯРНОЙ И ПЛАСТИНЧАТОЙ СТРУКТУРАМИ

[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] Евгений Николаевич Егоров
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (917)556-8258, e-mail: aravir_ene@mail.ru



[4] Борис Борисович Былов
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (916)518-8991, e-mail: bbbktn@gmail.com

[5] Светлана Борисовна Белова
Московский авиационный институт
Россия, Ступино, Московская область
Тел.: (910)453-4825, e-mail: belovamai@gmail.com

Аннотация

В работе исследованы статистические закономерности совместного влияния химического состава и структуры на механические свойства и обрабатываемость резанием сплава ВТ6 после отжига. Установлено, что увеличение эквивалентов по алюминию и молибдену приводит к росту предела прочности и уменьшению стойкости твердосплавных резцов. При одинаковом химическом составе предел прочности прутков с пластинчатой структурой и стойкость резцов имеют более низкие значения по сравнению с глобулярной структурой. Получены модели для прогнозирования стойкости твёрдосплавных резцов, оснащенных пластинами твердого сплава ВК8, при продольном точении сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой структурой после отжига.

Ключевые слова: титановые сплавы, сплав ВТ6, химический состав, термическая обработка, структура, механические свойства, обрабатываемость резанием, статистический анализ.

Введение

Систематические исследования по установлению качественных и количественных закономерностей влияния параметров пластинчатой и глобулярной структуры на механические свойства титановых сплавов ВТ5-1, ОТ4, ВТ3-1, ВТ9, ВТ25У были проведены в ВИЛСе в 1970-90-х г.г. Бруном М.Я. с соавторами [1, 2]. Наиболее изученным стал жаропрочный сплав ВТ3-1, который в то время являлся самым распространенным отечественным титановым сплавом. В работах [3, 4] по исследованию обрабатываемости резанием этого сплава было выявлено, что наибольшая стойкость резцов и минимальные силы резания при точении обнаружены для образцов с мелкоглобулярной структурой. Формирование грубой пластинчатой структуры приводило к ухудшению обрабатываемости резанием.

В РФ в последние годы происходит переход на сплавы типа Ti-6Al-4V (ВТ6, ВТ6С, ВТ6ч), так как они оказались наиболее удачными из всех титановых сплавов по сочетанию комплекса механических и технологических свойств. В нашей стране этими сплавами некоторое время пренебрегали, применяли мало, и только по инициативе главного технолога Туполевской фирмы С.А. Вигдорчика в 1980-1990-х годах к ним появился интерес. В настоящее время сплавы типа Ti-6Al-4V являются наиболее изученными, имеется довольно много публикаций по влиянию химического состава и термической обработки на их структуру, свойства и обрабатываемость резанием [3-17]. В частности, в работах [16, 17] были

исследованы параметры обрабатываемости резанием сплава ВТ6 с пластинчатой структурой после закалки и старения. Было установлено, что при точении образцов сплава ВТ6 с пластинчатой структурой стойкость резца ВК8 возрастает с уменьшением размера β-зерна, толщины α-оторочки по границе зерна, размера α-колоний, толщины и длины α-пластин [16].

В работе [17] показано, что колебания марочного состава и параметров структуры могут приводить к вариации механических свойств и характеристик обрабатываемости резанием сплавов типа Ti-6Al-4V. Выявлено, что увеличение прочностных эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену приводит к росту предела прочности обрабатываемого материала и уменьшению стойкости твердосплавных резцов. На основе статистического анализа получены модели для прогнозирования стойкости твёрдосплавных резцов при точении сплавов типа Ti-6Al-4V с глобулярной, переходной и смешанной структурой после стандартного отжига.

Цель данной работы состояла в исследовании статистических закономерностей влияния химического состава на механические свойства и обрабатываемость резанием сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой структурами после разных видов отжига.

Методы

Объектами исследования послужили катаные прутки (диаметром 16-155 мм) из сплава ВТ6, изготовленные ЗАО «ПО Зубцовский машиностроительный завод» в 2012-2016 годах. Были исследованы химический состав и механические свойства прутков (69 плавок) после различных видов отжига: для снятия напряжений и простой (600-920 °С, 20-180 мин., охлаждение на воздухе или с печью), двойной (900-960 °С, 20-60 мин., охлаждение на воздухе, 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). Химический состав исследованных прутков приведен в табл. 1.

Для комплексной оценки химического состава использовали структурные эквиваленты по алюминию и молибдену, а не прочностные, как в работе [17]. Это связано с тем, что формулы для расчета прочностных эквивалентов были получены для сплавов после простого отжига, так что после двойного и изотермического отжигов они вряд ли приемлемы. Структурные эквиваленты по алюминию и молибдену были рассчитаны по соотношениям, приведенным в монографии [18].

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных

изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS Image Expert Pro3.6. Измерение твердости по методу Роквелла проводили на приборе BUEHLER Macromet 5100T по шкале HRC с нагрузкой 1500 Н согласно ГОСТ 9013-59. Свойства при испытаниях на растяжение определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84 на гладких образцах диаметром 5 мм, длиной рабочей части 25 мм при нормальной температуре на универсальной машине TIRA-test 2300.

Таблица 1. Статистические характеристики химического состава (% по массе) сплава ВТ6 (69 плавок)

Статистические характеристики	**Al**	**V**	**Fe**	**Si**	**C**	**O**	**N**	$[Al]_{экв}^{стр}$	$[Mo]_{экв}^{стр}$
Диапазон по ОСТ1 90013-81	5,3-6,8	3,5-5,3	≤0,60	≤0,10	≤0,10	≤0,20	≤0,05	-	-
Диапазон значений по факту	5,51-6,81	3,52-5,05	0,01-0,55	0,0-0,1	0,011 - 0,108	0,035-0,206	0,005 - 0,047	7,1-9,6	2,8-4,2
Выборочное среднее	6,14	4,16	0,13	0,06	0,06	0,12	0,023	8,5	3,3
Стандартное отклонение	0,28	0,31	0,09	0,03	0,036	0,055	0,013	0,6	0,3
Коэффициент вариации, %	4,6	7,3	66	56	61	46	55	8	10

Были проведены ускоренные стойкостные испытания резцов при различных режимах точения по методике, реализованной в ППП Statistica [19]. Для этого получали зависимости T=f(V,S,t) в соответствии с матрицей планирования, построенной на основе дробного факторного эксперимента 2^{3-1}. Зависимость T=f(V,S,t) представляли в виде полинома: $y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$, где $y=lgT$, $x_1=lgV$, $x_2=lgS$, $x_3=lgt$. Уровни варьирования факторов приведены в табл. 2. После составления матрицы планирования проводили стойкостные испытания резцов, оснащенных пластинами твердого сплава ВК8, при продольном точении прутков диаметром 40 мм разного химического состава с охлаждением зоны резания сжатым воздухом. За критерий затупления принимали износ по задней поверхности резца $h_з$=0,3 мм. Методические подробности проведения стойкостных экспериментов описаны в работе [17].

Таблица 2. Уровни варьирования факторов

Уровень	Код уровня	V, м/мин	S, мм/об	t, мм
Верхний	+1	80	0,35	2,0
Нулевой	0	60	0,28	1,5
Нижний	-1	40	0,21	1,0

Статистический анализ, проведенный на основе ППП Statistica по стандартной методике [19], включал первичную статистическую обработку

и корреляционно-регрессионный анализ с доверительной вероятностью 0,95.

Результаты исследований и их обсуждение

В зависимости от колебаний химического состава, режимов отжига и типа структуры механические свойства прутков имеют большой общий разброс (табл. 3). При одинаковом химическом составе образцы с глобулярной структурой имеют более высокие характеристики прочности (в среднем на 50-100 МПа) и пластичности (на 5-20%) по сравнению с пластинчатой структурой (рис. 1).

Таблица 3. Механические свойства прутков диаметром 16-155 мм сплава ВТ6 в зависимости от типа структуры после различных видов отжига
(в числителе диапазон, в знаменателе – среднее)

Тип и параметры* структуры	**Число образцов**	**$\sigma_в$, МПа**	**δ, %**	**ψ, %**	**HRC**
глобулярная a_α = 2,0-9,5 мкм	103	929-1076 1013	10-21 17	24-48 37	30-36 34
пластинчатая b_α = 1,5-5,5 мкм	45	818-1050 896	8-19 14	13-47 30	26-40 32

Примечание: * a_α – диаметр α-глобулей; b_α - толщина пластин α-фазы.

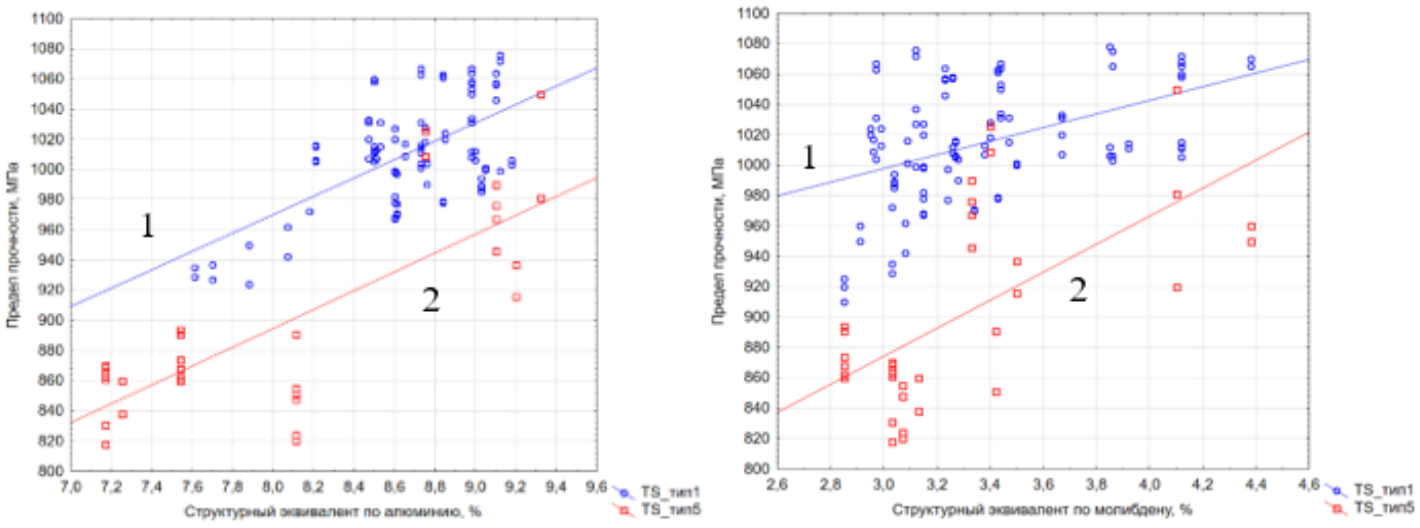


Рис. 1. Зависимость предела прочности прутков диаметром 16-155 мм из сплава ВТ6 с глобулярной (1) и пластинчатой структурами (2) от эквивалентов по алюминию и молибдену после разных видов отжига.

Для прутков сплава ВТ6 с глобулярной структурой увеличение размера α-глобулей с ~2,0 до ~9,5 мкм приводит к снижению предела

прочности, росту пластичности и ударной вязкости. Для прутков с пластинчатой структурой увеличение толщины α-пластин с ~1,5 до 5,5 мкм также сопровождается снижением прочностных свойств. На зависимостях δ и ψ наблюдается максимум при толщине пластин ~3,0-3,5 мкм, что соответствует закономерностям, установленным Бруном М.Я. для сплава ВТ3-1 [1, 2].

Разный уровень свойств связан с различиями в механизме деформации, зарождения трещины и разрушения [1, 2]. В пластинчатой структуре легче зарождается трещина по сравнению с глобулярной. В частности, в пластинчатой структуре края α-пластин могут являться концентраторами напряжений. Более высокая пластичность образцов с глобулярной структурой обусловлена тем, что деформация протекает более однородно по сравнению с пластинчатой. По результатам микроструктурных и фрактографических исследований, приведенных в работах [1, 2], в глобулярной структуре реализуется тонкое скольжение в пределах отдельных глобулей, в то время как в пластинчатой – так называемое грубое скольжение, которое обусловлено повышенной микронеоднородностью деформации.

На основе проведенных исследований установлены регрессионные зависимости предела прочности от эквивалентов по алюминию и молибдену (табл. 4). Недостаточно высокие коэффициенты корреляции могут быть связаны с влиянием неучтенных факторов, в частности размеров структурных составляющих (толщины α-пластин, размеров α-колоний и β-зерна) и диаметра прутка.

Таблица 4. Результаты регрессионного анализа зависимости предела прочности от структурных эквивалентов по алюминию и молибдену сплава ВТ6 с разной структурой

Тип структуры	Регрессионная модель	R	S*, МПа
Глобулярная	$\sigma_в$=300 +65$[Al]_{экв}^{стр}$ +45 $[Mo]_{экв}^{стр}$	0,52	50
Пластинчатая	$\sigma_в$=230 +65 $[Al]_{экв}^{стр}$+45$[Mo]_{экв}^{стр}$	0,67	55

Примечание: * S – статистическая ошибка модели.

Для исследования обрабатываемости при точении сплава ВТ6 были выбраны прутки диаметром 40 мм с разной степенью легирования и типом структуры (табл. 5). Температуру отжига выбирали в зависимости от температуры полиморфного превращения (Тпп) слитка в соответствии с производственной инструкцией ВИАМ и рекомендациями, приведенными в работе [20]: $t_{отж}$=Тпп-180°С.

Результаты стойкостных испытаний приведены в табл. 6. На основе регрессионного анализа результатов исследований были получены

стойкостные зависимости при точении отожженных прутков сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой структурой:

$$T = \frac{T_0}{([Al]_{экв}^{стр})^{0,95}([Mo]_{экв}^{стр})^{0,4}. V^{2,5} \quad S^{2,1} \quad t^{2,1}},$$

где T_o - константа, зависящая от типа структуры: T_o=137730 для глобулярной структуры, T_o=91829 для пластинчатой структуры.

Таблица 5. Механические свойства прутков диаметром 40 мм из сплава ВТ6 после отжига : ($t_{отж}$= ТПП-180°С, 1 час, охлаждение на воздухе)

Уровень легирования	$[Al]_{экв}^{стр}$, %	$[Mo]_{экв}^{стр}$, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Глобулярная структура				
I	7,1	2,8	825	19,5
II	7,8	3,0	945	18,0
III	8,5	3,8	1010	15,0
IV	9,6	3,6	1100	14,3
Пластинчатая структура				
I	7,1	2,8	785	14,3
II	7,8	3,0	877	15,1
III	8,5	3,8	935	11,0
IV	9,6	3,6	1040	9,2

Сопоставление расчетной стойкости твердосплавных резцов при получистовом точении прутков сплава ВТ6 с разной степенью легирования и типом структуры показало, что увеличение структурных эквивалентов по алюминию и молибдену и переход от глобулярной к пластинчатой структуре приводит к уменьшению стойкости резца.

Таблица 6. Результаты стойкостных испытаний резца ВК8 при точении сплава ВТ6 после стандартного отжига

№	V, м/мин	S, мм/об	t, мм	T*, мин, при уровне легирования**			
				I	II	III	IV
Глобулярная структура							
1	80	0,35	2,0	0,6	0,5	0,3	0,2
2	40	0,35	1,0	11,0	9,7	8,7	7,8
3	80	0,21	1,0	5,6	5,0	4,5	4,0
4	40	0,21	2,0	7,5	6,5	5,8	5,2
Пластинчатая структура							
5	80	0,35	2,0	0,4	0,3	0,2	-
6	40	0,35	1,0	7,5	7,0	5,9	-
7	80	0,21	1,0	4,0	3,2	2,8	-
8	40	0,21	2,0	5,3	4,5	3,9	-

Примечания: * - приведено среднее значение; ** - см. табл. 4.

Например, при точении прутков с глобулярной структурой по режиму, применяемому на производстве (скорость резания V=40 м/мин, подача S=0,21 мм/об, глубина резания t=1,0 мм) стойкость резца возрастает с 23 мин до 36 мин соответственно с изменением степени легирования с $[Al]_{экв}^{стр}$=10,0%; $[Mo]_{экв}^{стр}$=4,0% (верхняя граница трехсигмового интервала легирования) до $[Al]_{экв}^{стр}$=7,0%; $[Mo]_{экв}^{стр}$=3,0% (нижняя граница трехсигмового интервала легирования). Точение по тому же режиму заготовок с пластинчатой структурой приводит к снижению стойкости в ~1,5 раза.

Заключение

На основе проведенных исследований установлено, что колебания марочного состава и структуры приводят к вариации механических свойств и характеристик обрабатываемости резанием при точении сплава ВТ6. Установлено, что переход от глобулярной к пластинчатой структуре, а также увеличение структурных эквивалентов по алюминию и молибдену приводит к росту предела прочности и уменьшению стойкости твердосплавных резцов. При одинаковом химическом составе (в перерасчете на эквиваленты) предел прочности прутков с пластинчатой структурой имеет более низкие значения (на ~50-100 МПа) по сравнению с глобулярной структурой. На основе статистического анализа получены модели для прогнозирования стойкости твёрдосплавных резцов, оснащенных пластинами твердого сплава ВК8, при продольном точении сплава ВТ6 с глобулярной и пластинчатой структурой после отжига. Стойкость резца при точении сплава с глобулярной структурой выше приблизительно в 1,5 раза по сравнению с пластинчатой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Полуфабрикаты из титановых сплавов. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров П.П. и др. - М.: ВИЛС, 1996, 581 с.

[2] Полуфабрикаты из титановых сплавов. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. – М.: Металлургия, 1979, 512 с.

[3] Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Белова С.Б. Влияние термической обработки на обрабатываемость резанием α+β- и псевдо β-титановых сплавов / Современное машиностроение: наука и образование: материалы 5-й Международной научно - практической конференции / под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. С.1052-1061. http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2016/1040-1051.pdf

[4] Egorova Yu.B., Il′in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Effect of the Structure on the Cutability of Titanium Alloys / // Metal Science and Heat Treatment. 2003. V.45. №3-4. P.134-139.
[5] I. Gurrappa. Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. Materials Characterization. Volume 51. Issues 2–3. October 2003. P. 131-139.
[6] Khanna, N., Sangwan, K.S. Machinability study of α/β and β titanium alloys in different heat treatment conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. №. 3. P. 357-361.
[7] N. Khanna, K.S. Sangwan, Machinability analysis of heat treated Ti64, Ti54M and Ti10.2.3 titanium alloys. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14 (5). P. 719-724. DOI: 10.1007/s12541-013-0096-9
[8] N. Khanna, A. Garay, L.M. Iriarte, D. Soler, K.S. Sangwan, P.J. Arrazola, Effect of heat treatment conditions on the machinability of Ti64 and Ti54M alloys. Procedia CIRP. 2012. Vol. 1, n.1, P. 477-482. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.085
[9] N. Khanna, K.S. Sangwan, Comparative machinability study on Ti54M titanium alloy in different heat treatment conditions. Proc. IMechE Part B: J Engineering Manufacture. 2012.Vol. 227. n.1, P. 96–101.
[10] Armendia, M., Osborne, P., Garay, A., Belloso, J., Turner, S., Arrazola, P.-J. Influence of heat treatment on the machinability of titanium alloys. Materials and Manufacturing Processes. 2012. Vol. 27. №. 4. Pp. 457-461.
[11] S.E. Niknam, R. Khettabi, V.Songmene, Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review, In J.P. Davim (Ed.). Machining of Titanium Alloys, pp. 1-30 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014)
[12] M.V. Ribeiro, M.R.V. Moreira, J.R. Ferreira. Optimization of titanium alloy (Ti-6Al-4V) machining. Journal of Materials Processing Technology. 2003.1, pp.143-144, pp. 458-463.
[13] Mahshad Javidikia, Victor Songmene, Mohammad Jahazi. Finite element simulation-based predictive regression modeling and optimum solution for grain size in machining of Ti6Al4V alloy: Influence of tool geometry and cutting conditions. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 104, November 2020. 102141.
[14] Syed Basith Muzammil, Alemnew Ebabu Endale, Shimelis Bihon Gasha. Studies on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V using abrasive water jet cutting. Syed Basith Muzammil Journal of Engineering Research and Application. Vol. 8. Issue5 (Part -IV). May 2018, pp 81-87.
[15] Egorova, Y.B., Davydenko, L.V., Egorov, E.N., Chibisova, E.V., Starchikova, I.Y. Study of stability of chemical composition and characteristics of machinability of titanium alloys of Ti-Al-V and Ti-Al-

Mo-V-Cr-Fe systems. International Review of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 14(2). Pp. 111–118.
[16] Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В., Егоров Е.Н., Чибисова Е.В. Разработка рекомендаций по улучшению обрабатываемости резанием титанового сплава Ti-6Al-4V путем оптимизации режимов термической обработки / 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. 560-571.
[17] Egorova Y.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B. Prediction of Mechanical Properties and Machinability by Cutting of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Depending on the Aluminum and Molybdenum Equivalents. / In: Evgrafov A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022, p.117-128. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91553-7_13
[18] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. - М.: ВИЛС – МАТИ, 2009 – 520 с.
[19] Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 288 с.
[20] Egorova, Y.B., Skvortsova, S.V., Chibisova, E.V., Davydenko, L.V. Increasing the Stability of Mechanical Properties of Semifinished Products from Ti–6Al–4V Alloys by Correcting the Alloying Range and Annealing Modes // Metallurgist, 2021, 65(7-8), p. 872–885.

Yu.B.Egorova[1], L.V.Davidenko[2], E.N.Egorov[3] , B.B.Bylov, S.B.Belova [5]

PREDICTION AND COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES AND MACHINABILITY TITANIUM ALLOY VT6 WITH GLOBULAR AND LAMELLAR STRUCTURES

[1,3,4,5]MAI Stupinsky branch, Russia;
[2]Moscow Polytechnic University, Russia.

Abstract

The statistical regularities of the combined effect of chemical composition and structure on the mechanical properties and machinability VT6 alloy after annealing are investigated. It is established that an increase in aluminum and molybdenum equivalents leads to an increase in the tensile strength and a decrease in the durability of carbide cutters. With the same chemical composition, the tensile strength of bars with a lamellar structure and the

resistance of the cutters have lower values compared to the globular structure. Models have been obtained for predicting the durability of carbide cutters equipped with VK8 hard alloy plates during longitudinal turning of VT6 alloy with globular and lamellar structures after annealing.

Key words: titanium alloys, alloy VT6, chemical composition, heat treatment, structure, mechanical properties, machinability, statistical analysis.

REFERENCES

[1] Semi-finished products made of titanium alloys. Alexandrov V.K., Anoshkin N.F., Belozerov P.P., etc. - M.: VILS, 1996, 581 p. (rus.)
[2] Semi-finished products made of titanium alloys. Alexandrov V.K., Anoshkin N.F., Bochvar G.A. and others – M.: Metallurgy, 1979, 512 p. (rus.)
[3] Egorova Yu.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B. The effect of heat treatment on the machinability of α+β- and pseudo β-titanium alloys by cutting / Modern mechanical engineering: science and education: materials of the 5th International Scientific and Practical Conference / edited by A.N.Evgrafov and A.A. Popovich.– St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. un-ta, 2016, pp.1052-1061. (rus.)
[4] Egorova Yu.B., Il´in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. Effect of the Structure on the Cutability of Titanium Alloys / // Metal Science and Heat Treatment. 2003. V.45. №3-4. P.134-139.
[5] I. Gurrappa. Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. Materials Characterization. Volume 51. Issues 2–3. October 2003. P. 131-139.
[6] Khanna, N., Sangwan, K.S. Machinability study of α/β and β titanium alloys in different heat treatment conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. №. 3. Pp. 357-361.
[7] N. Khanna, K.S. Sangwan, Machinability analysis of heat treated Ti64, Ti54M and Ti10.2.3 titanium alloys. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14 (5), pp. 719-724, DOI: 10.1007/s12541-013-0096-9
[8] N. Khanna, A. Garay, L.M. Iriarte, D. Soler, K.S. Sangwan, P.J. Arrazola, Effect of heat treatment conditions on the machinability of Ti64 and Ti54M alloys. Procedia CIRP. 2012. Vol. 1, n.1, pp. 477-482. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.085
[9] N. Khanna, K.S. Sangwan, Comparative machinability study on Ti54M titanium alloy in different heat treatment conditions. Proc. IMechE Part B: J Engineering Manufacture. 2012.Vol. 227. n.1. P. 96–101.

[10] Armendia, M., Osborne, P., Garay, A., Belloso, J., Turner, S., Arrazola, P.-J. Influence of heat treatment on the machinability of titanium alloys. Materials and Manufacturing Processes. 2012. Vol. 27. №. 4. Pp. 457-461.
[11] S.E. Niknam, R. Khettabi, V.Songmene, Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review, In J.P. Davim (Ed.). Machining of Titanium Alloys, pp. 1-30 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014)
[12] M.V. Ribeiro, M.R.V. Moreira, J.R. Ferreira. Optimization of titanium alloy (Ti-6Al-4V) machining. Journal of Materials Processing Technology. 2003.1, pp.143-144, pp. 458-463.
[13] Mahshad Javidikia, Victor Songmene, Mohammad Jahazi. Finite element simulation-based predictive regression modeling and optimum solution for grain size in machining of Ti6Al4V alloy: Influence of tool geometry and cutting conditions. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 104, November 2020. 102141.
[14] Syed Basith Muzammil, Alemnew Ebabu Endale, Shimelis Bihon Gasha. Studies on machining characteristics of titanium alloy Ti-6Al-4V using abrasive water jet cutting. Syed Basith Muzammil Journal of Engineering Research and Application. Vol. 8. Issue5 (Part -IV). May 2018, pp 81-87
[15] Egorova, Y.B., Davydenko, L.V., Egorov, E.N., Chibisova, E.V., Starchikova, I.Y. Study of stability of chemical composition and characteristics of machinability of titanium alloys of Ti-Al-V and Ti-Al-Mo-V-Cr-Fe systems. International Review of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 14(2). Pp. 111–118.
[16] Egorova Y.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B., Chibisova E.V. Development of recommendations for cutting titanium alloy Ti-6Al-4V by optimizing heat treatment modes / Modern mechanical engineering: science and education: materials of the 6th International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic university. 2017. №6. Pp. 560-571.
[17] Egorova Y.B., Davydenko L.V., Egorov E.N., Belova S.B. Prediction of Mechanical Properties and Machinability by Cutting of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Depending on the Aluminum and Molybdenum Equivalents. / In: Evgrafov A.N. (eds) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022, p.117-128. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91553-7_13
[18] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. - M.: VILS – MATI, 2009 – 520 p. (rus.)
[19] Borovikov V.P. Popular introduction to modern data analysis in the STATISTICA system. Moscow: Hotline – Telecom, 2013. 288 p (rus.)
[20] Egorova, Y.B., Skvortsova, S.V., Chibisova, E.V., Davydenko, L.V. Increasing the Stability of Mechanical Properties of Semifinished Products

from Ti–6Al–4V Alloys by Correcting the Alloying Range and Annealing Modes // Metallurgist, 2021, 65(7-8), p. 872–885.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и
А.А. Поповича.- СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.77.04

Л.Б. Аксенов[1], С.Н. Кункин[2], Н.М. Потапов[3]

ТОРЦЕВАЯ РАСКАТКА ТОНКОСТЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ФЛАНЦЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИКСИРОВАННОЙ И ПОДВИЖНОЙ МАТРИЦ

[1]Леонид Борисович Аксенов,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-9530, E-mail: l_axenov@mail.spbstu.ru.

[2]Сергей Николаевич Кункин,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-9530, E-mail: kunkin@spbstu.ru.

[3]Никита Михайлович Потапов
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 552-9530, E-mail: nicitanic@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается процесс холодной торцевой раскатки коническим валком фланцев из трубных заготовок. Определены возможные варианты протекания технологического процесса в зависимости от геометрических параметров заготовки. Выявлены и описаны возможные дефекты при формировании внутреннего фланца. На основе конечно-элементного моделировании в программном комплексе «Abaqus» проведено сравнение

формирования фланца при раскатке с использованием фиксированной и подвижной матриц. Определены технологические условия процесса и геометрические параметры заготовки, при которых возможно получение бездефектных деталей с внутренним фланцем.

Ключевые слова: торцевая раскатка, фланец, трубная заготовка, конический валок, моделирование, подвижная матрица

Введение

Положительной особенностью торцевой раскатки является локальное деформирование металла. В контакте с деформирующим инструментом, коническом роликом, последовательно находится только часть заготовки. Это позволяет значительно снизить контактные напряжения и усилие деформирования, но несколько увеличивает время обработки. Преимуществом процесса раскатки является также универсальность и, соответственно, низкая стоимость инструмента. Один и тот же раскатной валок может быть использован для изготовления разных деталей, что позволяет использовать технологию в мелкосерийном и штучном производстве.

В работе рассматривается холодная торцевая раскатка трубных заготовок для получения полых деталей типа внутренних фланцев и стаканов. Детали с внутренним фланцем составляют значительную часть номенклатуры осесимметричных деталей для различных отраслей промышленности. Уменьшение пластичности металла при холодном деформировании предъявляет высокие требования к анализу этих процессов [1-5]. Для утолщенных фланцев с незначительной шириной фланца (менее двух толщин стенки исходной заготовки) эффективна технология раскатки с осадкой выставленной части заготовки [6]. Особый интерес представляет получение деталей с более широким фланцем из тонкостенных заготовок, что требует поиска новых технологических решений. Анализ поведения металла в деформируемых заготовках при раскатке позволяет определить границы возможности использования разных технологических решений [7-8]. Современные достижения компьютерного моделирования делают его основным методом такого анализа.

Торцевая раскатка - многофакторный процесс со сложной кинематикой движения инструмента относительно заготовки. Выбор среды моделирования важная составляющая исследования, т.к. необходимо использовать программу, максимально отвечающую условиям технологического процесса. Моделирование процесса раскатки может быть осуществлено с применение разных расчетных комплексов, но наибольшее применение получил комплекс «Deform», создатели которого

предусмотрели возможность моделирования этого процесса и, в меньшей степени, «Abaqus», возможности которого в моделировании процесса раскатки потенциально высоки, но еще не полностью раскрыты [9-11].

Основную проблему формообразования фланцевых деталей представляет потеря устойчивости тонкостенной трубной заготовки в процессе раскатки, что ограничивает ширину получаемого фланца. Исследование этой проблемы позволяет производить детали без брака, а также дает возможность оценивать новые методы раскатки [12-14]. В данной работе представлено исследование потери устойчивости трубных заготовок при раскатке с фиксированной матрицей, а также возможности расширения технологических процесса раскатки путем применения подвижной матрицы.

Цель работы: на основе компьютерного моделирования определить виды возможного формоизменения заготовок при торцевой раскатке внутренних фланцев из тонкостенных трубных заготовок; построить область технологических и геометрических параметров, обеспечивающих протекание устойчивого процесса формообразования фланцевых деталей с применением фиксированной и подвижной матриц.

Метод исследования

Для анализа формоизменения тонкостенных трубных заготовок при изготовлении деталей типа внутренних фланцев были использованы два процесса торцевой раскатки. Схема одного из них с использованием фиксированной матрицы представлена на Рис. 1.

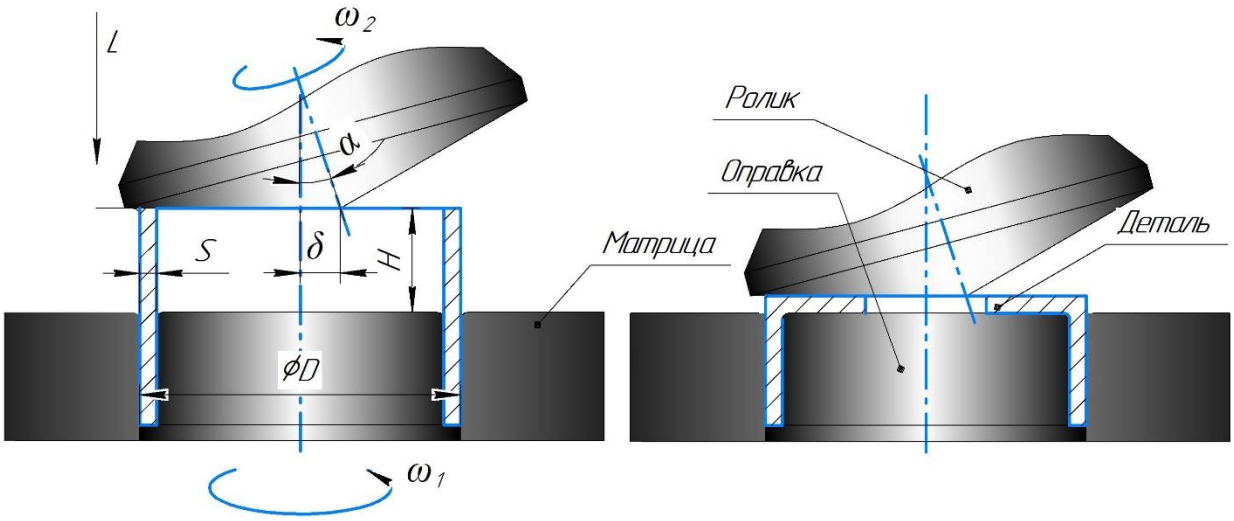


Рис. 1. Схема торцевой раскатки внутренних фланцев из тонкостенной трубной заготовки коническим роликом с фиксированной матрицей

Основные геометрические и технологические параметры, характеризующие этот процесс: D – наружный диаметр трубной заготовки; S – толщина стенки заготовки; H – высота выставленной части заготовки, определяющей ширину раскатываемого фланца; δ – смещение раскатного валка, используемого для изменения направления сил трения на контактной поверхности раскатного валка с заготовкой [15] ω_1 – угловая скорость вращения заготовки, определяемая приводом машины; ω_2 – угловая скорость вращения раскатного валка получающего движение от заготовки за счет сил трения на контактной поверхности; α – угол наклона раскатного валка; L – подача раскатного валка вдоль оси заготовки;

Для исследования формоизменения металла в процессе раскатки использовался программный комплекс Abaqus с решателем Explicit. Задавались следующие значения параметров процесса: L = 0,5 мм/оборот заготовки; δ = 0,2D; α = 10^0; коэффициент трения (закон Кулона) между раскатным валком и заготовкой μ=0,1; материал заготовки - сталь AISI 1045 (аналог стали 45, ГОСТ 1050-2013).

В результате моделирования процесса установлено, что при приведенных технологических параметрах раскатки в зависимости от геометрических параметров заготовки (Табл. 1) варианты ее формоизменения и наблюдаемые результаты могут существенно различаться.

Таблица 1

Геометрические параметры заготовки и результаты моделирования с указанием вида дефекта деформирования заготовки

	S, мм	D, мм	H, мм	h, мм	S/D	H/S	h/H	Дефекты
1	1	100	12	5	0,01	15	0,42	Нет
2	1	100	15	7,2	0,01	20	0,48	Замятие части фланца
3	2	100	15	3,5	0,02	10	0,23	Нет
4	2	100	20	9	0,02	15	0,45	Замятие части фланца
5	4	100	20	2	0,04	5	0,10	Нет
6	4	100	30	11	0,04	7,5	0,36	Замятие части фланца

Процесс деформирования заготовки характеризуется двумя областями пластической деформации, как в верхней части заготовки, так и вблизи торцевой поверхности матрицы, точное положение которых трудноопределимо. В этом отличие данного процесса от процесса отбортовки раскаткой, в котором очаг пластической деформации заготовки

четко локализуется у поверхности матрицы, а процесс отбортовки проходит монотонно и предсказуемо. На Рис. 2 представлено моделирование процесса раскатки (процесс №2, табл. 1), при котором формоизменение заготовки начинается с образования пластического загиба верхней части заготовки внутрь, а далее происходит закатывание фланца. В это же время из-за низкой жесткости трубной заготовки, обусловленной тонкой стенкой и достаточно большой высоте выставленной части (H), наблюдается потеря устойчивости заготовки. В результате образуется пластический очаг деформации вблизи торцевой поверхности матрицы, приводящий к увеличению внешнего диаметра заготовки. В конце процесса при разглаживании фланца формируется складка, и продолжается увеличение внешнего диаметра верхней части заготовки.

Представленный загиб заготовки является примером потери устойчивости заготовки и является неисправимым браком. Разглаживание толстой складки увеличивает усилие деформирования, так как процесс из раскатки тонкостенной трубной заготовки с малой площадью зоны контакта, переходит в процесс раскатки толстостенной заготовки, где пятно контакта возрастает в несколько раз. Возникновение потери устойчивости зависит от высоты выставленной части заготовки.

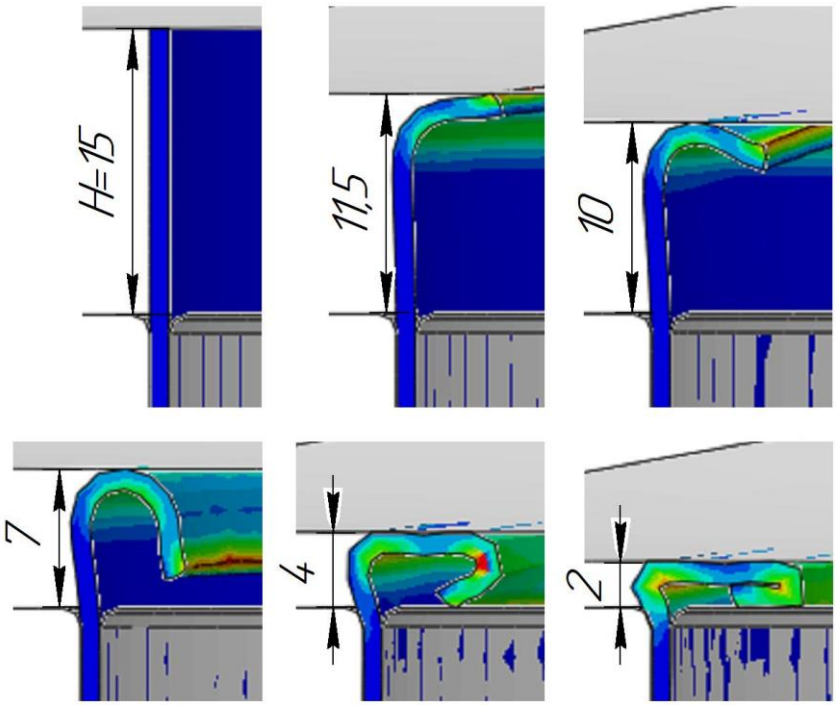


Рис. 2. Раскатка внутреннего фланца с использование зафиксированной матрицы при S/D=0.01, H/S=15 (табл. 1, процесс №2.)

По результатам моделирования (Табл.1) построена диаграмма (Рис. 3) с зонами формоизменения при раскатке внутреннего фланца, отражающими

зависимость относительной высоты выставленной части заготовки (ширину раскатываемого фланца) от относительной толщины заготовки.

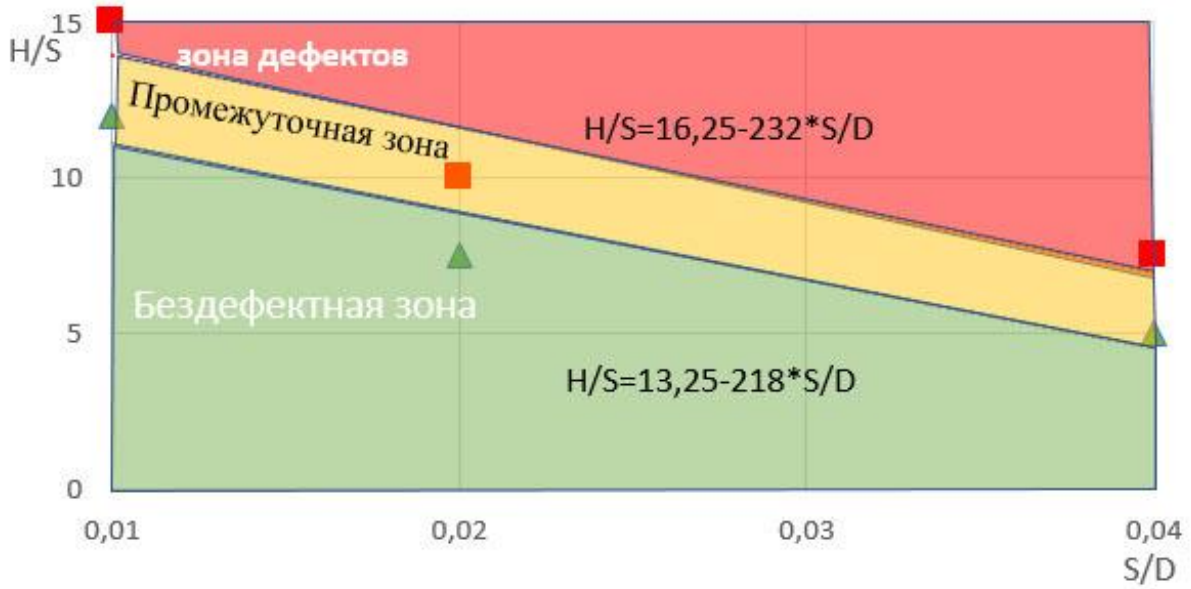


Рис. 3. Влияние геометрических параметров трубной заготовки на возможность получения фланцевых деталей с использованием фиксированной матрицы

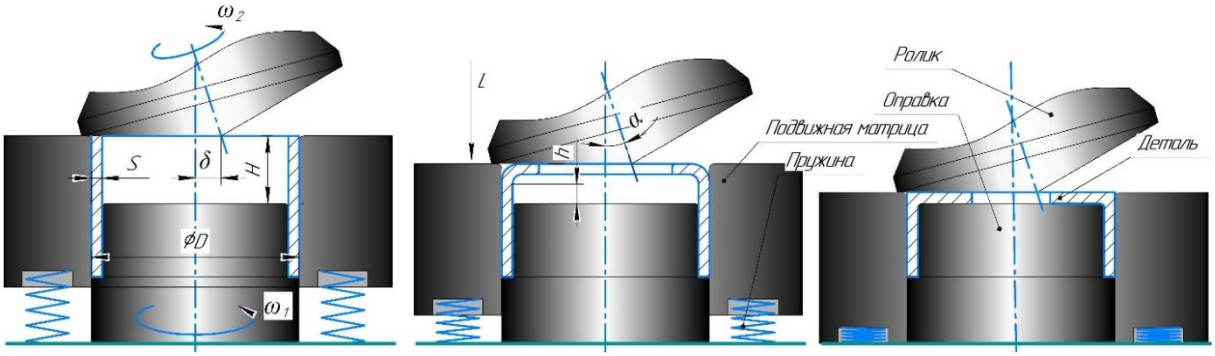
На диаграмме можно выделить три зоны: первая зона – бездефектная зона после раскатки с разглаживанием. Вторая промежуточная зона, где сложно предсказать наличие дефектов. Третья зона – зона возникновения дефектов, где после разглаживания образуются складка или замятие металла.

Таким образом, получение бездефектного внутреннего фланца по рассмотренной схеме процесса ограничено уравнением: H/S = 16,25 -232 S/D. Для преодоления этих границ и увеличения ширины фланца можно использовать метод раскатки с изменяемым углом наклона ролика описанный в [16], что технически довольно сложно, или применить достаточно простую конструкцию инструмента с подвижной матрицей.

Процесс торцевой раскатки с подвижной матрицей (Рис. 4) имеет отличие от рассмотренного процесса в том, что матрица в начальный момент раскатки поднята на высоту выставленной части заготовки (H) и упирается в раскатной валок. Матрица подпружинена снизу и раскатной валок постепенно сдвигает матрицу вниз по мере деформирования заготовки.

Использование подвижной матрицы исключает увеличение внешнего диаметра заготовки при раскатке, а также выход фланца за внешний диаметр при разглаживании фланца на финальной стадии процесса. В результате появляется возможность получить прямой угол (кромку) на наружном диаметре фланца вместо внешнего радиуса скругления. Геометрические параметры в абсолютном и относительном виде, использованные для

моделирования процесса раскатки внутреннего фланца с подвижной матрицей представлены в таблице 2.



а. б. в.

Рис. 4. Технологический процесс раскатки тонкостенных трубных заготовок с использованием подвижной матрицы: а – начальная стадия; б – пластический изгиб заготовки; в – конечная стадия (разглаживание фланца); h – высота расположения места пластического изгиба заготовки над плоскостью матрицы

Таблица 2

Геометрические параметры заготовки и результаты моделирования с указанием наблюдаемого вида деформирования заготовки при раскатке с подвижной матрицей

	S, мм	D, мм	H, мм	h, мм	S/D	H/S	h/H	Дефекты
1	1	100	15	11	0,01	15	0,70	нет
2	1	100	20	16	0,01	20	0,80	Замятие части фланца
3	2	100	20	15	0,02	10	0,75	Нет
4	2	100	22	16	0,02	11	0,73	Нет
5	2	100	30	24	0,02	15	0,80	Замятие части фланца
6	4	100	20	10	0,04	5	0,50	Нет
7	4	100	30	20	0,04	7,5	0,66	нет
8	4	100	32	22	0,04	5	0,69	Нет
9	4	100	40	30	0,04	10	0,75	Замятие части фланца
10	4	100	50	40	0,04	12,5	0,80	Замятие части фланца

В результате моделирования были зафиксированы три возможных варианта формоизменения трубной заготовки. Первый вариант, это раскатка с формированием внутреннего фланца с удалением от поверхности матрицы и его дальнейшее разглаживание на плоскости матрицы без образования дефектов (Рис. 5). Данное формоизменение позволяет получить фланец значительной ширины. Пластический изгиб трубной заготовки происходит на высоте h=8 мм от поверхности матрицы. До полного формирования полки фланца эта высота не меняется. То есть в начальной стадии процесса деформируется только верхняя часть заготовки. При дальнейшем развитии процесса область пластической деформации приближается к торцевой поверхности матрицы.

Второй наблюдаемый вариант формоизменения — это раскатка заготовки с небольшой выставленной частью, что позволяет получать неширокие фланцы. Такой вариант процесса является самым стабильным, так как деформация происходит по всей выставленной части с самого начала и формирование складки невозможно. Этот вариант близок к процессу раскатки отбортовкой.

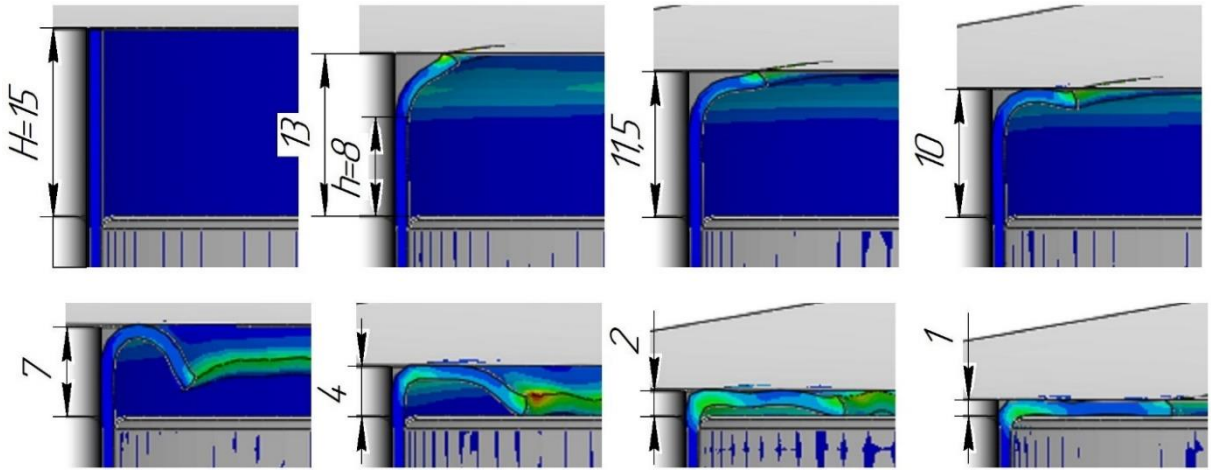


Рис. 5. Раскатка внутреннего фланца с применением подвижной матрицы: S/D=0.01, H/S=15 (табл. 2, процесс № 1)

Третий вариант формоизменения проявляется на заготовках с относительно большой выставленной частью заготовки (Рис. 6). При увеличении высоты выставленной части заготовки (H/S) увеличивается вероятность закручивания внутренней кромки фланца под действием сильных сжимающих тангенциальных напряжений. При дальнейшем развитии процесса образуется складка не позволяющая получить годный фланец.

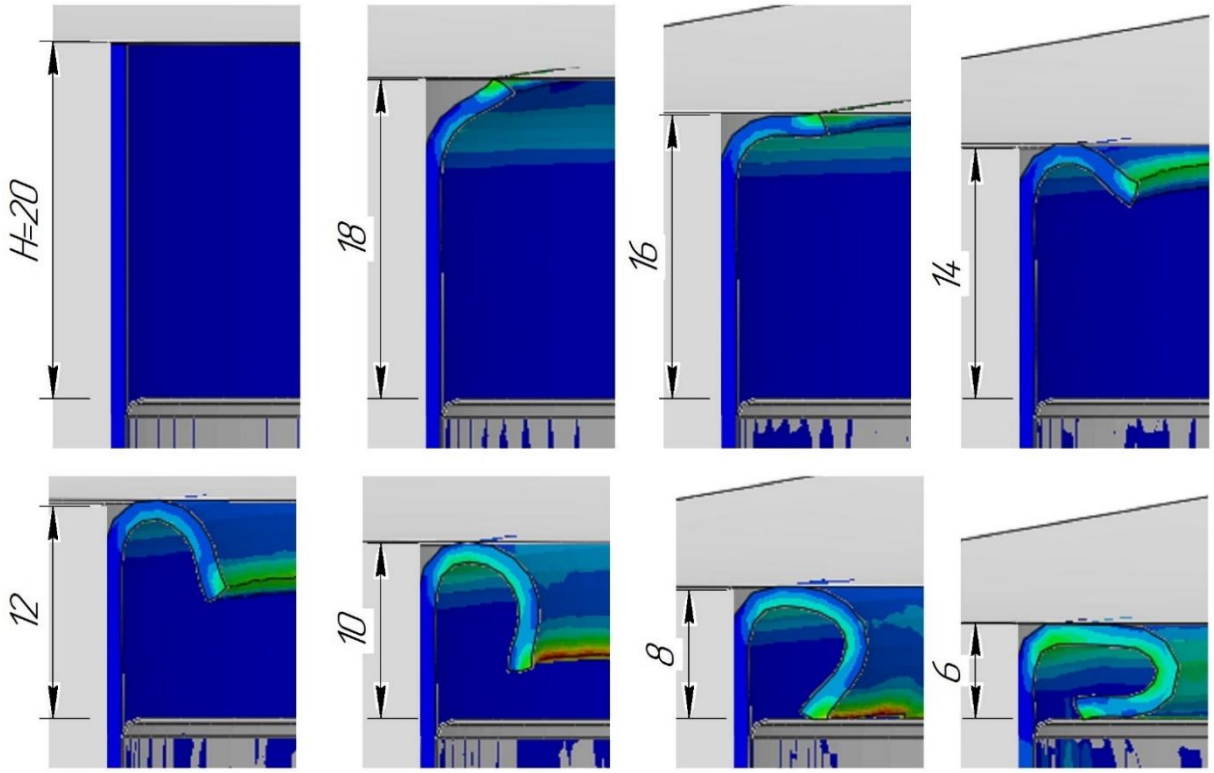


Рис. 6. Раскатка внутреннего фланца с использованием подвижной матрицы: S/D=0.01, H/S=20; (табл. 2, процесс № 2)

С увеличением толщины заготовки и, соответственно, отношения S/D формоизменение меняет вид, что приводит к четвертому варианту формоизменения (Рис. 7).

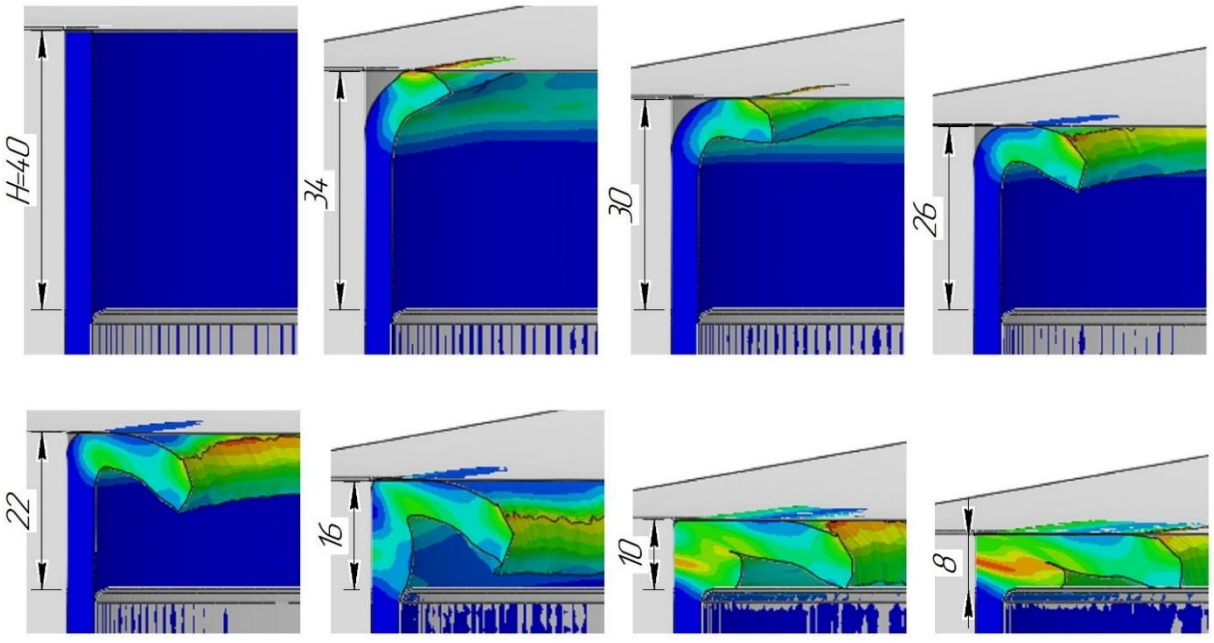


Рис. 7. Раскатка внутреннего фланца S/D=0.04, H/S=10 (табл. 2, процесс № 9)

Начальный момент раскатки проходит как в третьем варианте: образуется пластический изгиб заготовки в верхней ее части. При последующей деформации стенка слабо перетекает во фланец из-за большой толщины, и начинает осаживаться. Происходит утолщение стенки заготовки, а при разглаживании фланца образуется замятие, приводящее к браку.

По полученным данным моделирования раскатки с фиксированной матрицей (Табл. 1) и с подвижной матрицей (Табл. 2) построена диаграмма (Рис. 8), иллюстрирующая преимущества использования подвижной матрицы для расширения технологических возможностей процесса раскатки.

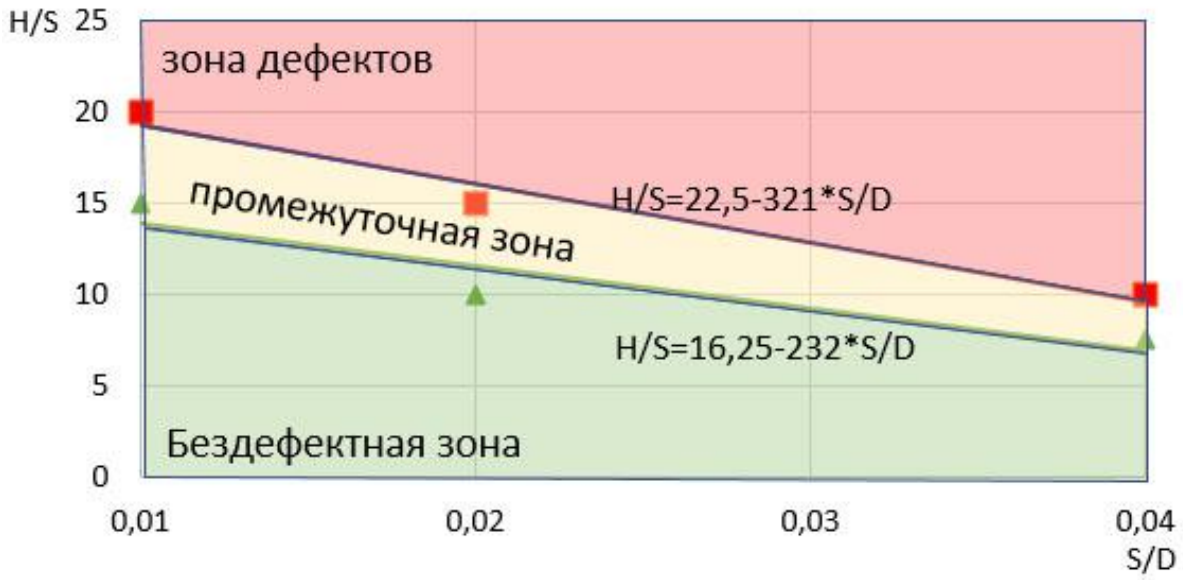


Рис. 8. Влияние использования подвижной матрицы на расширение технологических возможностей процесса раскатки фланцевых деталей

На диаграмме также можно выделить три зоны: первая зона – бездефектная зона раскатки с разглаживанием фланца. Вторая зона – промежуточная зона, где сложно достоверно предсказать наличие или отсутствие дефектов формообразования. Третья зона – зона возникновения дефектов, где образуется складка или замятие металла. Таким образом, получение внутреннего фланца по схеме раскатки с подвижной матрицей ограничено уравнением: H/S = 16, 25 -232 S/D. Из диаграммы следует, что использование этого метода раскатки позволяет увеличить ширину раскатываемых фланцев до 15% по сравнению с использованием неподвижной матрицы. Кроме того, использование подвижной матрицы повышает качество раскатываемых фланцев: сохраняет цилиндричность заготовки, а также способствует формированию меньшего радиуса перехода между фланцем и цилиндрической частью заготовки.

Выводы

- Формоизменение тонкостенной трубной заготовки при процессе раскатки внутреннего фланца имеет четыре характерных варианта. При двух из них процесс протекает стабильно и образуется бездефектный фланец, а при двух других заготовка теряет устойчивость, что приводит к образованию неисправимых дефектов в виде складок и замятий.
- Процесс торцевой раскатки внутренних фланцев из трубной заготовки при использовании неподвижной матрицы устойчив в диапазоне технологических параметров $H/S \leq 16{,}25\text{-}232S/D$, при отношении S/D от 0,01 до 0,04. При этом ширина фланца может превышать толщину стенки исходной заготовки в 8-14 раз в зависимости от отношения толщины стенки трубной заготовки к диаметру заготовки.
- Использование подвижной матрицы при раскатке тонкостенных трубных заготовках позволяет повысить точность формы и увеличить ширину фланцевой части до15% по сравнению с процессом с неподвижной матрицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 8-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича.- СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. с. 674-684.

[2] Аксенов Л.Б., Кункин С.Н., Елкин Н.М. Торцевая раскатка фланцевых деталей трубных соединений. Металлообработка. №3 (63), 2011 г., с. 31-36

[3] S.V. Hosseini, M.J. Nategh, M.M. Agheti, H. Imani. Optimum design of rotary forging machine with parallel mechanism. Modern Mechanical Engineering, Proceeding of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No.13, pp.486-490, 2015 (in Persian).

[4] Muhammad M. Hamdy. Rotary Hammer Forging, a New Manufacturing Process. Applied Mechanics and Materials, 2014, Vols. 446-447, pp. 1321-1329, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1321

[5] P.Standring, J.R.Moon, E.Appleton. Plastic deformation produced during indentation phase of rotary forging. Metals Technology. April 1980, 7(1):159-166. DOI:10.1179/030716980803286784

[6] Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials , 2019, Vol. 31, pp.16-21.

[7] Paranjayee Mandal, H.Lalvani, Kyle Watt, Alastair P Conway. A Study on Microstructural Evolution in Cold Rotary Forged Nickel-Superalloys: C263 and Inconel 718. Procedia Manufacturing. Volume 47, 2020, pp. 1403-1409. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.296
[8] Paranjayee Mandal, H. Lalvani, M. Tuffs. Cold Rotary Forging of Inconel 718. Journal of Manufacturing Processes, 2019, pp.77-99. DOI:10.1016/j.jmapro.2019.08.015
[9] Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. Materials and Design, No.32, 2011, pp.1376-1389
[10] Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., &Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. Computer Methods in Materials Science, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.
[11] Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method.Int J AdvManufTechnol (2012) 62:1087–1106.
[12] S. Peacock, J.R. Moon. Fatigue crack growth in some PM low alloy steels consolidated by rotary forging and sintering. 2000. Powder Metallurgy. DOI:10.1179/003258900666069
[13] I.Montoya M.T. Santos, I.Perez, B. Gonzalez. Kinematic and sensitivity analysis of rotary forging process by means of a simulation model. April (2008), International Journal of Material Forming 1(S1):383-386. DOI:10.1007/s12289-008-0075-3
[14] Marcos Perez. Analysis of Innovative Incremental Cold Forming Process for the Manufacturing of Aerospace Rotating Parts June 2017. Conference: 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2017) At: Los Angeles Volume: Proceedings of the ASME 2017 Project: Fast - Make (Rotary forging). DOI:10.1115/MSEC2017-2774
[15] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Metal flow control at processes of cold axial rotary forging. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, 2016, pp.175-181.
[16] С.Н. Кункин, Л.Б. Аксенов, Н.М. Потапов Торцевая раскатка внутренних фланцев на тонкостенных трубных заготовках. Современное машиностроение: Наука и образование : материалы 8-й Международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019.

L. B. Aksenov, S. N. Kunkin, N. M. Potapov

AXIAL ROTARY FORGING OF THE THIN WALL INNER FLANGES WITH FIXED AND A MOVABLE DIES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article discusses the process of cold axial rotary forging of tube blanks with a conical roller. The process of forming the inner flange is analyzed. During the analysis, possible variants of the technological process depending on the geometric parameters of the workpiece were determined. Possible defects in the formation of the inner flange have been identified and described. A comparison is made in the formation of the flange during rotary forging using a fixed and movable dies. The research method was based on finite element computer modeling in the “Abaqus” software package. It made possible to determine the technological parameters of the process and the geometric dimensions of the workpiece, at which it is possible to obtain defect-free parts with an internal flange.

Keywords: rotary forging, internal flange, tube blank, conical roller, simulation, movable die

REFERENCES

[1] Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: materialy 8-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii / Pod red. A.N.Evgrafova i A.A. Popovicha.- SPb.: POLITEKh-PRESS, 2019. s. 674-684.

[2] Aksenov L.B., Kunkin S.N., Elkin N.M. Tortsevaya raskatka flantsevykh detalej trubnykh soedinenij. Metalloobrabotka. #3 (63), 2011, s. 31-36.

[3] S.V. Hosseini, M.J. Nategh, M.M. Agheti, H. Imani. Optimum design of rotary forging machine with parallel mechanism. Modern Mechanical Engineering, Proceeding of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No.13, pp.486-490, 2015 (in Persian).

[4] Muhammad M. Hamdy. Rotary Hammer Forging, a New Manufacturing Process. Applied Mechanics and Materials, 2014, Vols. 446-447, pp. 1321-1329, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1321

[5] P.Standring, J.R.Moon, E.Appleton. Plastic deformation produced during indentation phase of rotary forging. Metals Technology. April 1980, 7(1):159-166. DOI:10.1179/030716980803286784

[6] Rashid Asfandiyarov, Georgy I. Raab, Denis Aksenov. Analysis of the Stress-Strained State of Billets Processed by Rotary Forging with Special Shape of the Tool. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials , 2019, Vol. 31, pp.16-21.
[7] Paranjayee Mandal, H.Lalvani, Kyle Watt, Alastair P Conway. A Study on Microstructural Evolution in Cold Rotary Forged Nickel-Superalloys: C263 and Inconel 718. Procedia Manufacturing. Volume 47, 2020, pp. 1403-1409. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.296
[8] Paranjayee Mandal, H. Lalvani, M. Tuffs. Cold Rotary Forging of Inconel 718. Journal of Manufacturing Processes, 2019, pp.77-99. DOI:10.1016/j.jmapro.2019.08.015
[9] Deng X.B., Hua L., Han X.H. Numerical and experimental investigation of cold rotary forging of a 20CrMnTi alloy spur bevel gear. Materials and Design, No.32, 2011, pp.1376-1389
[10] Krishnamurthy, B., Bylya, O., Muir, L., Conway, A., &Blackwell. On the specifics of modeling of rotary forging processes. Computer Methods in Materials Science, (2017). Vol. 17(1), pp.22-29.
[11] Xinghui Han, Lin Hua. Investigation on contact parameters in cold rotary forging using a 3D FE method.Int J AdvManufTechnol (2012) 62:1087–1106.
[12] S. Peacock, J.R. Moon. Fatigue crack growth in some PM low alloy steels consolidated by rotary forging and sintering. 2000. Powder Metallurgy. DOI:10.1179/003258900666069
[13] I.Montoya M.T. Santos, I.Perez, B. Gonzalez. Kinematic and sensitivity analysis of rotary forging process by means of a simulation model. April (2008), International Journal of Material Forming 1(S1):383-386. DOI:10.1007/s12289-008-0075-3
[14] Marcos Perez. Analysis of Innovative Incremental Cold Forming Process for the Manufacturing of Aerospace Rotating Parts June 2017. Conference: 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2017) At: Los Angeles Volume: Proceedings of the ASME 2017 Project: Fast - Make (Rotary forging). DOI:10.1115/MSEC2017-2774
[15] Aksenov L.B., Kunkin S.N. Metal flow control at processes of cold axial rotary forging. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, 2016, pp.175-181.
[16] Kunkin S.N. Aksenov L.B., Potapov N.M. Axial rotary forging of inner flanges at tube blanks. Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: materialy 8-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii / Pod red. A.N.Evgrafova i A.A. Popovicha.- SPb.: POLITEKH-PRESS, 2019.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 62-229.38

Х. Арслан[1], М.Т. Коротких[2]

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЗАЖИМНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

[1]Хазем Арслан,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (904)331-2942, E-mail: hazemarslan92@gmail.com

[2]Михаил Тимофеевич Коротких,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (951)653-2871, E-mail: kmt46@mail.ru

Аннотация

Статья посвящена определению характеристик термомеханических зажимных элементов с использованием материалов из сплава с памятью формы (СПФ).

Рассматривается вопрос реализации алгоритма оптимизации конструкции зажимных элементов с минимальными габаритами. Рассмотрено несколько примеров, иллюстрирующих предлагаемый метод оптимизации. Эти зажимные элементы могут быть использованы в различных станочных приспособлениях, требующих небольшого объема с высокой силой закрепления заготовок.

Результаты оптимизации показали, что такие приводы могут иметь минимальные габариты при высоких силовых усилиях, что позволяет их эффективно использовать в станочных приспособлениях.

Ключевые слова: оптимизация, метод перебора, зажимное устройство, электромеханический привод, память формы, станочные приспособления.

Введение

Целью исследования является оптимизация конструктивных параметров зажимных устройств для станочных приспособлений, при условии задания усилия закрепления и перемещения зажимного элемента.

Задачи исследования состоят в создании методики оптимизации массогабаритных характеристик силовых приводов с применением металлов с памятью формы.

В настоящее время в автоматизации машиностроительных производств на основе применения станков с ЧПУ определенной проблемой является автоматизация закрепления и снятия заготовок на станках.

Приводы, работающие с гидравлическими, пневматическими и механическими системами в станочных приспособлениях, могут быть заменены приводом для закрепления заготовок с приводами из СПФ из-за их небольших габаритов и достаточного усилия. Эти устройства легко автоматизируются, так как могут управляться только электрическими сигналами и не требуют пневматических и гидравлических сетей. Кроме того, они проще, с меньшим количеством деталей и, как правило, просты в обслуживании и проверке [1-4].

В данный момент существует большая группа силовых устройств, использующих СПФ в качестве электромеханических отличающихся по принципу действия, размерам устройства и способу крепления элементов с памятью формы [5-11].

Генетические алгоритмы широко используются при решении задач оптимизации, одна из сильнейших эвристик, основанная на принципе естественного отбора, широко используются при решении оптимизационных задач. Генетический алгоритм может применяться для решения многих оптимизационных задач, которые плохо подходят для стандартных алгоритмов оптимизации, особенно в случаях, когда целевая функция не является непрерывной, не дифференцируемой, стохастической или существенно нелинейной, т.е. значение ее производной в некоторых точках не определяется. Существенным недостатком генетических алгоритмов можно считать сложность их адаптации к решаемой задаче [12].

Значительно большей универсальностью обладают алгоритмы перебора, но до последнего времени их широкому использованию мешала их высокая вычислительная сложность. Появление многоядерных процессоров и ускорителей позволяет снизить остроту этой проблемы и расширить область применения алгоритмов перебора [12-14].

В данной статье рассматривается алгоритм оптимизации электромеханических приводов на основе материала с памятью формы с применением метода перебора.

Методика исследования

Метод перебора считается самым простым методом в оптимизации по сравнению с другими методами. Для нахождения максимальных или минимальных значений можно использовать любой язык программирования [15, 16].

Предлагаемый привод зажимного элемента [17] состоит из упругого элемента, например, пружины сжатия 1 с расположенными вдоль ее оси проволочными элементами 2 из СПФ, которые расположены по периферии пружины и представляют из себя единую проволоку, многократно проходящую через вырезы изолирующих прокладок 3, например, (капролон), расположенных на торцах пружины сжатия. Концы проволоки из нитинола подсоединены к клеммам 4, к которым можно подключить источник питания для нагрева проволоки из СПФ (рис. 1, a).

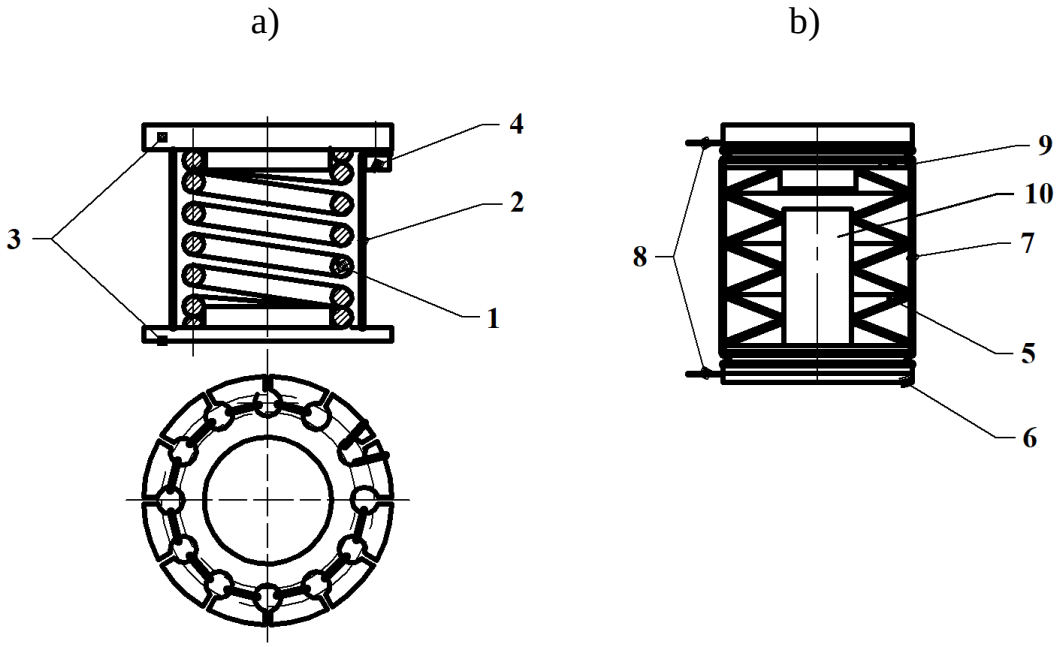


Рис. 1. Конструкция зажимных устройств: a) зажимной элемент с винтовой пружиной сжатия, b) зажимной элемент с тарельчатыми пружинами:
1 – пружина сжатия, 2 – проволоки из СПФ (нитинол), 3 – фланцы из изоляционного материала (капролон), 4 – клеммы для подвода электрического тока, 5 – тарельчатые пружины, 6 – изолирующие торцевые накладки, 7 – оболочка из фольги из СПФ, 8 – ламели для подвода электрического тока, 9 – металлические торцовые накладки, к которым приварена оболочка, 10 – направляющая ось

Вместо винтовой пружины можно использовать набор тарельчатых пружин (рис. 1, b). Такие элементы из СПФ могут испытывать обращаемую квазипластическую деформацию до 5%, которая возвращается при нагреве элементов выше критической температуры. Предварительно сжатая пружина, с установленными элементами из СПФ растягивает их до предельной пластической деформации, а при нагреве элементов, например, пропусканием электрического тока, сжимает их, сжимая пружину. Таким образом созданный упругий элемент может укорачиваться при кратковременном нагреве элементов из СПФ.

Ниже на рис. 2 показана последовательность создания и работы такого упругого зажимного устройства.

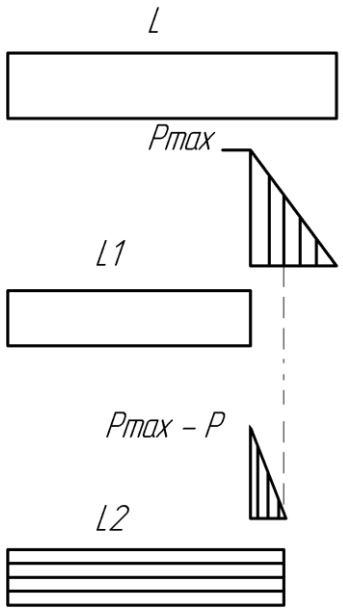


Рис. 2. Последовательность создания и работы зажимного элемента

Для расчета конструктивных параметров предлагаемых зажимных устройств необходимо исходить из их назначения. Для использования такого привода в приспособлениях рационально иметь максимально возможное усилие, развиваемое при минимальных размерах элемента. При этом ход пружины при зажиме и освобождении фиксируемого объекта может быть не большим и зависеть от колебаний размеров заготовок и достаточного зазора для удобства извлечения.

Была предложена последовательность определения конструктивных параметров такого зажимного элемента (алгоритм), на рис. 3 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма, позволяющего оптимизировать конструкцию.

С целью определения минимальных габаритов зажимных устройств была создана программа в MATLAB.

Рис. 3. Блок-схема перебора алгоритма

Методика оптимизации реализуется в следующей последовательности:

Для винтовых пружин сжатия:

1. Задаются рабочий ход b и сила закрепления $P_{зак}$.

Тогда неопределенными являются параметры d, D, n и L_0 при ограничениях L_1.

где d – диаметр проволоки пружины, D – средний диаметр пружины, n – количество рабочих витков пружины, L_0 – длина пружины в свободном состоянии.

2. Исходя из этого, можно рассчитать длину элемента в загруженном состоянии L_1:

$$L_1 = \frac{2.b}{0{,}05} \quad (1)$$

3. Определяется жесткость винтовой пружины сжатия K по формуле:

$$K = \frac{G.d^4}{8.D^3.n} \quad (2)$$

где G – модуль упругости материала пружины.

4. Задается максимальное усилие сжатия пружины до соприкосновения витков P_{max}:

$$P_{\max} = K(L_0 - L_1) \quad (3)$$

5. Тогда сила закрепления будет P_z:

$$P_z = \frac{P_{max}}{2} \quad (4)$$

Из этой формулы (4) по сравнению с исходными данными выбираем силу закрепления, попадающую в заданное поле по формуле:

$$P_Z \in [P_{зак}, P_{зак} + 10] \quad (5)$$

С небольшой погрешностью конечного расчетного значения после процесса моделирования, которым можно пренебречь.

6. Напряжение материала пружины при кручении при заданной нагрузке согласно по ГОСТ 9389-75 считается по формуле:

$$\tau = \left(\frac{8.P_z.D.K_w}{\pi.d^3}\right) \leq [\tau] \quad (6)$$

где K_w – коэффициент, связанный с геометрическими параметрами пружины, [τ] – допускаемое касательное напряжение.

7. Определяется площадь поперечного сечения проволоки из СПФ, обеспечивающую сжатие пружины при фазовом переходе:

$$S = \frac{P_{5\%}}{\sigma_T} \quad (7)$$

где σ_T – предел квазитекучести нитинола. Учитывая, что предельное удлинение элементов из памяти формы не может превышать 5%, можно определить допустимую силу растяжения элементов по формуле:

$$P_{5\%} = P_{max}\left(1 - \frac{0{,}05.L_1}{L_0 - L_1}\right) \quad (8)$$

8. Учитывая необходимость получения минимально возможных габаритов пружины, определяем объем пружины, диаметр проволоки и длина пружины с минимальными габаритами:

$$V = \left(\frac{\pi.d^2}{4}\right).L_0 \quad (9)$$

Для тарельчатых пружин:

Определено, что расчетная осадка пружины ее должна превышать $0{,}8s_3$.

1. Длину элемента в загруженном состоянии L_1 определяем по формуле (1). Тогда неопределенными являются параметры D_1, D_2, t, s_3 и n при ограничениях L_1. Задается максимальное усилие пружины P_{max}:

$$P_{max} = \frac{4.E.0{,}8.s_3.t^3}{(1-\nu^2).Y.D_1^2} \quad (10)$$

где E – модуль упругости тарельчатых пружин, s_3 – максимальная деформация, t – толщина пружины, ν – коэффициент Пуассона, Y – коэффициент, D_1 – наружный диаметр пружины. Определяется коэффициент Y по формуле:

$$Y = \frac{1}{\pi}.\frac{6}{\ln(A)}.\left(\frac{A-1}{A}\right)^2 \quad (11)$$

Коэффициент A рассчитается по формуле (12):

$$A = \frac{D_1}{D_2} \quad (12)$$

где D_1 – наружный диаметр пружины, D_2 – внутренний диаметр пружины.

2. Приведенные напряжения при последовательном наборе пружин при максимальной деформации согласно по ГОСТ 3057-90 рассчитывают по формуле:

$$\sigma = \left(\left(\frac{E.s}{(1-\nu^2).2n}\right).K_1.D_2^2\right).\left(K_2.\left(s_3 - \frac{s}{4n}\right) + K_3.t\right) \leq [\sigma_I] \quad (13)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, зависящие от отношения наружного и внутреннего диаметра тарельчатой пружины, $[\sigma_I]$ – допустимые напряжения при максимальной деформации.

3. Можно определить допустимую силу растяжения элементов из СПФ при предельном удлинении 5%:

$$P_{5\%} = P_{max}\left(1 - \frac{0{,}05.(t + 0{,}2.s_3)}{l_0 - (t + 0{,}2.s_3)}\right) \quad (14)$$

4. Учитывая необходимость получения минимально возможных габаритов пружины, определяется объем пружины, диаметр и длина пружины с минимальными габаритами:

$$V = \left(\frac{\pi.D_1^2}{4}\right).(l_0.n) \quad (15)$$

где l_0 – высота одной пружины, n – количество тарельчатых пружин.

Результаты

В соответствии с представленной методикой оптимизации были рассчитаны примеры конструктивных параметров зажимных элементов с применением СПФ с рабочим ходом 2 [мм] и усилие закрепления 1000 [Н], 2000 [Н], 3000 [Н] (см. табл. 1 и 2) для винтовых пружин и тарельчатых пружин.

Таблица 1. Характеристики зажимных элементов с применением винтовых пружин на основе СПФ

Вариант	b, [мм]	$P_{зак}$, [Н]	d, [мм]	D, [мм]	L_0, [мм]	n	V, [мм^3]	P_Z, [Н]	S, [мм^2]
1	2	1000	5,8	30	142	12,5	$1{,}4.10^5$	1001	9,54
2	2	2000	7,2	35	148	10	$2{,}1.10^5$	2005	19,68
3	2	3000	8,6	40	139	8	$2{,}6.10^5$	3003	28,82

где b – рабочий ход, $P_{зак}$ – сила закрепления заготовка, d – диаметр проволоки пружины, D – средний диаметр пружины, L_0 – длина пружины в

свободном состоянии, n – количество рабочих витков пружины, V – объем винтовой пружины, P_Z – фактическое усилие зажима, S – площадь поперечного сечения проволоки из СПФ.

Таблица 2. Характеристики зажимных элементов с применением тарельчатых пружин на основе СПФ

Вариант	b, [мм]	$P_{зак}$, [Н]	D_1, [мм]	D_2, [мм]	t, [мм]	S_3, [мм]	l_0, [мм]	n	V, [$мм^3$]	P_Z, [Н]	S, [$мм^2$]
1	2	1000	37,5	12,5	1	3	4	50	$2{,}2.10^5$	1008	9,8
2	2	2000	33,5	12,5	1,5	1,4	2,9	45	$1{,}1.10^5$	2009	19,48
3	2	3000	37,5	15	1,8	1,5	3,3	39	$1{,}4.10^5$	3002	27,4

где D_1 – наружный диаметр пружины, D_2 – внутренний диаметр пружины, s_3 – максимальная деформация пружины, l_0 – высота одной тарельчатой пружины, n – количество тарельчатых пружин, V – объем тарельчатых пружин.

Обсуждение

Как показано в вышеприведенных расчетах, размеры зажимных устройств с элементом из тарельчатых пружин меньше, чем у размеров винтовых пружин при тех же прижимных усилиях. Поэтому оптимизация позволяет сделать вывод о возможности уменьшения размеров элементов с большими усилиями за счет применения тарельчатых пружин. Уменьшение же габаритов зажимных элементов существенно расширяет их область применения в станочных приспособлениях.

Заключение

В статье предложена методика определения оптимальных, минимально возможных конструктивных параметров зажимных пружинных элементов станочных приспособлений с применением сплавов с памятью формы.

Программа оптимизации, работающая методом последовательного перебора вариантов в среде MATLAB, позволяет находить оптимальные параметры зажимных элементов как с винтовыми, так и тарельчатыми пружинами.

Предложенные зажимные элементы позволяют их дальнейшую конструктивную модернизацию, позволяющую дальнейшее сокращение их массогабаритных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials and Design, 2014, 56, pp. 1078–1113.

[2] Ma, J., Karaman, I., Noebe, R.D. High temperature shape memory alloys. International Materials Reviews, 2010, 55 (5), pp. 257–315.

[3] Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. Sensor Actuator Phys., 2010, 158 (1), pp. 149–160.

[4] Hirose, S., Ikuta, K., Umetani, Y. Development of shape-memory alloy actuators. Performance assessment and introduction of a new composing approach, Adv. Robot., 1988, 3 (1), pp. 3–16.

[5] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28 (13), pp. 1699–1718.

[6] Elwaleed, A.K., Mohamed, N.A., Nor. M.J.M., Mustafa, M.M. A new concept of a linear smart actuator. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135 (1), pp. 244–249.

[7] Pittaccio, S., Viscuso, S., Rossini, M., Magoni, L., Pirovano, S., Villa, E., Besseghini, S., Molteni, F. SHADE: A shape-memory-activated device promoting ankle dorsiflexion. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18 (5), pp. 824–830.

[8] Mosley, M.J., Mavroidis, C., Pfeiffer, C. Design and dynamics of a shape memory alloy wire bundle actuator. ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2000, pp. 1–14.

[9] Donnellan, Q.A. Design and testing of linear shape memory alloy actuator. National Science Foundation – Research Experience for Undergraduates, 2005, pp. 1-6.

[10] Liang, C., Rogers, C.A., Design of Shape Memory Alloy Actuators. Journal of Mechanical Design, 1992, 114, pp. 223–230.

[11] Глущенков В.А., Алехина В.К. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. С. 483-488.

[12] Тайк А.М., Лупин С.А., Вагапов Ю.Ф. Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей. International Journal of Open Information Technologies. 2016. № 4 (9). С. 80-86.
[13] Стенников В.А., Чемезов А.А. Применение алгоритма перебора деревьев и метода имитации отжига для схемно-структурной оптимизации тепловых сетей. Программные продукты и системы. 2018. № 2 (31). С. 23-27.
[14] Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. Издательство «МИР». Москва. 1975. 536 с.
[15] Колоколов А.А., Ягофарова Д.И., Тюрюмов А.Н. Разработка алгоритмов для задачи выполнимости и некоторых ее обобщений с использованием перебора 1-классов. Омский научный вестник. 2006. С. 57-61.
[16] Mohammad, A., Saleh, O., Abdeen, R.A. Occurrences Algorithm for String Searching Based on Brute-force Algorithm. Journal of Computer Science, 2006, 2 (1), pp. 82–85.
[17] Arslan, H., Korotkih, M.T. Electromechanical clamping device using shape memory materials. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 150-158.

H. Arslan, M.T. Korotkikh

OPTIMIZATION METHOD FOR CLAMPING DEVICES BASED ON SHAPE MEMORY MATERIALS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to characterization of thermomechanical clamping elements using shape memory alloy (SMA) materials.

The issue of implementing an optimization algorithm for the design of clamping elements with minimum dimensions is considered. Several examples illustrating the proposed optimization method are considered. These clamping elements can be used in a variety of machine tools that require a small volume with a high workpiece clamping force.

The optimization results showed that such drives can have minimal dimensions with high force, which allows them to be effectively used in machine tools.

Key words: optimization, brute-force method, clamping device, electromechanical drive, shape memory, machine tools.

REFERENCES

[1] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials and Design, 2014, 56, pp. 1078–1113.

[2] Ma, J., Karaman, I., Noebe, R.D. High temperature shape memory alloys. International Materials Reviews, 2010, 55 (5), pp. 257–315.

[3] Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: a review on shape memory alloy mini-actuators. Sensor Actuator Phys., 2010, 158 (1), pp. 149–160.

[4] Hirose, S., Ikuta, K., Umetani, Y. Development of shape-memory alloy actuators. Performance assessment and introduction of a new composing approach, Adv. Robot., 1988, 3 (1), pp. 3–16.

[5] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28 (13), pp. 1699–1718.

[6] Elwaleed, A.K., Mohamed, N.A., Nor. M.J.M., Mustafa, M.M. A new concept of a linear smart actuator. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135 (1), pp. 244–249.

[7] Pittaccio, S., Viscuso, S., Rossini, M., Magoni, L., Pirovano, S., Villa, E., Besseghini, S., Molteni, F. SHADE: A shape-memory-activated device promoting ankle dorsiflexion. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18 (5), pp. 824–830.

[8] Mosley, M.J., Mavroidis, C., Pfeiffer, C. Design and dynamics of a shape memory alloy wire bundle actuator. ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2000, pp. 1–14.

[9] Donnellan, Q.A. Design and testing of linear shape memory alloy actuator. National Science Foundation – Research Experience for Undergraduates, 2005, pp. 1-6.

[10] Liang, C., Rogers, C.A., Design of Shape Memory Alloy Actuators. Journal of Mechanical Design, 1992, 114, pp. 223–230.

[11] Glushchenkov V.A., Alekhina V.K. Multi-link actuators made of shape memory material and their characteristics. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. pp. 483-488. (rus.)

[12] Taik A.M., Lupin S.A., Vagapov Yu.F. Application of the brute force algorithm to optimize the topology of wireless networks. International Journal of Open Information Technologies. 2016. № 4 (9). pp. 80-86. (rus.)

[13] Stennikov V.A., Chemezov A.A. Application of the tree enumeration algorithm and the annealing simulation method for the scheme-structural

optimization of heat networks. Software products and systems. 2018. № 2 (31). pp. 23-27. (rus.)
[14] Himmelblau D. Applied Nonlinear Programming. Publishing house "MIR". Moscow. 1975. pp. 536. (rus.)
[15] Kolokolov A.A., Yagofarova D.I., Tyuryumov A.N. Tech. Development of algorithms for the satisfiability problem and some of its generalizations using brute-force of 1-classes. Omsk Scientific Bulletin. 2006. pp. 57-61. (rus.)
[16] Mohammad, A., Saleh, O., Abdeen, R.A. Occurrences Algorithm for String Searching Based on Brute-force Algorithm. Journal of Computer Science, 2006, 2 (1), pp. 82–85.
[17] Arslan, H., Korotkih, M.T. Electromechanical clamping device using shape memory materials. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 150-158.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Е. В. Арышенский[1], В.Ю.Арышенский[2], А.А.Рагазин[3]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЗМЫ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИИ ТЕКСТУРЫ В СПЛАВЕ 1565ч

[1]Евгений Владимирович Арышенский
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
Россия, Самара
Тел.: (927)294-6096, E-mail: ar-evgenii@yandex.ru

[2]Владимир Юрьевич Арышенский
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
Россия, Самара
Тел.: (917)110-6474, E-mail: arysh54@mail.ru

[3]Александр Алексеевич Рагазин
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
Россия, Самара
Тел.: (937)648-2533, E-mail: sanekragazin63@mail.ru

Аннотация

В работе исследовано влияние термомеханической обработки на механизмы зародышеобразования при рекристаллизации сплава 1565 ч. Показана связь данных механизмов с интерметаллидными частицами и особенностями формирования текстуры. Для изучения применялся комплексный подход, микроскопия, рентгеноструктурный анализ, а также моделирование. Связь между режимами термомеханической обработки и механизмами зародышеобразования изучалась на стадии проработки литой структуры в реверсивной клети и непрерывной горячей прокатки. Исследование показало, что на все стадиях термомеханической обработки данного сплава основным источником зародышей при рекристаллизации

являются частицы второй фазы. При увеличении значений параметра Холомона-Зинера роль данных частиц возрастает. Для получения максимально возможной доли бестекстурной составляющей необходимо вести термомеханическую обработку при высоких параметрах Холомона-Зенера, но в то же время при температуре, позволяющей полное протекание процесса рекристаллизации.

Ключевые слова: алюминий, текстура, рекристаллизация, горячая прокатка.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 18-79-10099-П, https://rscf.ru/project/21-79-03041/.

Введение

В настоящее время алюминиевые сплавы с высоким содержанием магния являются одним из самых распространённых в различных отраслях современной промышленности [1 – 6]. Это достигается за счет высоких прочностных и пластических характеристик данной группы материалов. Одной из проблем, возникающих при их производстве, является анизотропия их физико-механических свойств, снижающая их формуемость и эксплуатационные характеристики и ведущая к потерям металла [7 – 9]. Основная причина анизотропии механических свойств – кристаллографическая текстура, формирующаяся в ходе термомеханической обработки алюминиевых листов и лент. До недавнего времени основным способом снижения анизотропии было наложение кубической компоненты, дающей фестоны под 0º/90º на текстуры β-фибера, дающие компоненты под углом 45º, в результате чего металл приобретает свойства, близкие к изотропным [10, 11]. Однако недавние авторские исследования показали иной путь устранения анизотропии, основанной на механизме PSN [12, 13]. PSN механизм основан на образовании зародышей рекристаллизации на интерметаллидных частицах. Ориентировки зародышей рекристаллизации, возникающие на интерметаллидных частицах, индивидуальны и не совпадают друг с другом. В итоге рекристаллизация по PSN механизму не приводит к возникновению какой-либо выраженной текстуры. Однако для управления формированием текстуры в данном типе сплавов необходимо исследование влияния режимов термомеханической обработки на механизмы зародышеобразования при рекристаллизации в сплавах с высоким содержанием магния и их связи с интерметаллидными частицами. Целью данной статьи является изучение вышеперечисленных вопросов для 1565ч нового отечественного алюминиевого сплава с высоким содержанием магния.

Экспериментальная часть

Слитки из сплава 1565ч с химическим составом, приведённым в таблице 1, отливались в кристаллизатор скольжения и гомогенизировались при температуре 500 ºС – 530 ºС с выдержкой 4 часа.

Таблица 1. Химический состав сплава 1565 ч

Содержание химических элементов, масс %										
сплав	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
1565ч	Основа	0,1	0,2	0,05-0,10	0,60-0,80	5,50-6,00	0,02-0,05	0,45-0,70	0,02-0,05	0,06-0,10

В ходе исследования была проведена промышленная прокатка двух литых заготовок из алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния 1565ч в реверсивной клети стана горячей прокатки «Кварто 2800» с целью проработки литой структуры по режимам, приведенным в таблице 2. После завершения реверсивной прокатки данная партия металла остывала на воздухе, при этом несколько часов его температура была выше температуры рекристаллизации. У данной партии исследовались размер и количество интерметаллидных частиц, а также текстурная композиция.

Таблица 2. Прокатка сплава 1565ч в реверсивной клети

Номер прохода	Входная толщина, мм	Выходная толщина, мм	Линейная скорость рабочих валков	Температура деформации, ºС	Скорость деформации, $с^{-1}$	Усилие прокатки, Тс	Логарифм параметра Зеннера	Длительность паузы
1	400	390	57	460	0.35	2407	12.74	5.6
2	390	375	85	459	0.66	2350	13.03	13.7
3	375	355	85	459	0.79	2493	13.11	12.3
4	355	335	85	459	0.84	2432	13.13	12.7
5	335	310	85	459	0.99	2526	13.21	13.3
6	310	285	85	459	1.07	2447	13.24	14.0
7	285	255	85	459	1.28	2517	13.31	14.9
8	255	225	85	460	1.43	2436	13.35	16.1
9	225	190	85	460	1.74	2532	13.43	17.9
10	190	160	85	461	1.91	2325	13.46	20.3
11	160	130	85	460	2.26	2345	13.54	23.6
12	130	100	85	460	2.77	2457	13.63	28.5
13	100	75	85	460	3.28	2393	13.70	36.0
14	75	55	113	459	3.91	2351	13.80	46.9
15	55	40	113	455	6.15	2352	14.07	54.1
16	40	30	113	451	6.93	2233	14.19	63.2

Другая часть металла направлялась в непрерывную группу промышленного стана «Кварто 2800» (рис. 1). Горячая прокатка производилась согласно режимам, приведенным в табл. 3.

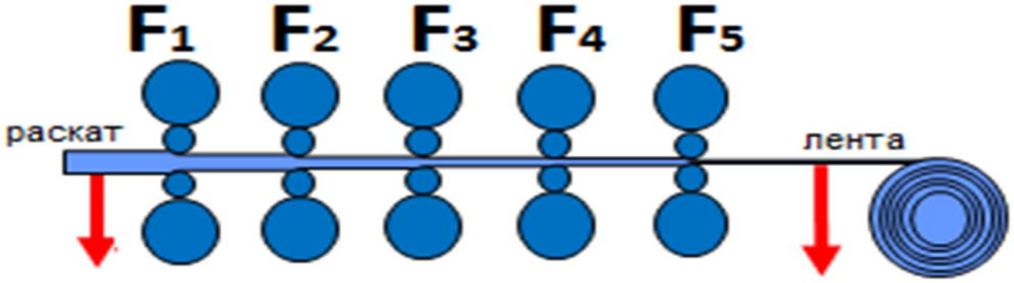


Рис. 1. Схема отбора образцов из непрерывной группы прокатного стана «Кварто 2800»

Таблица 3. Прокатка сплава 1565 ч в непрерывной группе стана «Кварто 2800»

Сплав	Параметры ТМО	Вход в непрерывную группу	Клеть № F1	Клеть № F2	Клеть № F3	Клеть № F4	Клеть № F5
1565ч	Толщина, мм	35	23	18	13,5	10	6,80
	Скорость вращения валков, м/мин	–	33	48	65	92	128
	Температура, °С	460	–	–	–	–	355
	Междеформационная пауза 1 с						

В процессе прокатки непрерывная группа была остановлена, а металл аварийно охлажден. После пятой клети и самоотжига происходил отбор карточек и подготовка образцов для определения микроструктуры, текстуры, размера и количества интерметаллидных частиц.

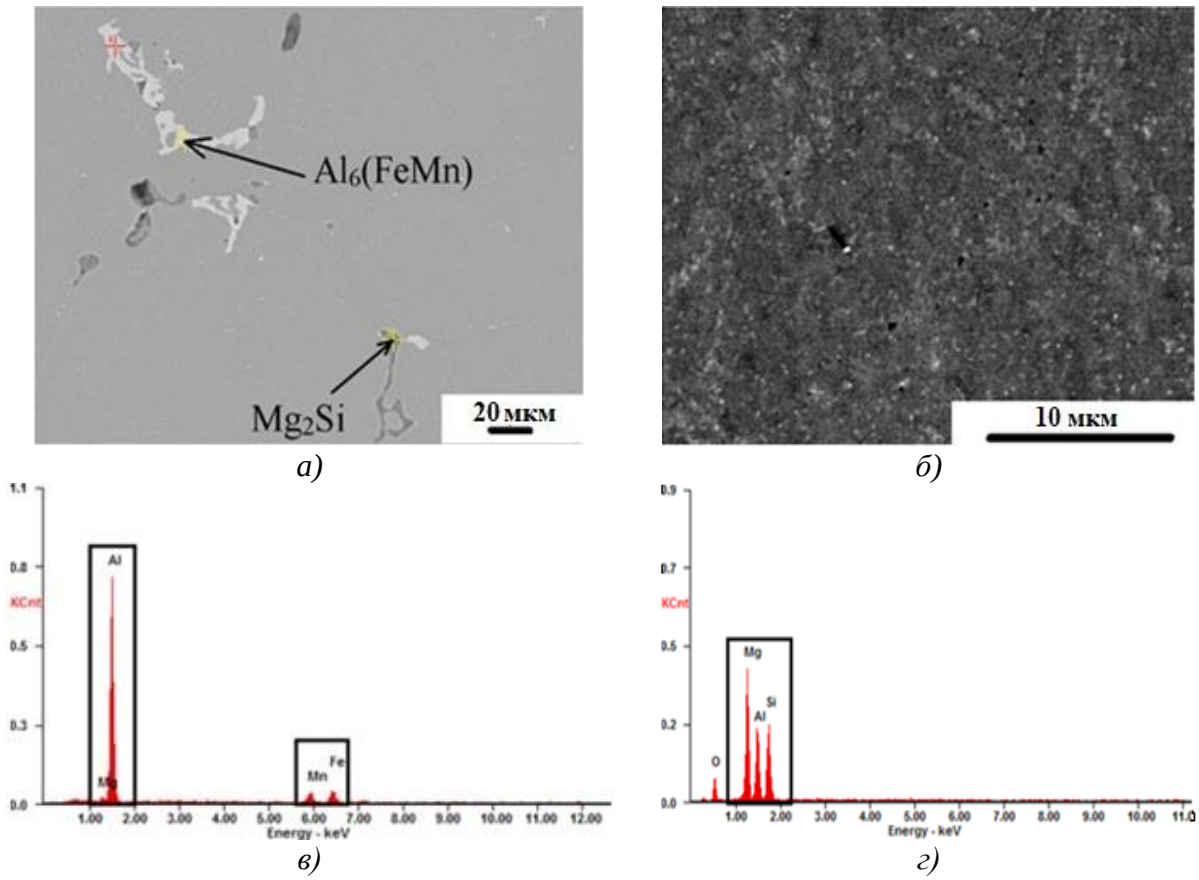
Текстурные измерения в виде построения полюсных фигур проводили на образцах, вырезанных из серединных плоскостей по толщине листа. Плоскость съемки полюсных фигур была параллельна плоскости прокатки. Текстура в виде трех неполных полюсных фигур {220}, {311}, {331} была исследована методом «на отражение» с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в Cokα-излучении. Были использованы диапазоны углов наклона α (0 ÷ 70º) и поворотов β (0 ÷ 360°) с шагом по α и β = 5°. Измеряли по 1 образцу на данное состояние материала. Падение интенсивности на периферийной части полюсной фигуры вследствие эффекта дефокусировки корректировали с помощью поправочных коэффициентов, рассчитанных исходя из условий рентгенографической съемки полюсных фигур. Функцию распределения ориентировок (ФРО)

рассчитывали по измеряемым полюсным фигурам, представляя в виде суперпозиции большого числа (2000) стандартных распределений с одинаковым маленьким рассеянием. По данной ФРО также рассчитывали полные полюсные фигуры и обратные полюсные фигуры для трех взаимно перпендикулярных направлений в образце: направления нормали к плоскости прокатки (НН), направления прокатки (НП) и поперечного направления (ПН).

Для проведения электронной микроскопии с целью определения размера интермеи химического состава использовали СЭМ JEOL 6390A с энергодисперсионным детектором X-Max 80. Методика подготовки образцов состояла в механическом шлифовании, полировании и электрополировании. Электрополирование проводили при температуре 85–110 ºС и напряжении 10–30 В в электролите следующего состава: 500 мл H_3PO_4; 300 мл H_2SO_4; 50 г CrO_3; 50 мл H_2O.

Кроме того, используя ранее разработанные авторские модели [14 – 16], рассчитывались формирования текстуры и зародышей рекристаллизации на различных стадиях термомеханической обработки в зависимости от её параметров.

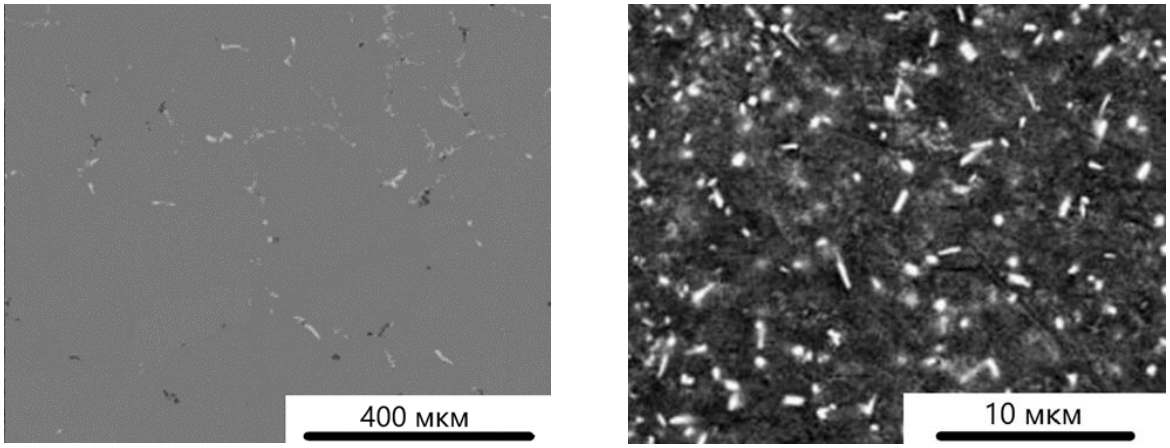
Результаты



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Внешний вид частиц 1565ч в литом состоянии:
а) – крупные интерметаллиды*; б)* – и мелкие первичные интерметаллиды EDS профиль для $Al_6(FeMn)$ интерметаллидов; *(в)* - EDS для Mg_2Si нтерметаллидов *(г)*.

После литья в сплаве 1565ч формируются крупные первичные интерметаллиды типа Al_6(FeMn) и Mg2Si (рис 2, а, в, г) со средним размером 10.3 мкр и занимаемым ими объемом 0.49% Интерметаллиды этих двух типов часто встречаются в алюминиевых сплавах [17, 18] с высоким содержанием магния и неоднократно наблюдались в 1565 ч [12, 19]. Наличие Al_6(FeMn) объясняется большим количеством Mn, а также наличием примесного железа, а Mg_2Si – высоким содержанием магния и примесями Si. Оба типа интерметаллидов возникают по границам дендритных зерен и имеют вытянутую форму и эвтектическое происхождение. Малоразмерные (средний радиус 1 мкр), мелкодисперсные частицы (рис 2, б) после литья в данном сплаве практически не наблюдаются.

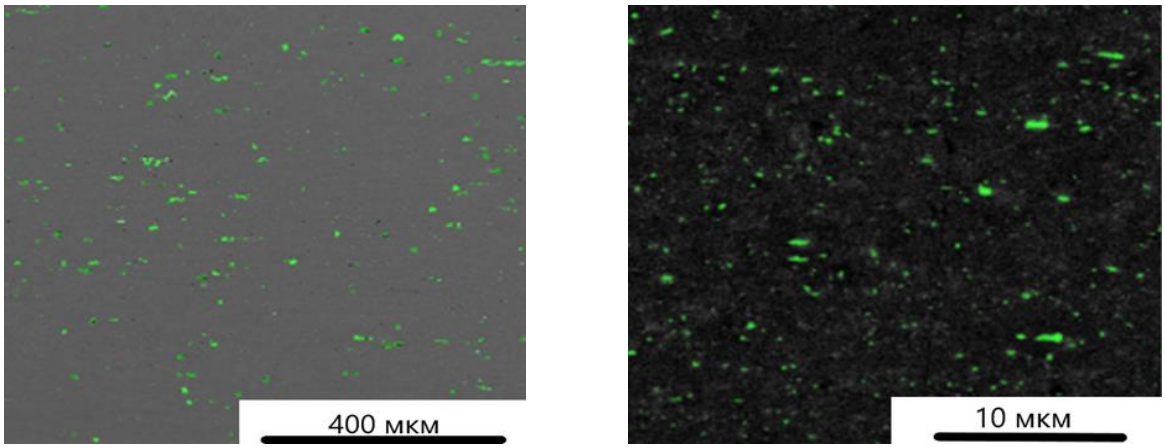


а) *б)*

Рис. 3. Внешний вид частиц 1565ч в гомогенизированном состоянии:
а) – интерметаллиды; *б)* – дисперсоиды

После гомогенизации (рис 3, а) средний радиус крупных интерметаллидов уменьшается до 8.6 мкм, а занимаемый ими объем сокращается до 4.2 %. В целом в 1565ч по сравнению с другими сплавами с высоким содержаниям магния очень много крупных интерметаллидных частиц. Например, в сплавах 5083 и 5754 после прохождения гомогенизации занимаемый частицами объем составляет 1.04 ÷ 1.3 %; 0.17%, а их размер 22.9 ÷ 51.2 нм; 126 нм мкм соответственно [17, 18].

В то же время возникает большое количество вторичных дисперсоидов (рис 3, б), которые занимают более 4.2 %, однако имеют достаточно крупный средний радиус 420 нм.



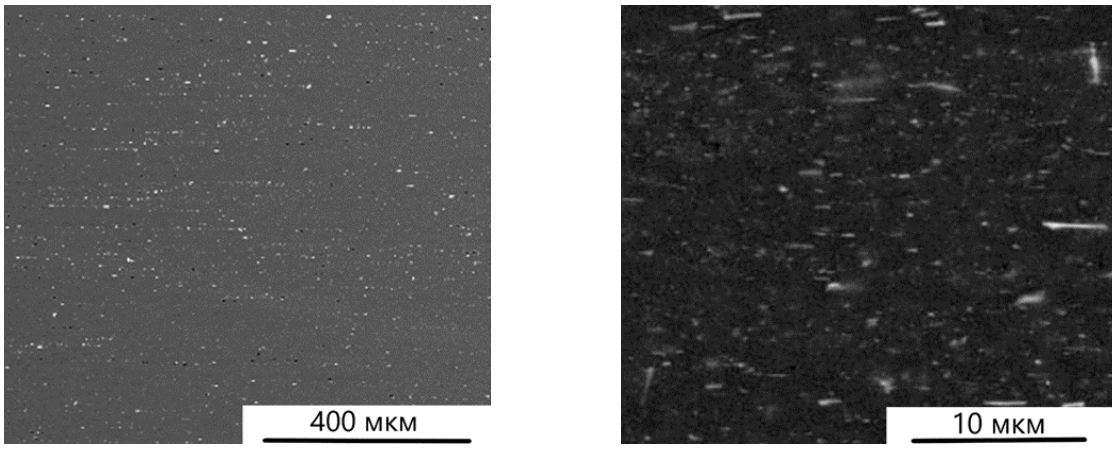
а) *б)*

Рис. 4. Внешний вид частиц 1565ч после горячей деформации в реверсивной клети: *а)* – интерметаллиды; *б)* – дисперсоиды

При проработке литой структуры в реверсивной клети происходит многократно описанное в различных источниках [20 – 22] дробление хрупких эвтектических интерметаллидов (рис. 4, а, табл. 4). В результате их объём практически не меняется, однако возрастает их количество, способствуя активизации PSN механизма. В то же время серьезного изменения доли мелкодисперсных частиц не происходит. Это объяснится тем, что, в отличие от гомогенизации, которая длится 4 часа, процесс прокатки занимает 8 – 10 мин, что недостаточно для полноценного выпадения мелкодисперсных метастабильных частиц (рис 4, б).

Таблица 4. Размеры и объемна доля интерметаллидов в сплаве 1565ч

Сплав	Толщина образца, мм	Объемная доля интерметаллидов, %	Ср. диаметр интерметаллидов, мкм	Макс. диаметр интерметаллидов, мкм	Объемная доля дисперсоидов, %	Ср. диаметр дисперсоидов, мкм	Макс. диаметр дисперсоидов, мкм
1565ч	Лит	4.9	10.3	13.96	-	-	
	гом	3.3	8.66	9.9	8.2	0.42	0.48
	Реверс	3.2	6	6.52	8.4	0.4	0.45
	Непрерывная	3.0	5	5.38	8.7	0.33	-



а) *б)*

Рис. 5. Внешний вид частиц 1565ч в после горячей деформации непрерывной группе: *а)* – интерметаллиды; *б)* – дисперсоиды

При деформации в непрерывной группе клетей происходит лишь незначительное измельчение интерметаллидов, и занимаемый ими объем в целом не изменяется (рис. 5,, табл. 4). Такая картина согласуется с данными, полученными в [20], где также наиболее активное дробление интерметаллидов происходит на стадии проработки литой структуры, после чего их склонность к разрушению снижается. Это связанно с тем, прежде всего, что происходит разрушение наиболее хрупких интерметаллидов, представляющих собой неравновесную эвтектику, пережившую процесс гомогенизации. Более твердые и мелкоразмерные, близкие к равновесным интерметаллиды не так склонны к дроблению на любых стадиях термомеханической обработки. Количество мелкодисперсных частиц также сохраняется стабильным. Таким образом, изменения размеров и количества интерметаллидных частиц на данной стадии незначительно и не способно повлиять на процесс рекристаллизации.

На рис. 6 приведены данные по изменению различных зародышей рекристаллизации в зависимости от режимов термомеханической обработки сплава 1565ч при прокатке в реверсивной клети.

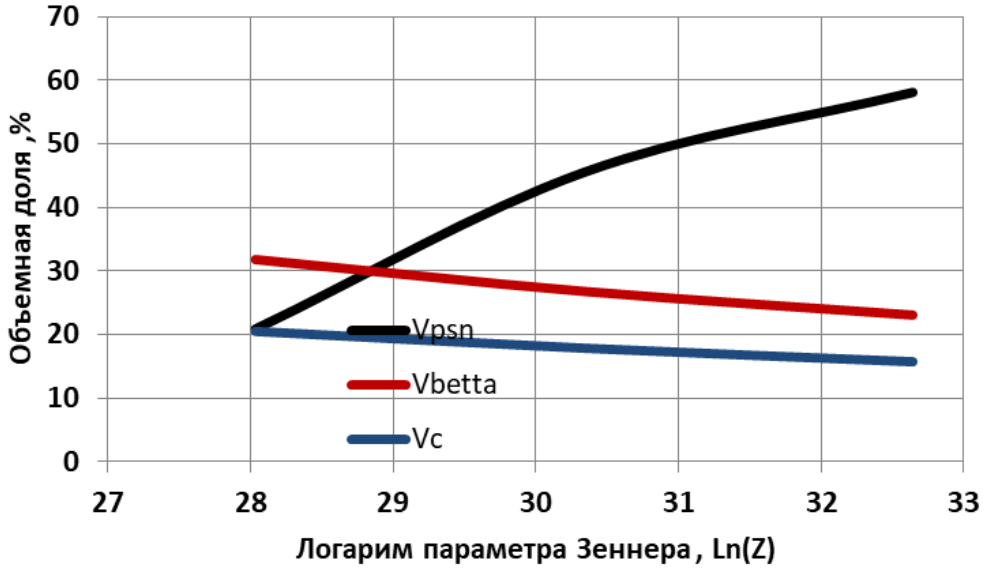


Рис. 6. Расчетная зависимость долей текстур рекристаллизованного материала от параметра Зинера – Холломона с учетом измельчения интерметаллидов в сплаве 1565

При низких параметрах Зинера – Холломона при проработке литой структуры размеры зародышей, образующихся из субзерен, и частиц второй фазы сравнимы по своим размерам. Поэтому при низких параметрах Зинера – Холломона доля рекристаллизующегося на PSN объема сравнима с долей кубических текстур и текстур β фибера. По мере увеличения данного показателя происходит снижение размеров субзерна и увеличение доли структуры, рекристаллизующийся по схеме PSN, с одновременным снижением долей текстур куба и β фибера.

Сплав 1565ч очень трудно рекристаллизовать на данном этапе термомеханической обработки, и для этого нужны высокие параметры Зинера – Холломона [18]. В то же время для управления эволюцией текстуры в алюминиевых сплавах необходимо, чтобы в них протекал процесс рекристаллизации. Поэтому единственным выходом является прокатка данных сплавов в реверсивной клети с высоким параметром Зинера – Холломона. После такой прокатки будет превалировать бестекстурная составляющая. Однако в данном сплаве это имеет положительный эффект, так как будет снижать долю текстуры β фибера на конечном этапе горячей прокатки. Необходимо отметить, что чем меньше доля текстуры β фибера, тем хуже задействуется процесс ориентированного роста, снижая тем самым долю кубических текстур. На заключительных этапах горячей прокатки данного сплава параметр Зинера – Холломона очень высок, а субзерно будет иметь очень малый размер. Из-за этого при рекристаллизации PSN будет успешно конкурировать с кубической текстурой, в некоторых случая полностью подавляя ее [19]. Это подавление будет тем эффективнее, чем меньше будет доля текстуры β

фибера. Таким образом, на заключительных этапах горячей прокатки можно добиться полного отсутствия каких бы то ни было выраженных текстур. Данный сплав после завершения холодной прокатки требует завершающего рекристаллизационного отжига, при котором также возможно получение структуры с отсутствующими в ней выраженными текстурными компонентами.

На рис. 7 приведены данные по изменению различных зародышей рекристаллизации в зависимости от режимов термомеханической обработки сплава 1565 ч в непрерывной группе клетей.

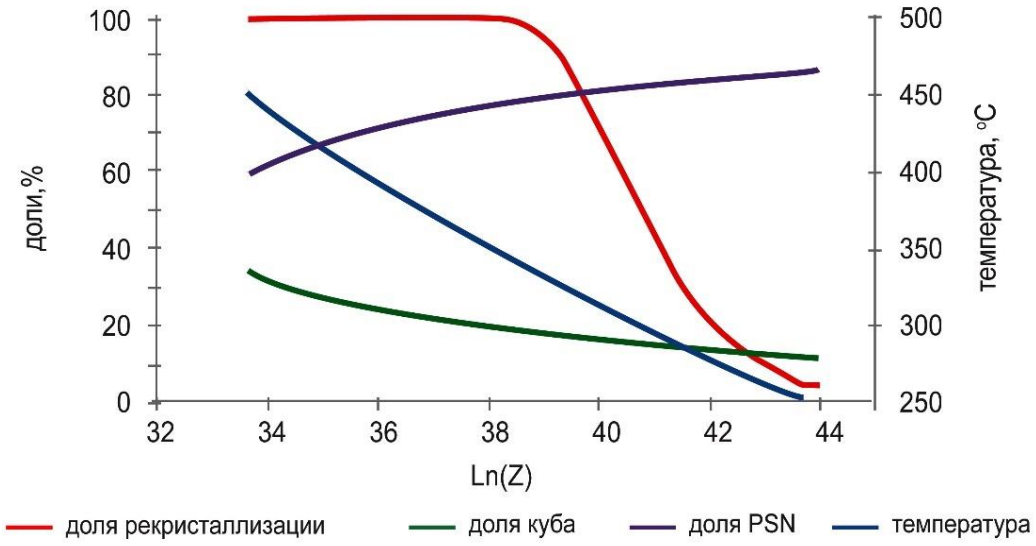


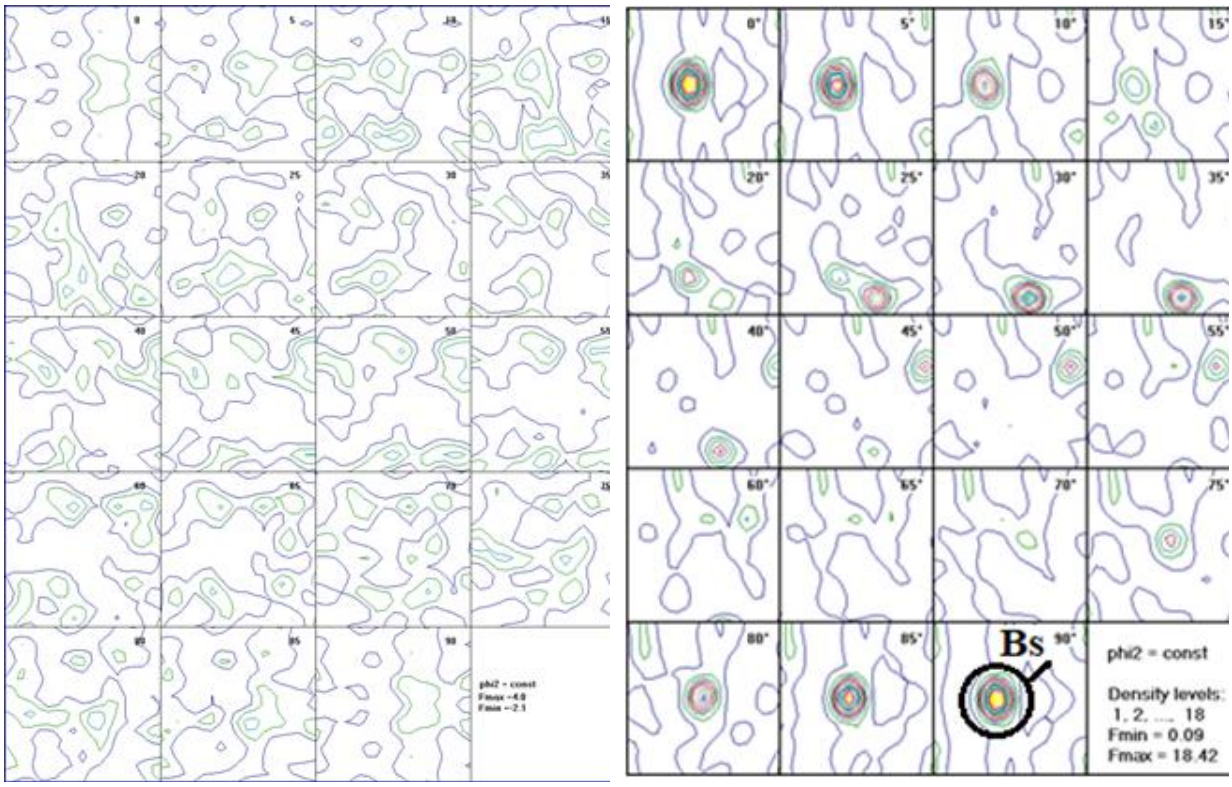
Рис. 7. Полученная в ходе моделирования зависимость доли рекристаллизованного объема, доли куба и случайной ориентировки (PSN) от параметра Зинера для сплава 1565 ч

На рис. 7 показана полученная в ходе моделирования зависимость доли рекристаллизованного объема, доли куба и случайной ориентировки (PSN) от параметра Зинера для сплава 1565. Отметим, что при прокатке на параметр Зинера превалирующее влияние оказывает температура.

Как видно из рис. 7, текстура β не образуется вообще, т.к. размеры ее зародышей слишком малы и их развитие подавляется мелкодисперсными частицами. Доля текстуры куба очень небольшая. Таким образом, сплав 1565ч представляет собой материал, в котором можно получать почти изотропные свойства, просто регулируя температуру отжига или самоотжига. Данная картина основана на PNS-механизме; единственной проблемой представляется проблема с прохождением рекристаллизации в случае низкой температуры. Текстура данного сплава является очень чувствительной к температуре начала плоской горячей деформации, во многом определяющей температуру самоотжига, т.к. в этом случае могут оставаться некристаллизованные текстуры β-фибера, что будет мешать

получению изотропной текстуры. Однако в целом её получение на данном этапе возможно.

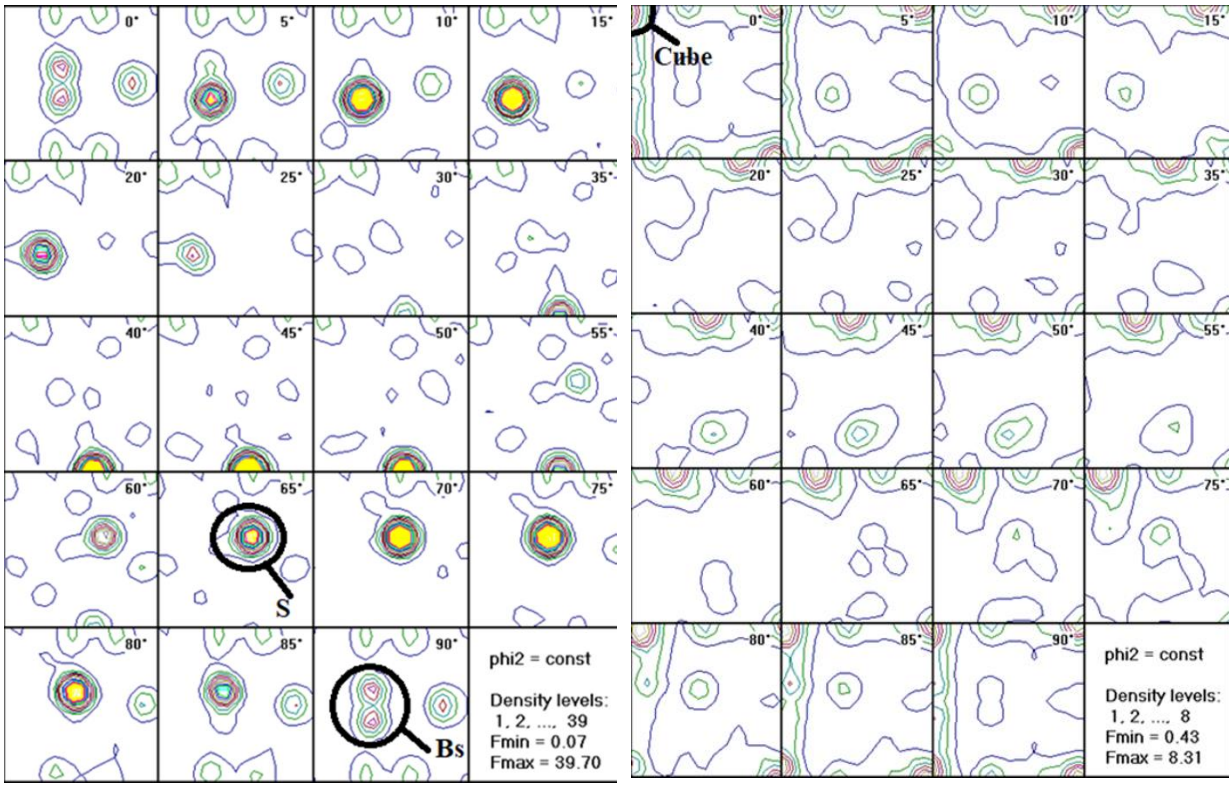
Необходимо также отметить, что снижение температуры приводит к увеличению параметра Холомона-Зинера и большему числу зародышей PSN, участвующих в рекристаллизации. Однако при температурах ниже 350ºС рекристаллизация будет проходить лишь частично, что будет способствовать сохранению текстуры β-фибера.



а) *б)*

Рис. 8. Текстурная композиция для сплавов 1565 ч:
а)–литое состояние, *б)* – после реверсивной клети.

В литом состоянии сплав 1565ч (рис. 8, а) не имеет ни одной выраженной текстурной компоненты, что является стандартной картиной для этого способа литья [23]. После проработки литой структуры в реверсивной клети наблюдается текстура β-фибера, выраженная в основном компонентом латуни Bs (рис. 8, б). Ярко выраженная текстура латуни характерна для алюминиевых сплавов с высоким содержанием магния из-за более высокого упрочнения и низкой энергии дефекта упаковки [18]. В то время как в малолегированных сплавах наиболее остро выражена текстура меди [24].



а) *б)*

Рис. 9. Результаты рентгеноструктурного анализа (данные ФРО)
а) – перед второй клетью, *б)* – после пятой клети.

После горячей прокатки образуется характерная для алюминиевых сплавов S компонента. Отметим, что в других алюминиевых сплавах текстурная компонента типа S появляется быстрее [25], текстура Cu не возникает в сплаве 1565ч даже при деформации в последней клети. После самоотжига наблюдается слабая кубическая текстура, другие ярко выраженные текстурные компоненты отсутствуют. Таким образом, в ходе самоотжига текстуры деформации частично переходят в текстуры рекристаллизации, однако наиболее интенсивно их них образуется бестекстурная составляющая. Это также может быть объяснено повышенным содержанием марганца, а именно наличием интерметаллидных частиц с его содержанием, служащих зародышами для образования бестекстурной составляющей [26]. Из этого можно сделать вывод, что сплав не склонен к образованию текстур рекристаллизации, однако доля бестекстурной составляющей на всех этапах прокатки достаточно велика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Khisamov, A.V. Research of high-level control system for centrifuge engine. International Review of Mechanical Engineering, 2018, 12(5), pp. 400-404.

[2] Chausov M. G. et al. Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2015, 50(1), pp. 61-72.

[3] Chausov M. et al. About physical aspects of increasing durability of aluminum alloys due to impact-oscillatory loading. International Conference TRANSBALTICA: Transportation Science and Technology. – Springer, Cham, 2021, pp. 572-580.

[4] Savchenkov, S., Kosov, Y., Bazhin, V., Krylov, K., Kawalla, R. Microstructural Master Alloys Features of Aluminum–Erbium System. Crystals, 2021, 11(11), pp.1353.

[5] Kosov Y. I., Bazhin V. Y., Povarov V. G. Interaction of Erbium Fluoride with Alkali Metal Chloride–Fluoride Melts in Synthesizing an Al–Er Master Alloy. Russian Metallurgy (Metally), 2018, 6, pp. 539-544.

[6] Belov, N.A.; Alabin, A.; Sannikov, A.; Deev, V.B. Primary crystallization in the Al-Fe-Mn-Ni-Si system as applied to casting alloys based on aluminum-nickel eutectic. Russ. J. Non-Ferr. Met., 2014, 55, pp. 356–364.

[7] Belov N. A., Akopyan T. K., Korotkova N. O., Timofeev V. N., Shurkin P. K. Effect of Cold Rolling and Annealing Temperature on Structure, Hardness and Electrical Conductivity of Rapidly Solidified Alloy of Al–Cu–Mn–Zr System. Materials Letters. 2021, pp. 130199

[8] Engler, O.; Kalz, S. Simulation of earing profiles from texture data by means of a visco-plastic self-consistent polycrystal plasticity approach. Mater. Sci. Eng. A., 2004, 373, pp. 350–362.

[9] Engler, O. Modeling of Texture and Texture-Related Properties during the Thermo-Mechanical Processing of Aluminum Sheets. Mater. Sci. Forum 2003, 426–432, pp. 3655–3660.

[10] Hutchinson, W.B.; Oscarsson, A.; Karlsson, A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands. Mater. Sci. Technol. 1989, 5, pp. 1118–1127.

[11] Engler, O.; Hirsch, J. Polycrystal-plasticity simulation of six and eight ears in deep-drawn aluminum cups. Mater. Sci. Eng. A., 2007, 452–453, pp. 640–651.

[12] Engler, O. Control of texture and earing in aluminium alloy AA 3105 sheet for packaging applications. Mater. Sci. Eng. A., 2012, 538, pp. 69–80.

[13] Aryshenskii, E. V., Hirsch, J., Konovalov, S. V., & Prahl, U. Specific features of microstructural evolution during hot rolling of the as-cast

magnesium-rich aluminum alloys with added transition metal elements. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(12), pp. 5782-5799.
[14] Aryshenskii, E. V., Aryshenskii, V. Y., Beglov, E. D., Chitnaeva, E. S., Konovalov, S. V. Investigation of subgrain and fine intermetallic participles size impact on grain boundary mobility in aluminum alloys with transitional metal addition. Materials Today: Proceedings, 2019, 19, pp. 2183-2188.
[15] Aryshenskii, E.; Kawalla, R.; Hirsch, J. Development of New Fast Algorithms for Calculation of Texture Evolution during Hot Continuous Rolling of Al-Fe Alloys. Steel Res. Int., 2017, 88, pp. 1700053.
[16] Evgenii, A.; Erkin, B.; Hirsch, J.; Vladimir, A.; Segrey, K. Development of the new fast approach for calculation of texture evolution during hot deformation of aluminum alloys. Procedia Manuf., 2019, 37, pp. 492–499.
[17] Aryshenskii, E., Hirsch, J., Konovalov, S., Aryshenskii, V., Drits, A. Influence of Mg Content on Texture Development during Hot Plain-Strain Deformation of Aluminum Alloys. Metals, 2021, 11(6), pp. 865.
[18] Engler, O.; Miller-Jupp, S. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. J. Alloy. Compd., 2016, 689, pp. 998–1010.
[19] Engler, O.; Kuhnke, K.; Hasenclever, J. Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents. J. Alloy. Compd., 2017, 728, pp. 669–681.
[20] Tepterev, M. S., Aryshenskii, E. V., Guk, S. V., Bazhenov, V. E., Drits, A. M., Kavalla, R. Effect of Annealing Conditions on the Evolution of the Grain Structure and Intermetallic Phases in the Cold-Rolled Strip of Aluminum–Magnesium Alloy. Physics of Metals and Metallography, 2020, 121(9), pp. 906-913.
[21] Maire, E.; Grenier, J.; Daniel, D.; Baldacci, A.; Klocker, H.; Bigot, A. Quantitative 3D characterization of intermetallic phases in an Al–Mg industrial alloy by X-ray microtomography. Scr. Mater., 2006, 55, pp. 123–126.
[22] Moulin, N.; Jeulin, D.; Ducottet, C.; Bigot, A.; Boller, E.; Maire, E.; Barat, C.; Klocker, H.; Parra-Denis, E. Constituent Particle Break-Up During Hot Rolling of AA 5182. Adv. Eng. Mater., 2010, 12, pp. 20–29.
[23] Aryshenskii E., Hirsch J., Konovalov S. Investigation of the Intermetallic Compounds Fragmentation Impact on the Formation of Texture during the as Cast Structure Thermomechanical Treatment of Aluminum Alloys Metals, 2021, 11(3), pp. 507.
[24] Hirsch J. Thermomechanical control in aluminium sheet production Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2003, 426, pp. 185-194.

[25] Evgenii A.; Kawalla R.; Vladimir A. Investigation of Texture and Structure Evolution during Hot Rolling of 1070, 3104 and 8011 Aluminum Alloys in Continuous Mill. La Metall. Ital., 2017, 109, pp. 11–21.
[26] Aryshenskii E. et al. Texture Development in Aluminum Alloys with High Magnesium Content. Metals. 2022, 12(5), pp. 723.
[27] Humphreys, F. J. Recrystallization and related annealing phenomena. Elsevier, 2012. P. 520.

E.V.Aryshenskii, V.Y.Aryshenskii, A.A.Ragazin

STUDY OF THERMO-MECHANICAL TREATMENT MODES EFFECT ON NUCLEATION AND TEXTURE FORMATION MECHANISMS IN 1565ch ALLOY

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Russia

Abstract

The study addresses the effect of thermo-mechanical treatment on nucleation mechanisms during 1565ch alloy recrystallization. It demonstrates relationship between such mechanisms and intermetallic particles, as well as specific pattern of texture formation. Comprehensive approach, including microscopy, X-ray structure analysis and modeling, was applied in the studies. Interaction between thermo-mechanical treatment modes and nucleation mechanisms was studied during as-cast structure work over in the reversing mill and during continuous hot rolling. The study demonstrated, that second phase particles present the main nucleation source during all stages of such alloy thermo-mechanical treatment. Increasing Zener-Hollomon parameter value stimulates the growing role of such particles. High Zener-Hollomon parameter values are required to achieve the maximum volume of random oriented texture constituent, at the same time the temperature shall enable recrystallization process completion.

Key words: Aluminum, Texture, Recrystallization, Hot rolling.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian science Foundation. Project number 18-79-10099-П, https://rscf.ru/project/21-79-03041/.

REFERENCES

[1] Evgrafov, A.N., Karazin, V.I., Khisamov, A.V. Research of high-level control system for centrifuge engine. International Review of Mechanical Engineering, 2018, 12(5), pp. 400-404.

[2] Chausov M. G. et al. Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2015, 50(1), pp. 61-72.

[3] Chausov M. et al. About physical aspects of increasing durability of aluminum alloys due to impact-oscillatory loading. International Conference TRANSBALTICA: Transportation Science and Technology. – Springer, Cham, 2021, pp. 572-580.

[4] Savchenkov, S., Kosov, Y., Bazhin, V., Krylov, K., Kawalla, R. Microstructural Master Alloys Features of Aluminum–Erbium System. Crystals, 2021, 11(11), pp.1353.

[5] Kosov Y. I., Bazhin V. Y., Povarov V. G. Interaction of Erbium Fluoride with Alkali Metal Chloride–Fluoride Melts in Synthesizing an Al–Er Master Alloy. Russian Metallurgy (Metally), 2018, 6, pp. 539-544.

[6] Belov, N.A.; Alabin, A.; Sannikov, A.; Deev, V.B. Primary crystallization in the Al-Fe-Mn-Ni-Si system as applied to casting alloys based on aluminum-nickel eutectic. Russ. J. Non-Ferr. Met., 2014, 55, pp. 356–364.

[7] Belov N. A., Akopyan T. K., Korotkova N. O., Timofeev V. N., Shurkin P. K. Effect of Cold Rolling and Annealing Temperature on Structure, Hardness and Electrical Conductivity of Rapidly Solidified Alloy of Al–Cu–Mn–Zr System. Materials Letters. 2021, pp. 130199

[8] Engler, O.; Kalz, S. Simulation of earing profiles from texture data by means of a visco-plastic self-consistent polycrystal plasticity approach. Mater. Sci. Eng. A., 2004, 373, pp. 350–362.

[9] Engler, O. Modeling of Texture and Texture-Related Properties during the Thermo-Mechanical Processing of Aluminum Sheets. Mater. Sci. Forum 2003, 426–432, pp. 3655–3660.

[10] Hutchinson, W.B.; Oscarsson, A.; Karlsson, A. Control of microstructure and earing behaviour in aluminium alloy AA 3004 hot bands. Mater. Sci. Technol. 1989, 5, pp. 1118–1127.

[11] Engler, O.; Hirsch, J. Polycrystal-plasticity simulation of six and eight ears in deep-drawn aluminum cups. Mater. Sci. Eng. A., 2007, 452–453, pp. 640–651.

[12] Engler, O. Control of texture and earing in aluminium alloy AA 3105 sheet for packaging applications. Mater. Sci. Eng. A., 2012, 538, pp. 69–80.

[13] Aryshenskii, E. V., Hirsch, J., Konovalov, S. V., & Prahl, U. Specific features of microstructural evolution during hot rolling of the as-cast

magnesium-rich aluminum alloys with added transition metal elements. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(12), pp. 5782-5799.
[14] Aryshenskii, E. V., Aryshenskii, V. Y., Beglov, E. D., Chitnaeva, E. S., Konovalov, S. V. Investigation of subgrain and fine intermetallic participles size impact on grain boundary mobility in aluminum alloys with transitional metal addition. Materials Today: Proceedings, 2019, 19, pp. 2183-2188.
[15] Aryshenskii, E.; Kawalla, R.; Hirsch, J. Development of New Fast Algorithms for Calculation of Texture Evolution during Hot Continuous Rolling of Al-Fe Alloys. Steel Res. Int., 2017, 88, pp. 1700053.
[16] Evgenii, A.; Erkin, B.; Hirsch, J.; Vladimir, A.; Segrey, K. Development of the new fast approach for calculation of texture evolution during hot deformation of aluminum alloys. Procedia Manuf., 2019, 37, pp. 492–499.
[17] Aryshenskii, E., Hirsch, J., Konovalov, S., Aryshenskii, V., Drits, A. Influence of Mg Content on Texture Development during Hot Plain-Strain Deformation of Aluminum Alloys. Metals, 2021, 11(6), pp. 865.
[18] Engler, O.; Miller-Jupp, S. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. J. Alloy. Compd., 2016, 689, pp. 998–1010.
[19] Engler, O.; Kuhnke, K.; Hasenclever, J. Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents. J. Alloy. Compd., 2017, 728, pp. 669–681.
[20] Tepterev, M. S., Aryshenskii, E. V., Guk, S. V., Bazhenov, V. E., Drits, A. M., Kavalla, R. Effect of Annealing Conditions on the Evolution of the Grain Structure and Intermetallic Phases in the Cold-Rolled Strip of Aluminum–Magnesium Alloy. Physics of Metals and Metallography, 2020, 121(9), pp. 906-913.
[21] Maire, E.; Grenier, J.; Daniel, D.; Baldacci, A.; Klocker, H.; Bigot, A. Quantitative 3D characterization of intermetallic phases in an Al–Mg industrial alloy by X-ray microtomography. Scr. Mater., 2006, 55, pp. 123–126.
[22] Moulin, N.; Jeulin, D.; Ducottet, C.; Bigot, A.; Boller, E.; Maire, E.; Barat, C.; Klocker, H.; Parra-Denis, E. Constituent Particle Break-Up During Hot Rolling of AA 5182. Adv. Eng. Mater., 2010, 12, pp. 20–29.
[23] Aryshenskii E., Hirsch J., Konovalov S. Investigation of the Intermetallic Compounds Fragmentation Impact on the Formation of Texture during the as Cast Structure Thermomechanical Treatment of Aluminum Alloys Metals, 2021, 11(3), pp. 507.
[24] Hirsch J. Thermomechanical control in aluminium sheet production Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2003, 426, pp. 185-194.

[25] Evgenii A.; Kawalla R.; Vladimir A. Investigation of Texture and Structure Evolution during Hot Rolling of 1070, 3104 and 8011 Aluminum Alloys in Continuous Mill. La Metall. Ital., 2017, 109, pp. 11–21.
[26] Aryshenskii E. et al. Texture Development in Aluminum Alloys with High Magnesium Content. Metals. 2022, 12(5), pp. 723.
[27] Humphreys, F. J. Recrystallization and related annealing phenomena. Elsevier, 2012. P. 520.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 678.027.94

А. Ю. Кутьин

ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЬЮ КОМПОЗИТНОЙ НАМОТКИ

Алексей Юрьевич Кутьин,
САО «Медэкспресс»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8900-628-08-93, E-mail: kutin_alex@mail.ru.

Аннотация

Одним из наиболее востребованных методов изготовления полых композитных изделий является филаментная намотка. Несмотря на успешную практику автоматизации этого процесса, актуальной остается задача создания системы управления данным процессом, учитывающей взаимосвязь между геометрическими параметрами создаваемой намотки и параметрами ее напряженного состояния. В этом контексте, с целью корректного учета свойств объекта управления представлена модель динамики процессов взаимодействия элементов системы управления плотностью композитной намотки при изменении массы объекта управления и момента его инерции.

Ключевые слова: композиционный материал, намотка, натяжение нити, система управления процессом намотки, уравнения Лагранжа 2 рода.

Введение

Метод филаментной намотки является одним из наиболее распространенных при изготовлении полых композитных изделий. Этим методом изготавливают и трубы, и специализированные емкости различного назначения. Несмотря успешную практику автоматизации этого процесса, актуальной остается задача создания системы управления данным процессом, учитывающей взаимосвязь между геометрическими параметрами создаваемой намотки и параметрами ее напряженного

состояния. Для решения поставленной задачи предложено устройство управления процессом формирования намотки [1], разработанное на основе модели ее формирования [1]. Как и в любом устройстве такого типа, адгезия слоев намотки обеспечивается либо пропиткой наматываемых волокон клеящим составом в специальной ванне, либо за счет использования препрегов. Толщина намотки может варьироваться от 5 до 300 мм и более в зависимости от предназначения композитного изделия. Натяжение наматываемого материала регулируется специальным механизмом компенсационного типа.

Методы

Для анализа динамики процессов устройства необходимо описать взаимодействие элементов системы совокупностью дифференциальных уравнений [2]. При этом следует учесть изменение массы объекта управления (оправка с намоткой) и соответственно момента его инерции, а также взаимодействие с намоткой укатывающего валика (рис. 1). Чтобы получить такие дифференциальные уравнения, воспользуемся известным приемом обобщенного описания динамики системы управления уравнениями Лагранжа 2-го рода [2]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{\theta}_p}\right) - \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \theta_p} = Q_\theta \,, \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{x}_b}\right) - \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial x_b} = Q_x \,, \tag{2}$$

где t – текущее время динамического процесса, T - кинетическая энергия системы, θ_p и x_b - обобщенные координаты, соответственно угол поворота ротора электродвигателя и линейное перемещение укатывающего валика, Q_θ и Q_x - обобщённые силы.

Кинетическая энергия T является совокупностью кинетических энергий T_1 ротора электродвигателя наматывающей установки, оправки T_2 и укатывающего валика T_3 :

$$\mathrm{T} = \mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2 + \mathrm{T}_3 \,. \tag{3}$$

Слагаемые T_1 и T_2 определяются по известной формуле кинетической энергии [3] для тела, вращающегося вокруг неподвижной оси,

$$\mathrm{T}_1 = \frac{\mathrm{J}_p\, \dot{\theta}_p^{\,2}}{2}, \qquad \mathrm{T}_2 = \frac{\mathrm{J}_n\, \dot{\theta}_n^{\,2}}{2}, \tag{4}$$

где $\mathrm{J_p}$ и $\mathrm{J_n}$ – моменты инерции ротора электродвигателя и оправки, $\dot{\theta}_p$ и $\dot{\theta}_n$ – угловые скорости ротора электродвигателя и оправки. Для определения третьего слагаемого примем во внимание вращательное и поступательное движение укатывающего валика:

$$T_З = \frac{J_b \dot{\theta}_b^{\,2}}{2} + \frac{m_b V_x^{\,2}}{2}, \quad (5)$$

где J_b и $\dot{\theta}_b$ – момент инерции и угловая скорость укатывающего валика, m_b – его масса, V_x – скорость поступательного движения укатывающего валика ($V_x = \dot{x}_b$).

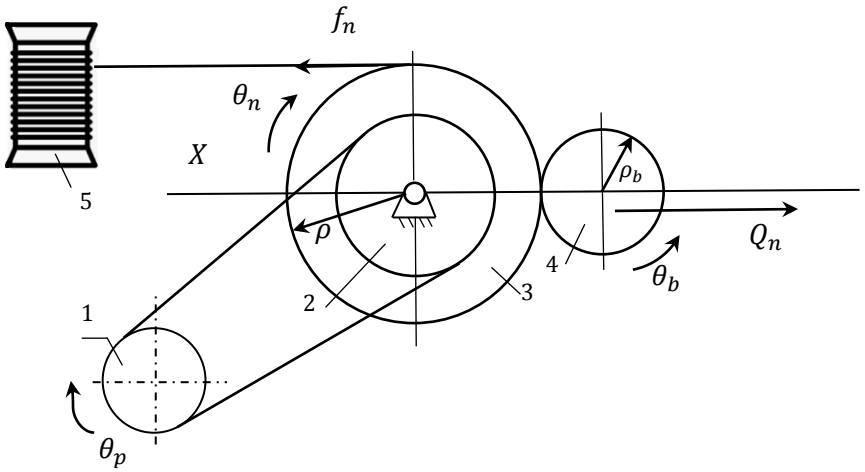


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов наматывающей установки и устройства управления. 1 – ротор электродвигателя, 2 – оправка, 3 – намотка, 4 – укатывающий валик, 5 – паковка с наматываемым материалом, ρ – радиус намотки, f_n – натяжение подаваемого материала, ρ_b – радиус укатывающего валика, Q_n – сила, прикладываемая к укатывающему валику для обеспечения его поступательного движения

Чтобы определить обобщенную силу Q_θ, воспользуемся известным соотношением [4] между суммой возможных элементарных работ и суммой произведений обобщенных сил и вариаций обобщенных координат:

$$\delta A_\theta + \delta A_x = Q_\theta \delta\theta_p + Q_x \delta x_b, \quad (6)$$

где δA_θ – элементарная работа при возможном повороте $\delta\theta_p$, δA_x – элементарная работа при возможном перемещении δx_b.

Обобщенные координаты независимы друг от друга [4], поэтому придадим системе возможный бесконечно малый поворот $\delta\theta_p$, при котором изменится только одна координата θ_p, а координата x_b - останется неизменной ($\delta x_b = 0$). При таком повороте из (6) следует

$$Q_\theta = \delta A_\theta \Big/ \delta\theta_p. \quad (7)$$

Элементарная работа δA_θ при возможном повороте $\delta\theta_p$:

$$\delta A_\theta = M_d \delta\theta_p - M_c \delta\theta_n - M_b \delta\theta_b - f_n \rho \delta\theta_n - R_o k_t \delta\theta_n, \quad (8)$$

где M_d - вращающий момент электродвигателя, M_c- момент сопротивления вращению оправки, M_b - момент сопротивления вращению укатывающего

валика, R_o – реакция намотки на воздействие укатывающего валика, k_t – коэффициент трения качения укатывающего валика по оправке с намоткой, $\delta\theta_n$ – возможный поворот оправки

$$\delta\theta_n = \frac{\rho_p}{\rho_n}\delta\theta_p \ , \tag{9}$$

ρ_p – радиус шкива, установленного на электродвигателе, ρ_n – радиус шкива, установленного на оправке, $\delta\theta_b$ – возможный поворот укатывающего валика

$$(\delta\theta_b = \frac{\rho}{\rho_b}\delta\theta_n = \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\delta\theta_p). \tag{10}$$

Из (6) с учетом (8) найдем правую часть выражения (1):

$$Q_\theta = M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n}M_c - \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}M_b - \frac{\rho_p}{\rho_n}f_n\rho - \frac{\rho_p}{\rho_n}R_o k_t \ . \tag{11}$$

Второе слагаемое в левой части указанного выражения $^{\partial \mathrm{T}}/_{\partial\theta_p}$ равно нулю, поскольку кинетическая энергия системы зависит от угловой скорости ротора электродвигателя (4, 5), но не собственно от угла поворота. Чтобы найти первое слагаемое левой части рассматриваемого уравнения, определим частную производную функции кинетической энергии T по переменной $\dot{\theta}_p$:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial\dot{\theta}_p} = \left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2 + \mathrm{J}_b\left(\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2\right]\dot{\theta}_p \ . \tag{12}$$

Принимая обозначение ω_ρ для угловой скорости ротора электродвигателя ($\omega_\rho = \dot{\theta}_p$), найдем производную по времени от функции (12), определив тем самым первое слагаемое левой части уравнения (1),

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial\dot{\theta}_p}\right) = \left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2 + \mathrm{J}_b\left(\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2\right]\frac{d\omega_p}{dt} + \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2\frac{d\mathrm{J}_n}{dt} + \mathrm{J}_b\left(\frac{\rho_p}{\rho_n\rho_b}\right)^2 2\rho\frac{d\rho}{dt}\right]\omega_p \ . \tag{13}$$

Учитывая данное выражение и выражение (11), получим первое дифференциальное уравнение взаимодействия объекта управления и органа управления:

$$\left[\mathrm{J}_p + \mathrm{J}_n\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2 + \mathrm{J}_b\left(\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2\right]\frac{d\omega_p}{dt} + \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2\frac{d\mathrm{J}_n}{dt} + \mathrm{J}_b\left(\frac{\rho_p}{\rho_n\rho_b}\right)^2 2\rho\frac{d\rho}{dt}\right]\omega_p =$$

$$M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n}M_c - \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}M_b - \frac{\rho_p}{\rho_n}f_n\rho - \frac{\rho_p}{\rho_n}R_o k_t \ . \tag{14}$$

Сумму моментов инерции в этом уравнении обозначим, как

$$J_u = J_p + J_n\left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2 + J_b\left(\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2, \quad (15)$$

Кроме того, допускаем, что моменты сопротивления вращению в опорах оправки и укатывающего валика M_c и M_b пропорциональны их угловым скоростям [5]:

$$M_c = h_n \dot{\theta}_n, \qquad M_b = h_b \dot{\theta}_b \quad (16)$$

или с учетом (9), (10)

$$M_c = h_n \frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho, \qquad M_b = h_b \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho, \quad (17)$$

где h_n и h_b – коэффициенты пропорциональности.

В результате уравнение (14) преобразуется к следующему виду:

$$J_u \frac{d\omega_p}{dt} + \xi_o \omega_p = M_d - \frac{\rho_p}{\rho_n} f_n \rho - \frac{\rho_p}{\rho_n} R_o k_t, \quad (18)$$

где

$$\xi_o = \left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^2 \frac{dJ_n}{dt} + J_b\left(\frac{\rho_p}{\rho_n \rho_b}\right)^2 2\rho\frac{d\rho}{dt} + h_n\frac{\rho_p}{\rho_n} + h_b\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}. \quad (19)$$

Коэффициент k_t определяется отношением моментов импульсов вращения укатывающего валика и оправки [6]

$$k_t = \frac{D_b}{D_n} = \frac{J_n \frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_p}{J_b \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_p} = \frac{J_n \rho_b}{J_b \rho}, \quad (20)$$

где D_b – момент импульса вращения укатывающего валика, D_n - момент импульса вращения оправки.

Очевидно, по мере увеличения радиуса намотки ρ момент инерции Jn оправки с намоткой и суммарный момент инерции Ju – меняются. Чтобы установить закономерность изменения Jn, представим зависимость радиуса намотки как функцию, где в качестве аргумента используется текущее время намотки композитного изделия. В соответствии с предложенной моделью формирования намотки [1] ее текущий радиус рассчитывается на основе выражения:

$$\rho - \rho_0 = \int_0^{\theta_n} a d\theta_n, \quad (21)$$

где a – параметр спирали намотки

$$a = \frac{v}{\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho} = \frac{d\rho}{d\theta_n} = \frac{d\rho}{\frac{\rho_p}{\rho_n}d\theta_\rho}, \quad (22)$$

υ – скорость перемещения точки наматывания (точки контакта наматываемого материала с телом намотки) в радиальном направлении (υ = dρ/dt), $\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho$ – угловая скорость ω_n вращения оправки ($\omega_n = \frac{\rho_p\, d\theta_\rho}{\rho_n\, \mathrm{dt}}$).

При небольшой толщине намотки, когда $a \approx \mathrm{const}$, выражение (21) упрощается, трансформируясь в спираль Архимеда:

$$\rho - \rho_0 = a\,\theta_n = a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\theta_\rho(t)\,, \tag{23}$$

где $\theta_\rho(t) = \int_0^t \omega_\rho dt$, при $\omega_\rho = \mathrm{const}$

$$\rho - \rho_0 = a\,\theta_n = a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t\,. \tag{24}$$

Момент инерции J_n оправки с намоткой, определяющий k_t, представим в виде суммы моментов [7]:

$$J_n = J_e + J_w\,, \tag{25}$$

где Je - момент инерции собственно оправки, когда $\rho = \rho_0$, Jw - момент инерции намотки.

Момент инерции J_w рассчитывается, как момент инерции полого цилиндра:

$$J_w = \tfrac{1}{2} m_н[\rho^2(t) + \rho_0^2]\,, \tag{26}$$

где $m_н$ - масса намотки.

Представив $m_н$ в виде произведения плотности намотки $y_н$ на ее объем

$$m_н = y_н \pi H(\rho^2 - \rho_0^2)\,, \tag{27}$$

где H – ширина оправки, для J_w из (25) запишем:

$$J_w = \tfrac{1}{2} y_н \pi H\left(\rho^4 - \rho_0^4\right), \tag{28}$$

Для дальнейшего решения дифференциального уравнения (18), описывающего изменение состояния объекта управления при изменении угла поворота ротора электродвигателя θ_p, необходимо определить множитель ξ_o из (19) . Найдем производные, входящие в выражение (19) , используя выражения (24) ,

$$\frac{d\rho}{dt} = a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho\,, \tag{29}$$

$$\frac{dJ_n}{dt} = \frac{dJ_w}{dt} = 2y_н \pi H a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho\left(a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\omega_\rho t + \rho_0\right)^3. \tag{30}$$

После проведенных уточнений следует вернуться к анализу уравнения (18), отражающего динамические процессы, возникающие при вращении ротора электродвигателя и объекта управления. В неустановившемся режиме движения (при разгоне или торможении) вращающий момент электродвигателя M_d состоит из двух

составляющих: момента статического сопротивления M_{ct}, соответствующего установившемуся режиму, и динамического (избыточного) момента M_{uz}, обусловленного инерцией неравномерно движущихся масс [8]. При разгоне или при торможении угловое ускорение принимают постоянным [8], в этом случае, при равноускоренном или равнозамедленном вращательном движении, избыточный момент подчиняется известной зависимости

$$M_{uz} = \mathrm{J}_u \frac{d\omega_p}{dt} = \mathrm{J}_u \frac{\omega_p}{t_{rz}}\ , \qquad (31)$$

где t_{rz} – время разгона.

После разгона ($t > t_{rz}$) процесс переходит в установившуюся стадию, когда $M_{uz} = 0$, $M_d = M_{ct}$ и ($\omega_\rho = \mathrm{const}$). В этом случае поделив правую и левую часть уравнения (18) на ξ_o, получим

$$\omega_p = q_1 M_d - q_2 f_n - q_3 R_o\ , \qquad (32)$$

где $q_1 = 1/\xi_o$, $q_2 = \frac{\rho\ \rho_p}{\xi_o\ \rho_n}$, $q_3 = \frac{k_t\ \rho_p}{\xi_o\ \rho_n}$ - коэффициенты передачи.

Учитывая (29) и (30), из (19) получим функциональную зависимость множителя $\xi_o(t)$.

$$\xi_o(t) = \left(\frac{\rho_p}{\rho_n}\right)^3 \left[2y_{\text{н}}\pi H a\,\omega_\rho \left(a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\,\omega_\rho t + \rho_0\right)^3\right] +$$

$$+ \mathrm{J}_b \left(\frac{\rho_p}{\rho_n \rho_b}\right)^2 2\left(a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\,\omega_\rho t + \rho_0\right)\left(a\,\frac{\rho_p}{\rho_n}\,\omega_\rho\right) + h_n \frac{\rho_p}{\rho_n} + h_b \frac{\rho}{\rho_b}\frac{\rho_p}{\rho_n}\ . \qquad (33)$$

Изменение состояния объекта управления с течением времени в данном случае характеризуется изменением коэффициентов передачи (см. рис. 2).

Результаты анализа динамики процесса

Рассматривая полученные зависимости, следует отметить, что за время наматывания коэффициенты передачи меняются незначительно. В данном случае моделью рассматриваемого объекта управления является апериодическое звено первого порядка (18). Максимальная длительность переходных процессов для таких звеньев не превышает четырехкратного значения постоянной времени [9]. В частности, в (18) постоянная времени это отношение J_u/ξ_o. Относительные изменения постоянной времени и коэффициентов передачи за время переходного процесса не превышают 2%. Как известно [9, 10], объект управления можно считать квазистационарным, если за время переходного процесса изменения коэффициентов дифференциального уравнения – незначительны.

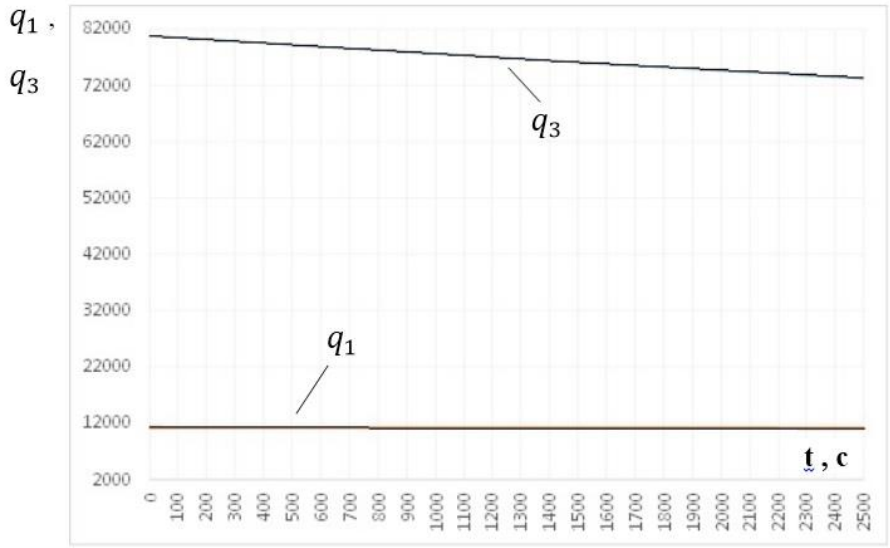


Рис. 2. Зависимость коэффициентов передачи от времени t наматывания

Процесс поступательного движения укатывающего валика

Проанализируем поступательное движение укатывающего валика в случае генерации соответствующего импульса блока управления. Получим дифференциальное уравнение для определения параметрической передаточной функции объекта, связывающую линейное перемещение x_b укатывающего валика с усилием Q_x. Из (2) и (5) имеем

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{x}_b} = m_b\,\dot{x}_b \quad \text{и} \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \dot{x}_b}\right) = m_b\,\ddot{x}_b\,. \tag{34}$$

Дадим координате x_b возможное бесконечно малое перемещение δx_b, при котором изменится собственно x_b, а координата θ_p не изменится ($\delta\theta_p = 0$). При таком перемещении из (6) следует

$$\delta A_x = Q_n \delta x_b - f_c \delta x_b - \Psi_n \delta x_b\,, \tag{35}$$

где Q_n – сила, прикладываемая к укатывающему валику для обеспечения его поступательного движения, f_c – сила сопротивления движению укатывающего валика вдоль оси X (рис. 1), Ψ_n - сила прижима укатывающего валика к намотанным на оправку нитям.

В (35) допускаем, что сила прижима Ψ_n компенсируется силой упругости намотки (ее пропорциональной составляющей, описываемой законом Гука) [11], кроме того, предполагаем, что сила сопротивления f_c пропорциональна скорости линейного

перемещения $\dot{x}_b$ ($f_c = p_v \dot{x}_b$, p_v - коэффициент пропорциональности) [12] , тогда

$$\delta A_x = Q_n \delta x_b - f_c \delta x_b - k_n x_b \delta x_b , \quad (36)$$

где k_n – коэффициент жесткости намотки.

В результате из (2) с учетом (34) и (36) имеем:

$$m_b \ddot{x}_b + p_v \dot{x}_b + k_n x_b = Q_n . \quad (37)$$

Приведем уравнение (37) к виду

$$\frac{m_b}{k_n} \ddot{x}_b + \frac{p_v}{k_n} \dot{x}_b + x_b = \frac{1}{k_n} Q_n . \quad (38)$$

Из (38) определим передаточную функцию объекта

$$W_B(p) = \frac{x_b(p)}{Q_n(p)} = \frac{1}{k_n\left(\frac{m_b}{k_n} p^2 + \frac{p_v}{k_n} p + 1\right)} = \frac{\eta}{(\tau^2 p^2 + 2d\tau p + 1)} , \quad (39)$$

где τ - постоянная времени управляющего звена ($\tau = \sqrt{\frac{m_b}{k_n}}$) ; $\eta = \frac{1}{k_n}$, d - коэффициент демпфирования ($d = \frac{p_v}{2\sqrt{m_b\ k_n}}$) .

Передаточную функцию всего звена управления, включающего в себя импульсный блок, генерирующий командные импульсы для механизма отвода укатывающего валика, можно определить следующим выражением [13]:

$$W_p(z) = Z\{ W_{\text{пнч}}(p)\}, \quad (40)$$

где $Z\{\}$ – символ z-преобразования, $W_{\text{пнч}}(p)$ – передаточная функция приведенной непрерывной части.

Передаточная функция $W_{\text{пнч}}(p)$ представляет собой произведение

$$W_{\text{пнч}}(p) = W_{fe}(p)\ W_B(p) , \quad (41)$$

где $W_{fe}(p)$ - передаточная функция импульсного блока.

Импульсный блок формирует прямоугольные импульсы длительностью $\tau_{\text{н}}$ и периодом следования S_v. Его передаточная функция описывается выражением [13]:

$$W_{fe}(p) = \frac{k_{ue}(1 - e^{-\tau_{\text{н}} p})}{p} , \quad (42)$$

где k_{ue} – коэффициент передачи импульсного блока.

С помощью (40) определяется переходная функция управляющего звена, характеризующая его динамические свойства и отображающая реакцию звена на единичное ступенчатое воздействие, до приложения которого звено находилось в покое. Для

получения указанной функции дискретная передаточная функция $W_p(z)$ экстраполируется непрерывной передаточной функцией

$$W_p(p) = \frac{\Phi_p(p)}{Q_p(p)}. \quad (43)$$

Переходная функция управляющего звена $\Phi_{p1}(p)$ в операторном виде определяется [10, С 31] , когда на его вход подается единичный скачок 1(t) с изображением Лапласу $Q_{p1}(p) = 1/p$. В этом случае

$$\Phi_{p1}(p) = \frac{1}{p} W_p(p). \quad (44)$$

График переходной функции показан на рис. 3 . Представленный результат определяет управляющее звено, как колебательное второго порядка [14]. Его настройка, без серьезных конструктивных изменений, осуществляется путем изменения коэффициента

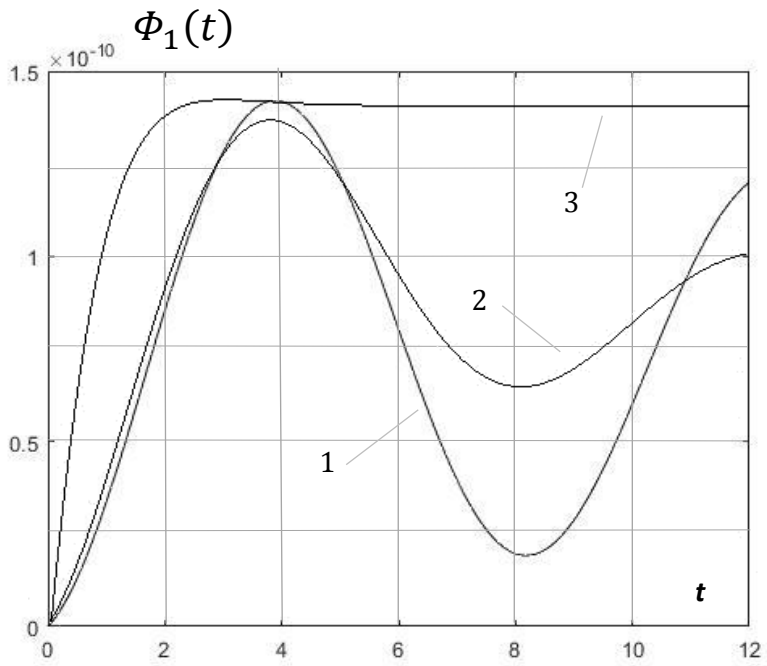


Рис. 3. Переходные функции управляющего звена, kn = 6,78·1010 Н/м, mb= 0,38 кг, pv = 0,03 Нс/м (график 1), pv = 0,12 Нс/м (2), pv = 0,96 Нс/м (3)

демпфирования [15]. В частности, при возрастании указанного коэффициента, за счет увеличения коэффициент пропорциональности p_v , снижается амплитуда колебаний переходной функции при затухании (рис. 3).

Заключение

Полученные уравнения являются основой для создания системы управления, где в качестве управляющего параметра используются угловая скорость оправки и величина приращения радиуса намотки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture, Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2019, 2019. pp. 332-336.

[2] Рябов, В. Г. Элементы аналитической механики. Уравнения Лагранжа II рода и примеры решения задач: учебно-методическое пособие / В. Г. Рябов, Х. Х. Азметов, Д. А. Макаров; Московский государственный технический университет «МАМИ». - Москва, 2011 – 76 с.

[3] Раус, Э. Динамика системы твердых тел. Пер. с англ. в 2-х томах. Т1/ Под ред. Ю. А. Архангельского и В. Г. Демина / Э. Раус. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 464 с.

[4] Мусалимов, В. М. Аналитическая механика. Уравнение Лагранжа второго рода. Свободные колебания / В. М. Мусалимов, П. А. Сергушин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 53 с.

[5] Овчинников, В. В. Прикладная механика: учебное пособие / В. В. Овчинников. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 308 с.

[6] Суслов, Г.К. Теоретическая механика / Г. К. Суслов. – М.: Гостехиздат, 1971. – 236 с.

[7] Рабчук, Л. В. Механика. Механические колебания и волны: учебное издание / Л. В. Рабчук, М. Т. Хатмуллина; Уфимский государственный авиационный технический университет. - Уфа, 2019 – 206 с.

[8] Эльяш, Н. Н. Динамика транспортных и технологических машин: учебное пособие / Н. Н. Эльяш. - Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2016. – 52 с.

[9] Теория автоматического управления: учебное пособие в 2-х частях под ред. А. А. Воронова. Ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления. - М.: Высшая школа, 1977. – 303 с.

[10] Гайдук, А. Р. Непрерывные и дискретные динамические системы / А. Р. Гайдук. – М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004. - 252 с.

[11] Чеботарев, А. С. Решение задач по теоретической механике. Часть 3. Динамика: учебное пособие / А. С. Чеботарев, Ю. Д. Щеглова; Воронежский государственный университет. – Воронеж, 2007 – 54 с.

[12] Москвин, Н. Г. Физические основы классической механики: учебное пособие / Н. Г. Москвин, Л. Н. Каурова ; Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – СПб, 2010 – 32 с.
[13] Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с MATLAB / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. - СПб.:ЛАНЬ, 2017. – 464 с.
[14] Клавдиев, А. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах: учебное пособие / А. А. Клавдиев; Северо-западный государственный технический университет. – СПб, 2005 – 74 с.
[15] Глазырин, Г. В. Теория автоматического регулирования : учебное пособие / Г. В. Глазырин. - 2-е изд. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017.- 168 с.

A.Y.Kutin

DYNAMICS OF COMPOSITE WINDING DENSITY CONTROL SYSTEM ELEMENTS

A. KUTIN

Insurance Company «Medexpress», Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Filaments winding method is an effective method of hollow composite products manufacturing (tubes and containers). The method has a long and successful history of automation. However, the task of creating a control system for this process remains actual, which would take into account the relationship between the geometric parameters of the created winding and the parameters of its stress state. In this context, we propose a model of the dynamic processes of this method that to take correctly into account the property of the control object, subject to changes in the mass of the control object and its moment of inertia.

Keywords: composite materials, thread tension, cylindrical shells, control system of the composite winding density, dynamic processes of the control system.

REFERENCES

[1] Kutin A., Musalimov V. Winding density regulation in the composite shell manufacture, Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2019, 2019. pp. 332-336.

[2] Ryabov, V. G. Elements of Analytical Mechanics. Lagrange equations of the second-order and examples of problem solving: teaching aid / V. G. Ryabov, Kh. Kh. Azmetov, D. A. Makarov; Moscow State Technical University "MAMI". - Moscow, 2011 - 76 p.- (rus)
[3] Raus, E. Dynamics of a system of rigid bodies. Translation from English in 2 volumes. T1 / Ed. Yu. A. Arkhangelsky and V. G. Demin / E. Raus. – Moscow: Science. Main edition of physical and mathematical literature, 1983. - 464 p.- (rus)
[4] Musalimov, V. M. Analytical mechanics. The Lagrange equation of the second-order. Free vibrations / V. M. Musalimov, P. A. Sergushin. - St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2007. - 53 p. – (rus)
[5] Ovchinnikov, V. V. Applied mechanics: textbook / V. V. Ovchinnikov. - Moscow: Academy of state fire service of Russia emergency situations ministry, 2014. - 308 p. – (rus)
[6] Suslov, G.K. Theoretical mechanics / G. K. Suslov. – Moscow: Gostekhizdat, 1971. – 236 p. – (rus)
[7] Rabchuk, L.V. Mechanics. Mechanical vibrations and waves: educational publication / L. V. Rabchuk, M. T. Khatmullina; Ufa state aviation technical university. - Ufa, 2019 - 206 p. – (rus)
[8] Elyash, N. N. Dynamics of transport and technological machines: study guide / N. N. Elyash. - Ekaterinburg: Russian state pedagogical university, 2016. - 52 p.
[9] Automatic control theory: textbook in 2 parts, editor A. A. Voronova. Part 1: Theory of linear automatic control systems. - Moscow: Higher school, 1977. - 303 p. – (rus)
[10] Gaiduk, A. R. Continuous and discrete dynamical systems / A. R. Gaiduk. - Moscow: educational-methodical and information center "Educational literature", 2004. - 252 p. – (rus)
[11] Chebotarev, A. S. Solving problems in theoretical mechanics. Part 3. Dynamics: textbook / A. S. Chebotarev, Yu. D. Shcheglova; Voronezh state university. - Voronezh, 2007 - 54 p. – (rus)
[12] Moskvin, N. G. Physical foundations of classical mechanics: textbook / N. G. Moskvin, L. N. Kaurova; St. Petersburg state technological institute. - St. Petersburg, 2010 - 32 p. – (rus)
[13] Gaiduk, A. R. Theory of automatic control in examples and problems with MATLAB / A. R. Gaiduk, V. E. Belyaev, T. A. Pyavchenko. - St. Petersburg: LAN, 2017. - 464 p.
[14] Klavdiev, A. A. Theory of automatic control in examples and tasks: textbook / A. A. Klavdiev; Northwestern state technical university. - St. Petersburg, 2005 - 74 p. – (rus)

[15] Glazyrin, G. V. Theory of automatic control : textbook / G. V. Glazyrin. - 2nd ed. - Novosibirsk: Novosibirsk state technical university, 2017.- 168 p. – (rus)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.7.044.4

К.С. Арсентьева[1], И.В. Калатозишвили[2], В.С. Мамутов[3]

ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ ЗАГОТОВКИ НА ДАВЛЕНИЕ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

[1]Ксения Сергеевна Арсентьева, к.т.н., ст. преподаватель
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(812)552-9530, E-mail: xenia.ars@gmail.com

[2] Калатозишвили Иван Васильевич, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(812)552-9530, E-mail: ivank300@gmail.com

[3]Вячеслав Сабайдинович Мамутов, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(812)552-9530, E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Аннотация

В работе оценивается влияние податливости заготовки на характер давления в разрядной камере малого объема при электрогидроимпульсной штамповке. Применена трехмерная модель процесса с учетом гидромеханики сжимаемой жидкости, взаимодействующей с деформируемой листовой заготовкой, плазменного канала с вводимой электрической энергией. Для построения модели использован программный комплекс LS-DYNA, позволяющий применять лагранжево-эйлеровый алгоритм (*ALE*) совместно с техникой *Multi-Material* и *FSI*. Показано значительное влияние податливости заготовки на характер давления в разрядной камере, которое желательно учитывать при проектировании соответствующих технологических процессов.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная штамповка, камеры малого объема, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, трехмерная модель гидромеханики сжимаемой жидкости, плазменный разрядный канал, деформируемая заготовка, влияние податливости заготовки на давление

Введение

Силовые эффекты, возникающие при высоковольтном разряде в жидкости (электрогидравлический эффект), используются в различных технических и технологических приложениях. В нашей стране наиболее широкое распространение, начиная с 60-х до 90-х годов прошлого века, электрогидравлический эффект получил в технологиях машиностроения, металлообработке, горном деле, для интенсификации химико-технологических процессов [1, 2].

В настоящее время за рубежом, в частности в США, Китае, Японии и Германии, происходит интенсивное развитие технологий и теории электрогидроимпульсной обработки, как это можно судить по материалам обзорной статьи [3]. Преимущественно это практическое применение в технологиях автомобилестроения [4, 5]. В последнее время в нашей стране сохранились преимущественно научные разработки [6, 7].

Сущность процесса применительно к электрогидроимпульсной штамповке (ЭГИШ) листовых материалов иллюстрирует рисунок 1.

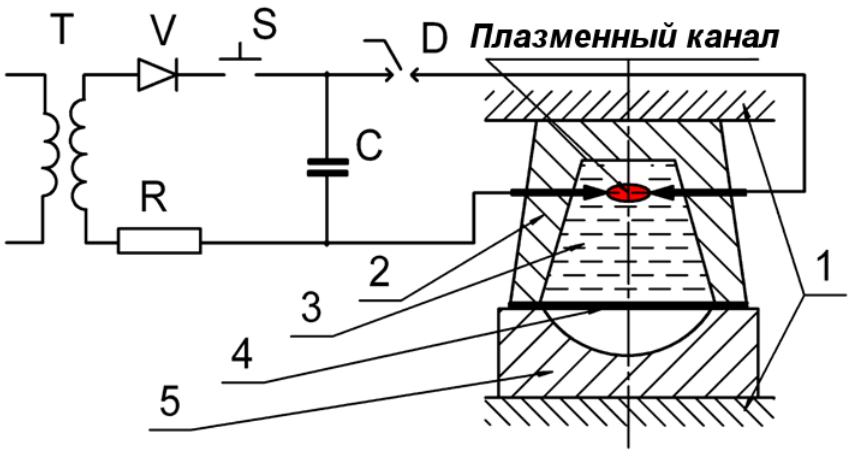


Рис. 1. Схема ЭГИШ: *1* – механический или гидравлический прижим, *2* – разрядная камера, *3* – рабочая жидкость, *4* – листовая заготовка, *5* – матрица

При высоковольтном разряде конденсаторной батареи *C* электрогидроимпульсной установки на искровой промежуток в разрядной камере *2* с жидкостью *3* (обычно водой) между электродами возникает и начинает расширяться низкотемпературный плазменный канал высокого

давления. За счет быстрого расширения разрядного канала возникает импульсное давление в жидкости, за счет которого происходит штамповка листовой заготовки *4* по профилю матрицы *5*.

Для прогнозирования параметров разрядно-импульсных технологий, проектирования технологической оснастки и машин необходимо рассчитывать параметры импульсного давления в жидкости, находящейся в замкнутой разрядной камере. Особенностью характеристик импульсного давления при высоковольтном электрическом разряде в жидкости является относительно короткий фронт давления вблизи канала разряда (0.1…10 мкс) и высокая амплитуда (до нескольких ГПа) при достаточно большой общей длительности процесса, достигающей нескольких миллисекунд. Это предъявляет определенные требования к устойчивости вычислительного алгоритма, используемого при расчетах.

В настоящее время одним из наиболее эффективных конечно-элементных комплексов для компьютерного моделирования высоковольтного разряда в жидкости является LS-DYNA 971 [8]. Данный программный комплекс при расчете одновременного взаимодействия нескольких подвижных и жестких сред позволяет использовать лагранжево-эйлеровый алгоритм (*ALE*), что совместно с техникой *Multi-Material* и *FSI* (*Fluid-Structure Interaction*) позволяет решить проблему искажения сетки и рассчитывать процессы течения жидкостей и газов в замкнутых объемах сложной формы [9]. Поэтому конечно-элементный комплекс LS-DYNA использован для компьютерного моделирования развития канала высоковольтного разряда в жидкости с учетом реальных особенностей его геометрии [10, 11]. Данное исследование является дальнейшим развитием указанных работ в направлении использования техники моделирования *MULTI-MATERIAL ALE FORMULATION* для расчета задач со сложной трехмерной геометрией разрядной камеры, обусловленной реальной формой электродной системы. Особый интерес такие исследования представляют для разрядных камер малого объема (менее 0.5…1 л). Такие исследования ранее не проводились.

Целью данной работы являлась оценка влияния податливости листовой заготовки на давление в разрядной камере малого объема при электрогидроимпульсной листовой штамповке.

Методы

Модель канала разряда в воде

Баланс энергии в канале разряда определяется соотношением

$$E_{pl} + A + E_{ls} = \int_0^t N(t)\,dt, \qquad (1)$$

где E_{pl} – внутренняя энергия плазмы, образованной в канале разряда при электрическом взрыве; A – работа, совершаемая газовой полостью в процессе расширения; E_{ls} – энергия потерь; $N(t)$ – функция мощности ввода электрической энергии в канал разряда. Внутренняя энергия плазмы в канале разряда определяется выражением для энергии идеального газа

$$E_{pl} = p_k V_k/(\gamma - 1),$$

где p_k – давление в канале, V_k – объем канала, γ – показатель адиабаты для плазмы, полученной из водопроводной воды. Показатель адиабаты зависит от давления, температуры и химического состава плазмы. Однако величина γ в условиях высоковольтного разряда в жидкости варьируется у большинства авторов в небольших пределах $\gamma \in [1.24…1.26]$ [12].

Работа расширения газовой полости определяется выражением

$$A = \int_{V_{k0}}^{V_k} p_k \, dV_k,$$

где V_{k0} – начальный объем канала.

Энергия потерь E_{ls} в основном определяется энергией электромагнитного излучения плазмы, а также энергией испарения стенок разрядного канала. Обычно энергия излучения не превышает 10% введенной энергии. Теплофизические процессы, связанные с испарением жидкости на стенках канала происходят существенно медленнее механических процессов движения границы, и с достаточно малой погрешностью можно считать эту границу адиабатической [12]. Поэтому величиной E_{ls} в выражении баланса энергии (1) пренебрегали.

В комплексе LS-DYNA 971 соотношение уравнения баланса энергии может быть задано при помощи уравнения состояния идеального газа *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK* через общее полиноминальное выражение

$$p_k = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)\, N(t)/V_{k0},$$

$$\mu = 1/V - 1,$$

где V – относительный объем, определяемый отношением текущего объема к начальному значению. Выбор констант $C_0 – C_6$ определяется необходимостью удовлетворения полиноминального выражения для p_k условиям баланса энергии (1):

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0,$$

$$C_4 = C_5 = \gamma - 1.$$

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась *MAT_NULL*, в карте которой задавалась начальная плотность плазмы ρ_{p0}. Данную величину, как и величину начального объема канала, достаточно трудно определить из физических соображений или из эксперимента. В работе [7] на основе результатов численного эксперимента показано, что изменение начального радиуса канала в пределах 0.15…1 мм приводит к

относительной ошибке расчета максимального давления на стенке камеры в пределах 0.099…1.53 %. Изменение начальной плотности плазмы в пределах 10…10000 кг/м^3 приводит к вариации максимального давления в пределах одного процента. Поэтому в расчетах задавалась величина начальной плотности ρ_{p0} = 1000 кг/м^3, а начальный радиус канала для приведенных ниже расчетов равнялся 1 мм.

При моделировании воды в комплексе LS-DYNA 971 в качестве модели жидкости использовалась модель жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID,* в которой зависимость между плотностью и давлением имеет вид

$$p = -K\cdot\ln(\rho_0/\rho), \qquad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, ρ_o = 1000 кг/м3 – начальная плотность. Величина модуля объемного сжатия K определялась из аппроксимации адиабаты Тэта на основе данных работы [13] для воды в диапазоне изменения давления $p \in [0.1…100]$ МПа, что дает значение $K \cong 2.35$ ГПа. Полагалось, что кавитация в жидкости наступает при отрицательном давлении 0.1 МПа.

Стенка камеры задавалась жесткой границей.

Исходные данные для компьютерного моделирования

В качестве базового расчета выбраны данные из компьютерного расчета аналогичного процесса, взятые из работы [15]. Достоверность этих расчетов подтверждена экспериментом.

Взята экспериментальная функция мощности, определяемая зависимостью, показанной на рисунке 2.

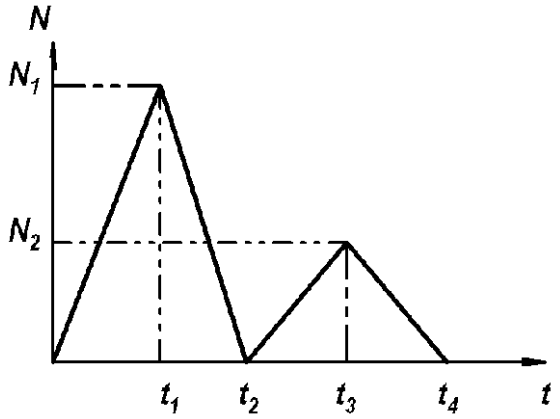


Рис. 2. Функция мощности электрической энергии, выделяемой в канале разряда

При этом параметры этой функции получались из эксперимента

$$N(t) = u(t)\cdot i(t),$$

где $u(t)$ – напряжение, измеренное на электродах, $i(t)$ – ток в разрядном контуре. Для графика мощности значения параметров равны: t_1 = 24 мкс,

t_2 = 49 мкс, t_3 = 76 мкс, t_4 = 102 мкс, N_1 = 9.1 МВт, N_2 = 4.9 МВт.

Заготовка бралась из стали 12Х18Н10Т толщиной 0.2 мм, для которой экспериментальная зависимость между напряжением текучести σ_s и интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_i аппроксимировалась степенным соотношением

$$\sigma_s = B_d \cdot \varepsilon_i^m,$$

$$B_d \cdot = k_d \cdot B,$$

где m = 0.29, B = 1180 МПа – параметры аппроксимации статической кривой деформационного упрочнения, k_d = 1.15 – коэффициент динамичности, учитывающий влияние высокой скорости деформаций при ЭГИШ. Задавались упругие константы материала: E = 202 ГПа – модуль Юнга; ν = 0.31 – коэффициент Пуассона; плотность материала $\rho_з$ = 7800 кг/м^3. Предполагалось, что материал заготовки – изотропный. Модель материала заготовки выбиралась *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY*. Материал матрицы принимался абсолютно жестким.

Трение задавалось кулоновское со значениями коэффициента при трении покоя 0.2 и при движении 0.15. Вследствие симметричности в расчетах моделировалась половина системы.

Форма и размеры разрядной камеры представлены на рисунке 3.

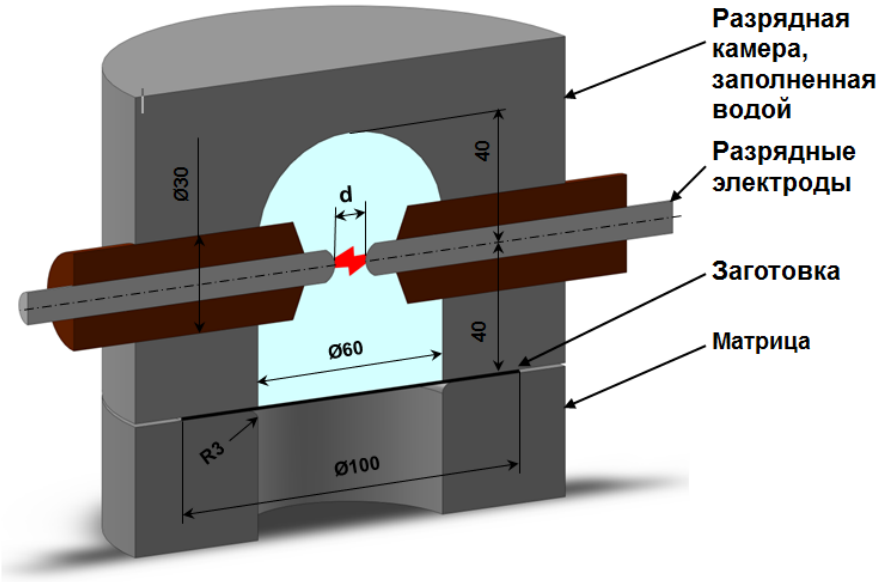


Рис. 3. Геометрическая модель разрядной камеры

Методика проведения численного эксперимента

Варьирование податливости заготовки необходимо было проводить при фиксированном диаметре очка матрицы и фиксированной функции мощности электрической энергии, выделяемой в канале разряда. Это

можно осуществлять путем изменения параметра кривой деформационного упрочнения B, плотности материала заготовки $\rho_з$ и толщины заготовки. В качестве параметра податливости заготовки было принято отношение максимального прогиба центральной точки заготовки при ее остановке к половине диаметра очка матрицы

$$\eta = z_{max}/(d_m/2).$$

При обработке результатов численных экспериментов оценивалось давление в центральной купольной части разрядной камеры и центральной точке деформируемой заготовки и изменение графиков давления от времени в зависимости от параметра податливости заготовки.

Результаты

Результаты компьютерных расчетов представлены на рисунке 4.

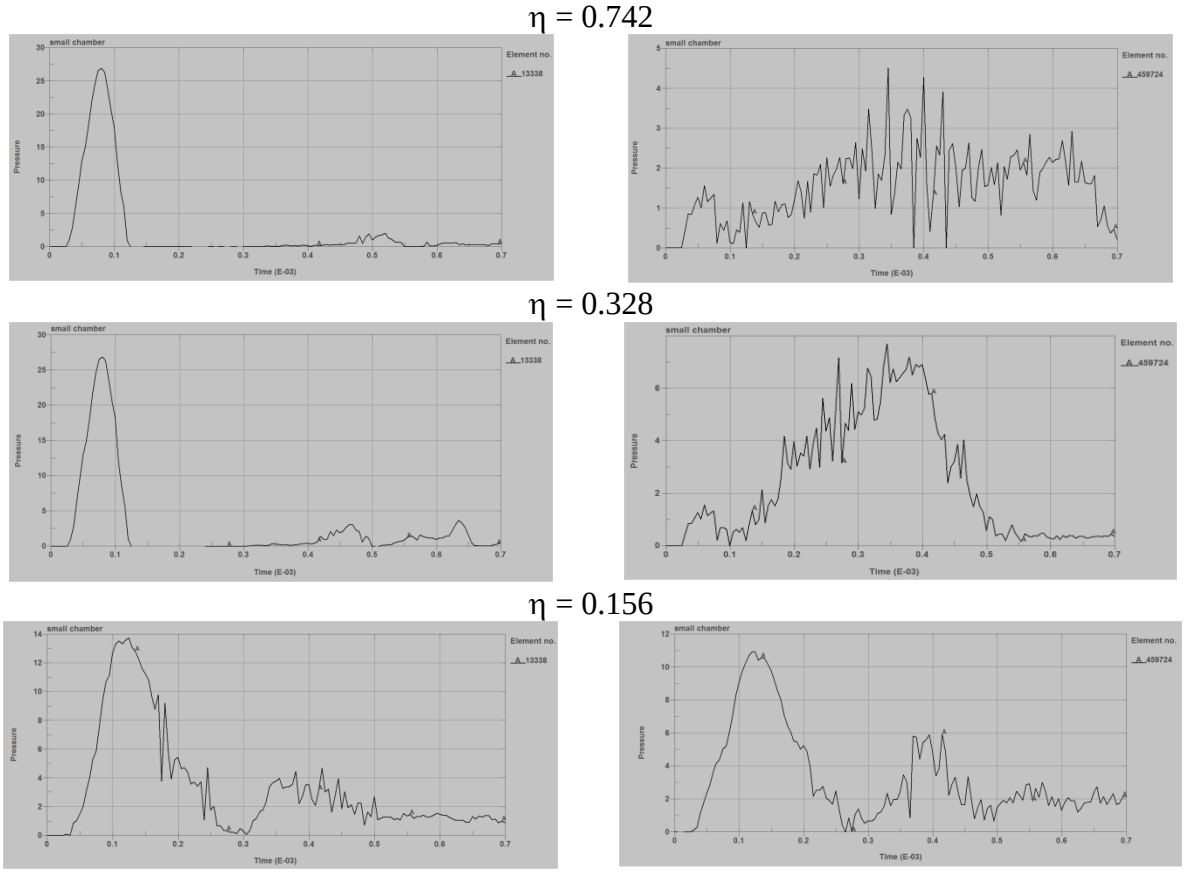


Рис. 4. Графики давления в МПа в зависимости от времени для разных параметров податливости заготовки (слева – давление в купольной части камеры, справа – давление в центре заготовки)

Анализируя результаты, можно отметить сильное влияние податливости заготовки на форму импульса давления в разрядной камере малого объема при ЭГИШ. С учетом сложной формы разрядной камеры,

влиянием электродной системы и деформируемой заготовки общая картина распространения прямых и отраженных волн, а также гидропотока весьма сложная.

С уменьшением податливости заготовки значительно вырастает первый максимум давления на центр заготовки, определяемый ударной волной, возникающей на первом этапе расширения канала разряда. При этом существенно изменяется форма импульса давления.

С другой стороны с уменьшением податливости заготовки давление вверху камеры и на заготовке по форме и значениям приближаются. Это позволяет говорить о примерном постоянстве давления внутри всей камеры, которое в практике ЭГИШ иногда называют «квазистационарностью» давления для камер малого объема в случае «жесткой заготовки».

Обсуждение

Расчет ЭГИШ с учетом реальной формы разрядной камеры, трехмерной гидродинамики сжимаемой жидкости, плазменного канала, определяемого вводимой электрической энергией, более адекватно описывает технологический процесс по сравнению с применением упрощенных компьютерных моделей. Однако, создание подобных компьютерных моделей с комплексным учетом перечисленных факторов и с использованием суперкомпьютеров для их реализации в настоящее время весьма проблематично для пользователей инженерного уровня. Поэтому упрощенные подходы к моделированию ЭГИШ, как это делается в работе [15], весьма востребованы.

Заключение

С применением программного комплекса LS-DYNA разработана трехмерная компьютерная модель электрогидроимпульсной штамповки листовой заготовки с учетом гидромеханики сжимаемой жидкости, взаимодействующей с деформируемой листовой заготовкой, плазменным каналом с вводимой электрической энергией. Для построения модели использован лагранжево-эйлеровый алгоритм совместно с техникой *Multi-Material* и *FSI*. Полученная компьютерная модель более адекватно описывает технологический процесс по сравнению с применением известных компьютерных моделей. Выполнен компьютерный эксперимент, который показал значительное влияние податливости заготовки на характер давления в разрядной камере. Это желательно

учитывать при проектировании соответствующих технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 254 с.

[2] Гулый Г.А. Высоковольтный импульсный разряд в силовых импульсных системах / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 176 с.

[3] Aashish Rohatgi, Elizabeth V. Stephens, Ayoub Soulami, Richard W. Davies, Mark T. Smith. Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming. Journal of Materials Processing Technology, (211) 2011, pp. 1824–1833.

[4] Golovashchenko S., Mamutov V. Electrohydraulic Forming of Automotive Panels. Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries. Proc. of TMS. San Francisco, 2005, pp. 65–70.

[5] Bonnen, J. J.F., Golovashchenko, S. F., Dawson, S. A., Mamutov, A. V. and Gillard, A. J. (2012) Electrohydraulic Sheet Metal Forming of Aluminum Panels, in Light Metals 2012 (ed C. E. Suarez), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.

[6] Mamutov A.V., Mamutov V.S. Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming / In International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPIE Vol. 6297. Olsztyn Poland, 2007, pp. OY1–OY5.

[7] Головащенко С.Ф. Применение комплекса LS-DYNA для расчета канала разряда при электрогидроимпульсной штамповке / С.Ф. Головащенко, А.В. Мамутов, В.С. Мамутов // Научно-технические ведомости СПбГПУ – Сер.: Наука и образование. 2012. №2 – 1 (147). – С. 116–121.

[8] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.

[9] Arbitrary Lagrangian and Fluid-Structure Interaction. Numerical Simulation. Edited by Mhamed Souli, David J. Benson. ISTE, Great Britain and the United States, 2010, 295 p.

[10] Головащенко С.Ф. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 / С.Ф. Головащенко, А.В. Мамутов, В.С. Мамутов // Металлообработка, № 4 (69)/2012. – С. 23–29.

[11] Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen, Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219, pp. 84-100 (2015)
[12] Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М: Наука, 1971. – 155 с.
[13] Коул Р. Подводные взрывы. М.: Из-во Иностранной литературы, 1950. – 494 с.
[14] Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбСПУ, 2014, 1 (190), с. 101 – 107.
[15] Мамутов В. С., Арсентьева К.С. Электрогидроимпульсная вытяжка в закрытую матрицу с плоским дном при различных параметрах нагружения заготовки. Сб. «Современное машиностроение: наука и образование MMESE-2018», материалы 7-й Международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018, с. 569–579.

X.S.Arsentyeva, I.V. Kalatozishvili, V.S.Mamutov,

THE EFFECT OF WORKPICE COMPLIANCE ON THE PRESSURE IN THE DISCHARGE CHAMBER AT ELECTROHYDROIMPULSE STAMPING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper evaluates the effect of workpice compliance on the pressure in a small volume discharge chamber at electrohydroimpulse stamping. A three-dimensional model of the process hath applied taking into account the hydromechanics of a compressible fluid interacting with a deformable sheet metal workpice, a plasma channel with injected electrical energy. To build a computer model, the LS-DYNA code has used, which allows using the Lagrangian-Eulerian algorithm in conjunction with Multi-Material and FSI techniques. The significant influence of the compliance of the sheet metal workpiece on the pressure in the discharge chamber has shown which it is desirable to take into account when designing appropriate technological processes.

Key words: electrohydroimpulse stamping, small volume chambers, LS-DYNA finite element code, three-dimensional model of compressible fluid hydromechanics, plasma discharge channel, deformable sheet metal workpiece, effect of workpice compliance on pressure.

REFERENCES

[1] Yutkin L.A. Electrohydraulic effect and its application in industry. – L.: Mechanical Engineering, 1986. – 254 p. (rus.)

[2] Gulyy G.A. High-voltage pulse discharge in power pulse systems / G.A. Gulyy, P.P. Malyushevsky. – Kiev: Naukova Dumka, 1977. 176 p. (rus.)

[3] Aashish Rohatgi, Elizabeth V. Stephens, Ayoub Soulami, Richard W. Davies, Mark T. Smith. Experimental characterization of sheet metal deformation during electro-hydraulic forming. Journal of Materials Processing Technology, (211) 2011, pp. 1824–1833.

[4] Golovashchenko S., Mamutov V. Electrohydraulic Forming of Automotive Panels. Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries. Proc. of TMS. San Francisco, 2005, pp. 65–70.

[5] Bonnen, J. J.F., Golovashchenko, S. F., Dawson, S. A., Mamutov, A. V. and Gillard, A. J. (2012) Electrohydraulic Sheet Metal Forming of Aluminum Panels, in Light Metals 2012 (ed C. E. Suarez), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.

[6] Mamutov A.V., Mamutov V.S. Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming / In International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPIE Vol. 6297. Olsztyn Poland, 2007, pp. OY1–OY5.

[7] Golovashchenko S.F. Application of the LS-DYNA complex for simulation the discharge channel during electrohydroimpulse stamping / S.F. Golovashchenko, A.V. Mamutov, V.S. Mamutov // Scientific and Technical Bulletin of SPbPU - Ser.: Science and Education. 2012. №2 – 1 (147). – P. 116-121. (rus)

[8] Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006, 498 p.

[9] Arbitrary Lagrangian and Fluid-Structure Interaction. Numerical Simulation. Edited by Mhamed Souli, David J. Benson. ISTE, Great Britain and the United States, 2010, 295 p.

[10] Golovashchenko S.F. Methodology of computer simulation of electrohydroimpulse shaping of sheet metals using the LS-DYNA 971 code

/ S.F. Golovashchenko, A.V. Mamutov, V.S. Mamutov // Metalloobrabotka, № 4 (69)/2012. P. 23-29. (rus)
[11] Alexander V. Mamutov, Sergey F. Golovashchenko, Viacheslav S. Mamutov, John J.F. Bonnen, Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 219, pp. 84-100 (2015)
[12] Naugolnykh K.A. Electric discharges in water / K.A. Naugolnykh, N.A. Roy. – M: Nauka, 1971. – 155 p. (rus)
[13] Cole R. Underwater explosions. M.: From Foreign Literature, 1950. – 494 p. (rus)
[14] Mamutov A.V., Mamutov V.S. Modeling of electrohydroimpulse sheet forming using LS-DYNA code // Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU, 2014, 1 (190), pp. 101 – 107. (rus)
[15] Mamutov V. S., Arsentieva K.S. Electro-hydraulic drawing in closed die with a flat bottom under different loading parameters. Collection "Modern mechanical engineering: science and education MMESE-2018", materials of the 7th International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2018, p. 569-579. (rus)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование:
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

Д.Д. Мохоров[1], Ю.Ю. Денисова[2], Д.Л. Ищук[3], А.А. Фогель[4], М.О. Новомлинский[5], С.В. Кочемировская[6], В.А. Кочемировский[7]

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА СТЕКЛООБРАЗНЫХ И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

[1] Даниил Дмитриевич Мохоров,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (964)329-3618, E-mail: dan.mokhorov@gmail.com

[2] Денисова Юлия Юрьевна
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (921)764-7992, E-mail: denisovaulia1999@gmail.com

[3] Ищук Диана Леонидовна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (952)394-6157, E-mail: ishchukdl@yandex.ru

[4] Алена Александровна Фогель,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (981)785-0108, E-mail: alena.fogel22@gmail.com

[5] Новомлинский Максим Олегович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905)279-7238, E-mail: ooc41hmo@mail.ru

[6] Кочемировская Светлана Валерьевна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)847-4970, E-mail: svetlanav.fokina@gmail.com

[7] Кочемировский Владимир Алексеевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (911)225-1286, E-mail: vako4@yandex.ru

Аннотация

В работе предложен перспективный метод создания наноразмерных биосенсоров. На различных непроводящих поверхностях получены осадки следующих металлов: Co (II), Ni, Fe, Zn. Исследованы морфология осадков и их проводимость в зависимости от материала подложки. Наилучшей поверхностью для лазерного синтеза определен стеклоситалл СТ-50-1, который с одной стороны, инертен и устойчив к внешним воздействиям, является хорошим диэлектриком и изолятором, с другой стороны, в фокусе лазерного луча проявляет высокую каталитическую активность к реакциям восстановления многих металлов, в первую очередь, меди.

Ключевые слова: лазерное осаждение, нанокатализаторы, биосенсоры, стеклоситалл.

Введение

Создание наноматериалов для сенсорной техники является одной из самых востребованных задач в современной химии. Одним из новых направлений в этой области является создание мелкоразмерных металлических бесферментных датчиков на компоненты человеческой крови – глюкозу и перекись водорода. Детектирование целевых компонентов в таких датчиках основано на электрохимических принципах, а способы создания варьируются. Широко применяются методы органического и неорганического синтеза, вакуумные технологии и лазерный синтез. Последний способ представляется одним из самых перспективных, поскольку технологически прост, экологически безопасен и позволяет широко варьировать набор компонентов сенсорно-чувствительного слоя, позволяя создавать широкий набор датчиков [1, 2, 3].

Микрокомпозитные гетерофазные наноматериалы позволяют создавать микроразмерные сенсоры для определения компонентов человеческой крови в микроследах.

Эффективность лазерного осаждения наноосадков металла из водных растворов их солей, выражающаяся в параметрах электропроводности и

сенсорной активности (чувствительность, селективность) полученных осадков определяется двумя факторами:

1. Морфологией подложки (материала на который происходит осаждение) [4, 5]

2. Строением растворимого комплекса осаждаемого металла из раствора [6].

В первом случае показано, что наилучшей основой для электрохимических микросенсоров являются гетерофазные подложки, одна из фаз которых является стеклообразной, а другая – кристаллической. Во втором случае показано, что наилучшими сенсорными свойствами обладают структуры, образованные биметаллическими комплексами в растворе, например [6].

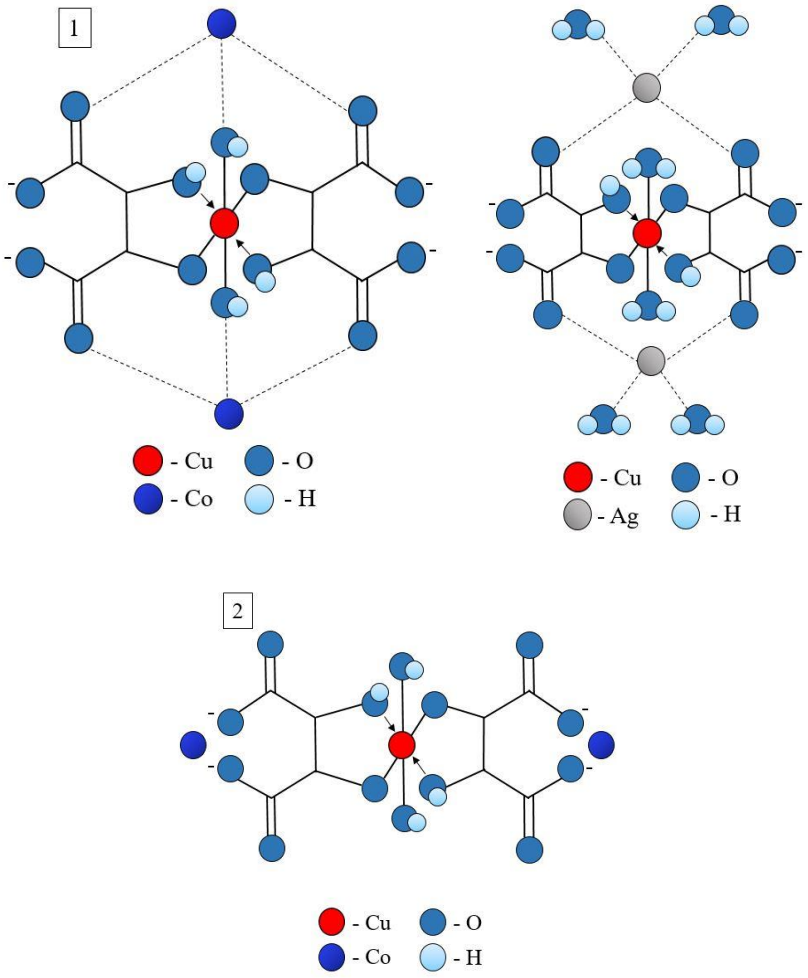


Рис. 1. Биметаллические тартратные комплексы медь-кобальт и медь-серебро [6].

Известно большое количество работ, связанных с высокой каталитической активностью поверхности, и активных центров, расположенных на ней. Высокая каталитическая активность может зависеть, от следующих факторов [7]:

а) от присутствия особых связывающих центров (т. е. d-орбиталей, кислотных или основных центров)

б) от существования молекул и структурных единиц, которые могут принимать участие в электронном обмене

в) от наличия доноров и акцепторов электронов в случае протекания окислительно-восстановительных процессов.

Лазерное осаждение на стеклокристаллические фазы опирается на то, что двойные центры, образованные близко расположенными кислотным и основным центрами, являются каталитически активными в реакциях окисления-восстановления металлов. Неоднородность служит причиной возникновения центров, которые обладают одним из двух (или сразу двумя) характерными свойствами: а) очень большим (или малым) значением электростатического потенциала и б) ориентацией орбиталей, особо благоприятной с точки зрения реакции с адсорбатом [8, 9, 10].

Поверхностные центры ведут себя как катализатор химических реакций, снижая энергию активации процессов, которые затруднены при обычных условиях. В случае лазерно-индуцированного осаждения металлов из раствора мы сталкиваемся с катализом, протекающим на кластерах металла, образованного в результате процессов, происходящих при высоких температурах.

В настоящей работе использованы следующие материалы диэлектрических подложек: поликристаллический оксид алюминия, оксидное стекло на основе диоксида кремния, стеклотекстолит, состоящий из стеклообразных кварцевых волокон, упакованных в фенолформальдегидную или эпоксидную полимерную матрицу и стеклокерамика Ситалл Ст-50, состоящая из оксидов алюминия и кремния распределенных в матрице силикатного стекла, которая как раз представляет собой поверхность, содержащую многочисленные кислотные и основные центры. [11] «Кислотные» и «основные» центры на языке физики соответствуют дефектам «акцепторного» и «донорного» типа, т.е. дефектам, способным заряжаться соответственно отрицательно или положительно [12]. Окислы металлов, в объеме которых степень окисления катионов может меняться на единицу (например, CuO-Cu2O) очень распространены в качестве активных катализаторов окисления [7].

Бинарные диаграммы состояний Co (II), Ni, Fe, Zn в системе «металл-медь» соответствуют различным типами диаграмм состояния. Система медь-никель аналогична системе медь-золото (полная взаимная растворимость компонентов). Диаграмма медь-никель характеризуется

большим количеством соединений, диаграммы медь-железо, медь-серебро и медь-кобальт представляют собой диаграммы эвтектического типа, но диаграмма медь-железо имеет широкие поля образования твердых растворов (до 20%), в отличие от медь-серебро и медь-кобальт (3-6 %) [13-17]. С точки зрения возможности образования гетерофазного осадка, обладающего большой поверхностной концентрацией донорно-акцепторных центров, наиболее предпочтительными металлами являются, например серебро и кобальт, образующие с медью диаграммы эвтектического типа. В настоящей работе приведены примеры того, как сочетание двух факторов позволяет создавать новые сенсорно-активные наноматериалы для криминалистической и судебно-медицинской техники в области разработки индикаторов следов и состава крови в микропробах биологических и природных материалов, а, также, иных областях криминалистики, требующих усиления поверхностного сигнала сенсорного слоя [18-20].

Методы

Для исследования был выбран ряд хлоридов металлов: Co (II), Ni, Fe, Zn (таблица 1). Хлориды добавлялись в раствор хлорида меди

Таблица 1. Состав растворов для лазерно-индуцированного соосаждения меди с добавками хлоридов металлов

Компонент		***Концентрация, М***
Основные компоненты	Источник меди: $CuCl_2$ Лиганд: тартрат натрия-калия Регулятор кислотности: NaOH	0,01-0,02 0,033 0,075-0,1
Добавки	Хлориды металлов (Fe(III), Co (II), Ni, Zn)	10^{-4}-10^{-2}

В случае серебра осаждение производилось из нитратного раствора, так-как хлорид серебра нерастворим (табл. 2).

Таблица 2. Состав растворов, LCLD в системе медь-серебро не содержащих хлорид.

C($Cu(NO_3)_2$), M	C($AgNO_3$), M	C(KNaTar), M
0,01	0,01	0,04-0,05

Сканирование поверхности стеклообразного материала в растворе для лазерного осаждения лазерным лучом проводилось с помощью 1DOS имеющего габариты 300 X 400 X 545 мм и позволяющего проводить сканирование в диапазоне мощностей 100 – 10 000 мВт со скоростью до10 000 мм/сек/ с длиной волны 1064 нм. Длина металлических треков,

синтезированных с помощью метода лазерно-индуцированного осаждения составляла 10-12 мм. Реакция инициировалась при мощности лазерного излучения в 300 мВт.

Полученные структуры были исследованы с помощью методов оптической и электронной микроскопии, вольтамперометрии и импедансной спектроскопии

Диапазон выбранных концентраций добавок обусловлен их растворимостью и удобством приготовления растворов, и дает нам, тем не менее, довольно широкий интервал исследуемых концентраций.

Оптическая микроскопия. проведена с помощью оптического металлографического микроскопа марки МикМед-6. Наблюдения проводились при 10, 20 и 40 – кратном увеличении.

EDX-анализ микроструктуры образцов и качественный анализ проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss Supra 40VP с полевым (Field Emission) катодом, колонной электронной оптики GEMINI и полностью безмаслянной вакуумной системой с режимом работы на низком вакууме (VP). Аналитические возможности микроскопа представлены дополнительной приставкой для рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCAx-act.

Измерения сопротивления на переменном токе и амперометрические измерения в электрохимических ячейках проводились на импедансметре и потенциостате фирмы « Элинс», диапазон частот 20 Гц–2 МГц, амплитуда сигнала 125 мВ. Для обработки полученных результатов была использована программа Z-Veiw2.

Для измерений была использована ячейка, работающая по двухэлектродной схеме.

Растворы, имитирующие человеческую кровь с различными содержаниями глюкозы приготавливались из раствора 1 г кровяной сыворотки, растворенной в 10 мл дистиллированной воды с добавлением 0,1 мл фосфатного буфера (pH=7,4) и последовательным добавлением различных количеств 0,01 м. водного раствора глюкозы.

Результаты

Осаждение проводилось на однофазные подложки из стеклообразного SiO_2, 100% Al_2O_3 и ситалла СТ-50 (гетерофазная стеклокерамика, состоящая из смеси оксидов кремния, алюминия и др.).

Морфология медного осадка, осажденного на Al_2O_3 из любых водных растворов, с помощью лазера, отличается низким качеством, независимо от состава раствора. Осажденные структуры не проводят электрический ток, имеют прерывистый характер, размытые края, многочисленные дефекты

медного слоя. Количество осажденного металла по количеству незначительно и слабо визуально различимо (рис.2)

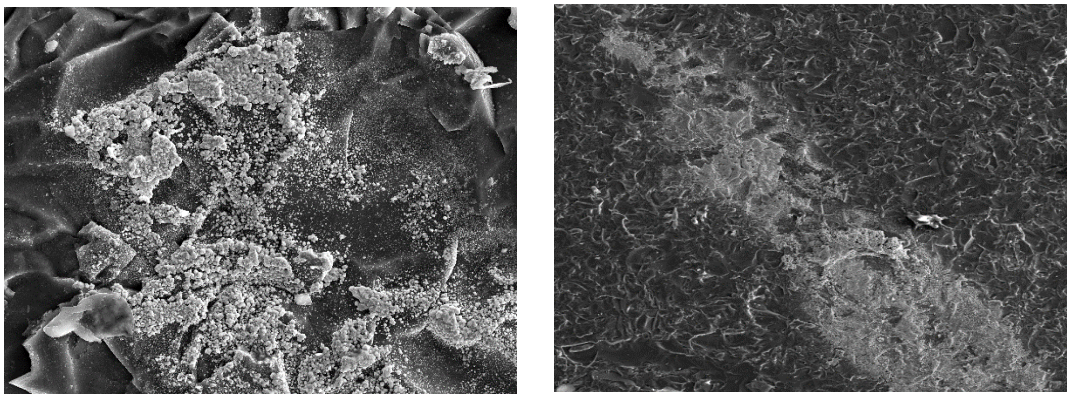


Рис. 2. Морфология медного осадка на поверхности поликристаллического оксида алюминия.

Осаждение на поверхность силикатного стекла протекает значительно более интенсивно, чем на поверхность оксида алюминия. Осадки имеют характер отчетливо выраженных пористых структур с невысокой монолитностью, но, в ряде случаев, способны проводить постоянный и переменный ток, активное электрическое сопротивление трека длиной 1 см может составлять величину в несколько тысяч Ом (рис.3).

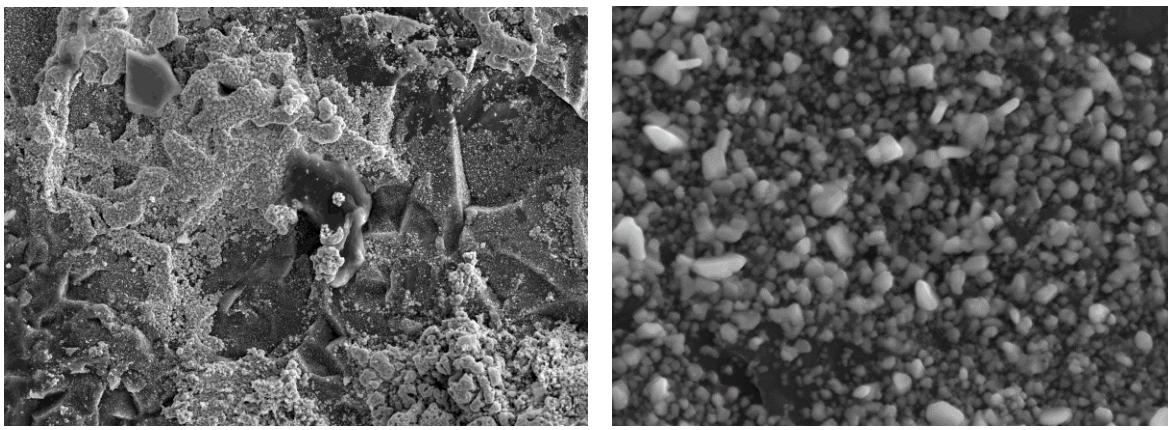


Рис. 3. Морфология медного осадка на поверхности силикатного стекла.

Ситалл СТ-50-1 является подложкой, на которой получены наилучшие результаты лазерно-индуцированного осаждения с точки зрения морфологии, непрерывности и электрического сопротивления металлических осадков. Осадки, образующиеся на Ситалле являются плотноупакованными, монолитными, т. е обладают хорошей топологией, с высокоразвитой поверхностью. Электрическое сопротивление таких осадков стабильно во времени может достигать величины десятых долей Ома на треке длиной 1 см. Структура осадка, т.е геометрия и дисперсность микрокристаллов меди, формирующих осадок, зависит от выбора металла

добавки. В случае добавок хлорида кобальта это осадки, сформированные крупными кубическими кристаллами (размерами до 200 мкм), которые образуют пористые структуры вследствие того, что соприкасаются друг с другом преимущественно гранями и ребрами. В случае добавок хлорида никеля в результате осаждения из раствора и из геля формируются более монолитные структуры.

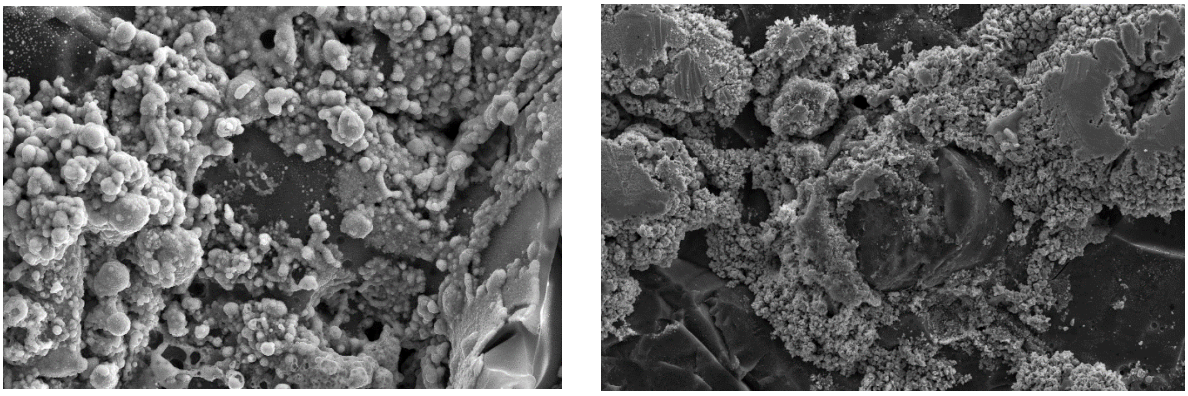


Рис. 4. Морфология медного осадка на поверхности Ситалла СТ-50-1.

Обсуждение

Механизм влияния фазового состава стекломатериала на электрические свойства и морфологию осадков показан на рис. 5. Левая часть дорожки (Рис. 5 а) осаждена на двухфазной поверхности в виде плотного монолитного слоя с качественной топологией, напротив, правая часть (рис. 5 б), осажденная на однофазной - имеет многочисленные дефекты. Таблица 3 показывает различие элементного состава треков осажденных на однофазной и двухфазной области. Такой результат позволяет предположить, что осаждение на гетерофазные материалы значительно увеличивает скорость осаждения за счет увеличения количества активированных центров поверхности на границах раздела фаз.

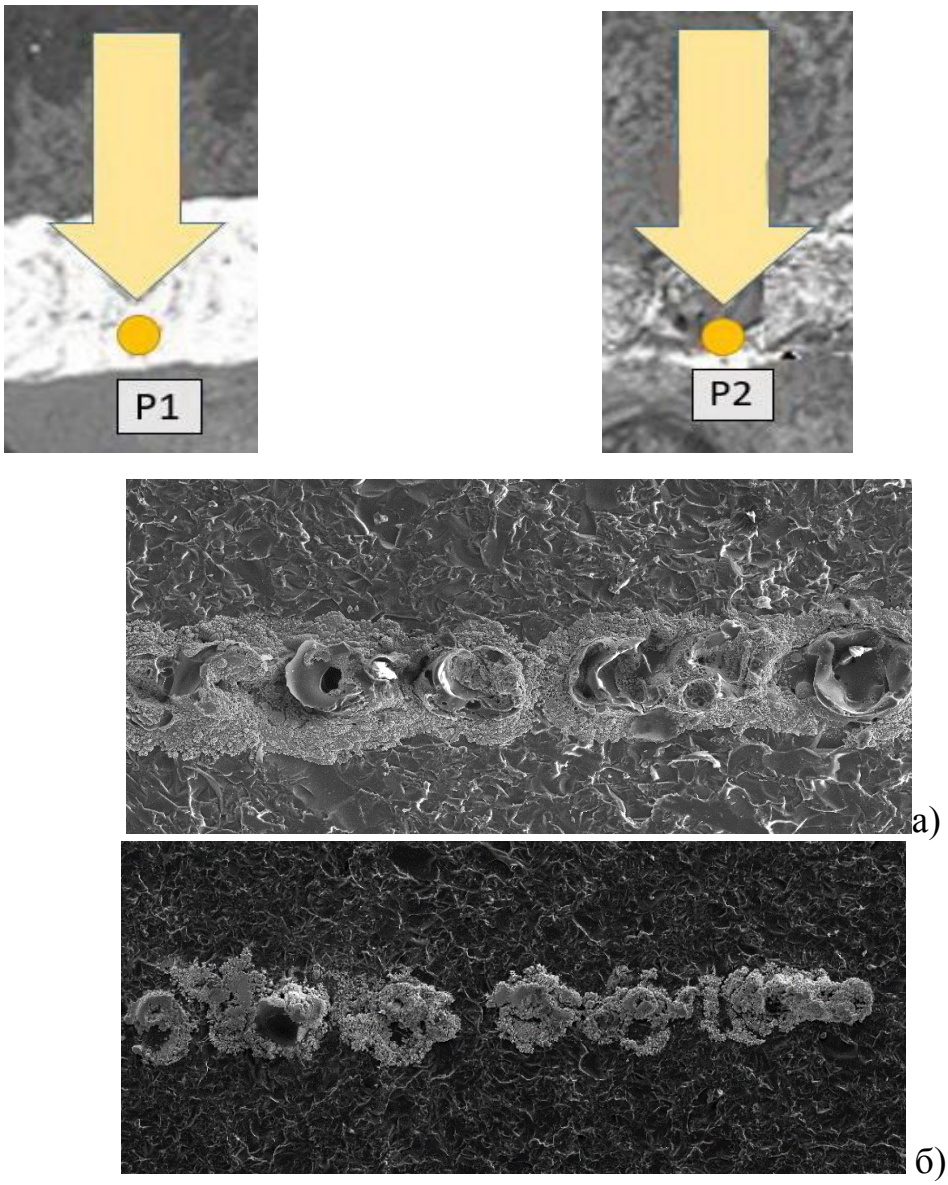


Рис. 5. Морфология медных треков, осажденных на гетерофазную стеклокристаллическую поверхность Ситалла СТ-50-1 (а) и однофазную поверхность кварцевого стекла (б).

Таблица 3. Элементный состав треков, осажденных на однофазной и двухфазной области подложки.

Spectrum	O	Si	Cl	Ti	Cu
Spectrum P1	15.35	0.90	1.21		50.10
Spectrum P2	33.86	1.16	0.22	0.44	11.45

Данные о морфологии осадков подтверждаются импедансными исследованиями электропроводности медных треков. На рис.6 а, б, в, приведены годографы импеданса микротреков меди осажденных на ситалле СТ 50-1 (а), стеклообразном SiO_2 (б) и поликристаллическом Al_2O_3 (в). Активная составляющая проводимости 10 мм медного трека на ситалле СТ 50-1 исчисляется десятыми долями ома. Емкостная составляющая, скорее всего, представлена контактными явлениями измерительной ячейки.

При осаждении на стеклообразный SiO_2 (рис. 6, б) активная составляющая возрастает примерно на 5 порядков. Это, по-видимому, связано с низкой монолитностью осадка и появлением зон межкристаллического контакта, а, также, возможно, появлением микроучастков проводимости по стеклофазе.

Осаждение на Al_2O_3 (рис. 6, в) показывает доминирование емкостной составляющей в электропроводности осадка.

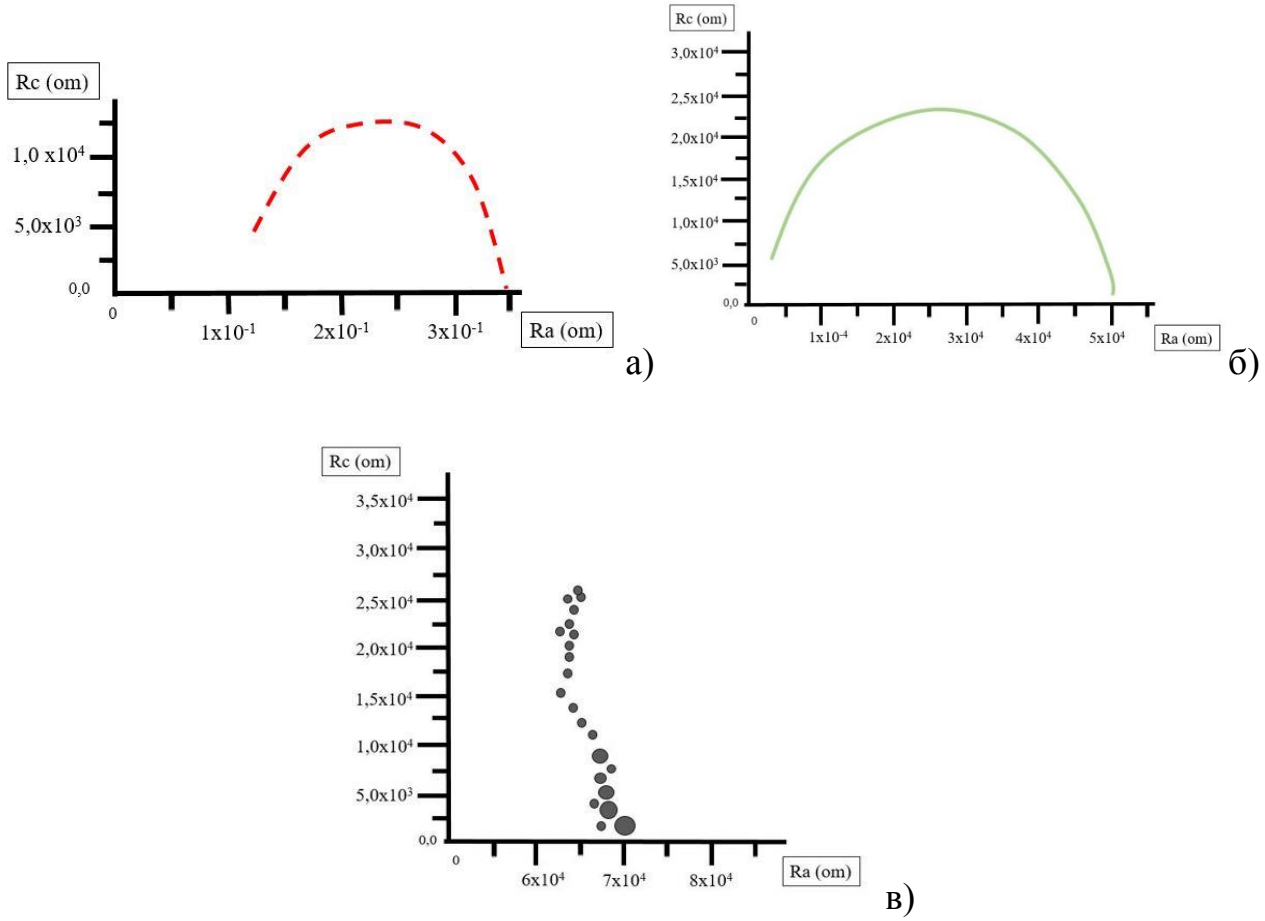


Рис. 6. Годографы импеданса медных осадков, полученных лазерным осаждением на Ситалл СТ-50-1 (а), стеклообразный SiO_2 (б) и поликристаллический Al_2O_3 (в).

Таким образом, треки, полученные на стеклокерамике, имеют сопротивление близкое по значению к сопротивлению чистой меди в отличие от ранее полученных плохо проводящих или непроводящих дорожек на поверхности стекла на основе диоксида кремния и оксида алюминия. Это предопределяет их выбор в качестве сенсорно-чувствительного элемента бесферментного сенсора компонентов крови. Для целей дальнейшей интерпретации результатов проведен контрольный эксперимент по осаждению медных структур на полимерное связующее, нанесенное на стекловолокнистый каркас СТЭФ-1 (фенолформальдегидную или эпоксидную смолу). В результате эксперимента осажденные треки меди не обладали качественной морфологией, по данным оптической микроскопии, не имели медного блеска, но изучение электрических свойств осажденных треков показало, что полученные значения активного электрического сопротивления осадка составили величину порядка 1.8 Ом на линейный сантиметр, что, по приблизительной оценке, дает величину близкую к удельному сопротивлению чистой меди.

На основании данных электронной микроскопии и EDX-спектров (рис. 7) видно, что осадок представляет собой сферы из силикатного стекла, покрытые слоем меди. По-видимому, в фокусе лазерного луча силикатное стекло, которым армирован стеклотекстолит, плавится, в результате чего осаждение меди происходит в виде тонкого слоя на границе раздела двух несмешивающихся фаз, стеклообразной и полимерной.

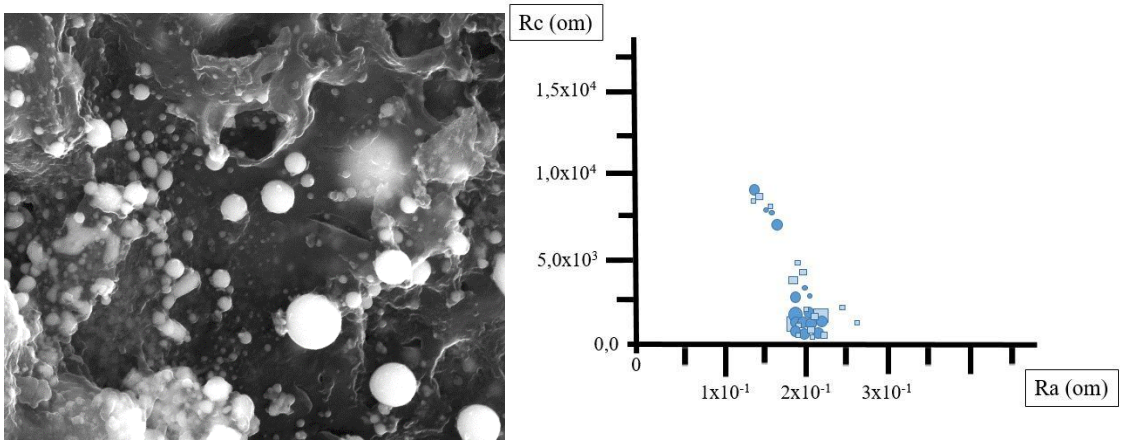


Рис. 7. Результаты лазерного осаждения меди на поверхность стеклотекстолита СТЭФ-1

С учетом полученных результатов дальнейшие исследования проведены на поверхности стеклокерамики, представляющей собой композитный сплав, состоящий из стеклофазы и поликристаллических включений.

Для усиления сенсорной активности медьсодержащих осадков, осаждение проводилось из растворов содержащих, одновременно хлорид меди и хлорид металла-добавки Zn, Ni, Fe, Co и Ag. В случае последнего, осаждение производилось из раствора нитратов, поскольку хлорид серебра нерастворим в водных средах. Исследования показал, что введение в раствор хлорида меди хлоридов иных металлов проводит, как правило, к немонотонному увеличению проводимости осадков, за исключением нитратной системы. Первые добавки существенно понижают проводимость, далее происходит постепенный ее рост, как показано на рис. 8. Т.е вводя в раствор для лазерного осаждения иные металлы можно управлять электрическими параметрами осажденных треков за исключением $AgNO_3$.

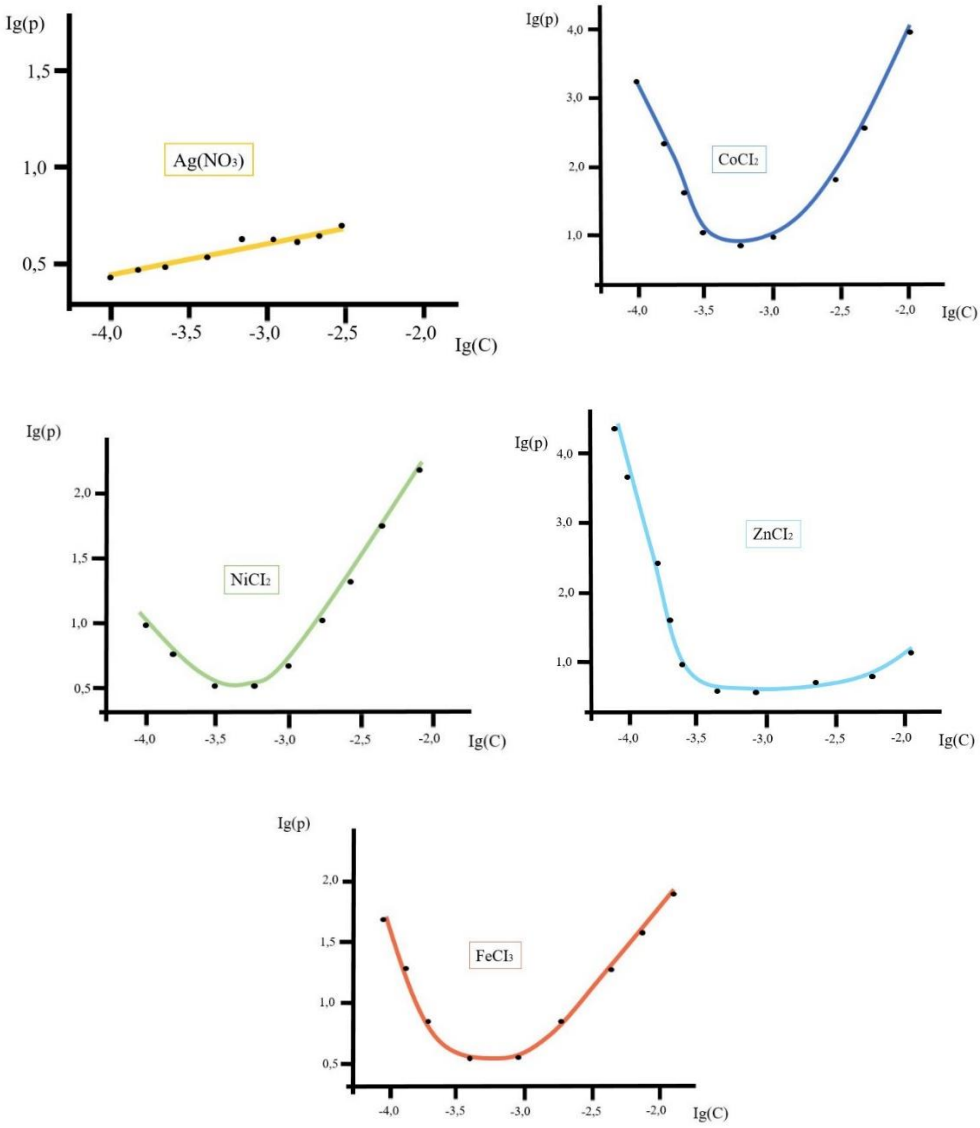


Рис. 8. Концентрационные зависимости проводимости осадков на основе меди при изменении концентрации металла-добавки в растворе для лазерного осаждения.

Рентгенограммы осадков показывают, что их структурной основой осадков является медь. На рентгенограммах систем Cu- Zn, Ni, Fe индивидуальные пики металла добавки отсутствуют, характеристические пики меди незначительно смещены что является признаком образования твердых растворов на основе меди. Это согласуется с данными диаграмм состояния систем [12-16]. В эвтектических системах типа Cu-Co, Ag в интервале углов 2Ѳ от 40 до 80 можно наблюдать неинтенсивные пики фаз кобальта и серебра, как это показано на рис.9 и 10.

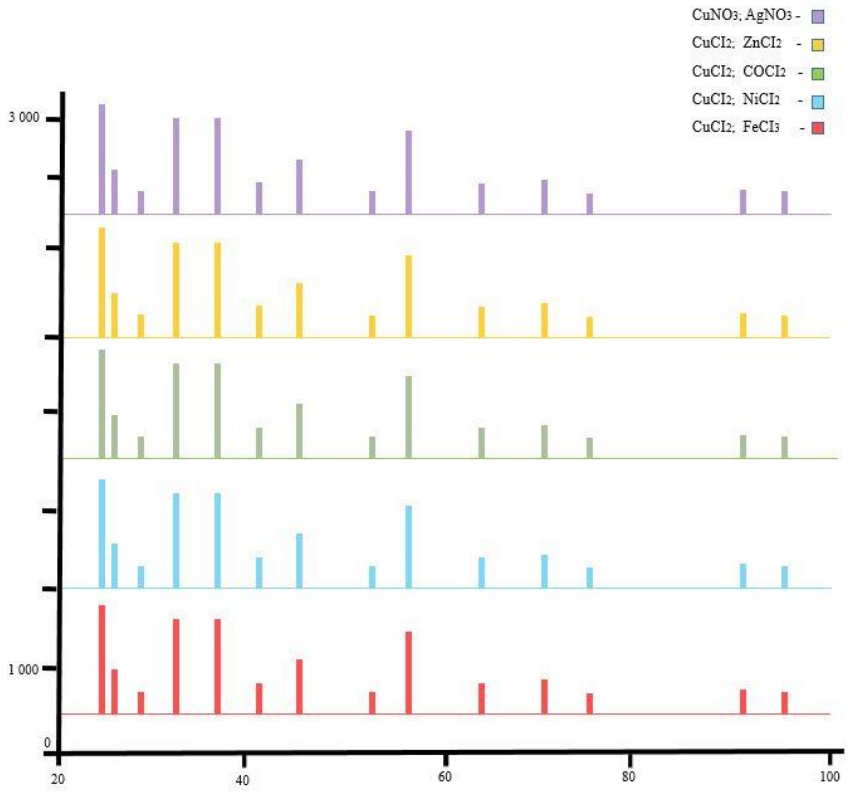


Рис. 9. Рентгенограммы биметаллических осадков на основе меди с добавлением Zn, Ni, Fe, Co, Ag , полученных методом лазерно-индуцированного осаждения из раствора на стеклокристаллическую подложку при изменении концентрации металла-добавки в растворе для лазерного осаждения.

Такой результат согласуется с предположением о том, что фазовый состав образующегося микроосадка не зависит от свойств прекурсоров и строения комплексов в водном растворе, используемых для осаждения, а, в первую очередь, определяется типом бинарных диаграммам состояния соответствующих металлов.

Более детальный анализ рентгенограмм показывает, что в составе треков имеется кристаллическая фаза, содержащая оксиды металлов (Рис. 10). Возможно, что контактные явления на границах зерен «металл-оксид»

могут способствовать увеличению электрокаталитической активности трека в сенсорных элементах.

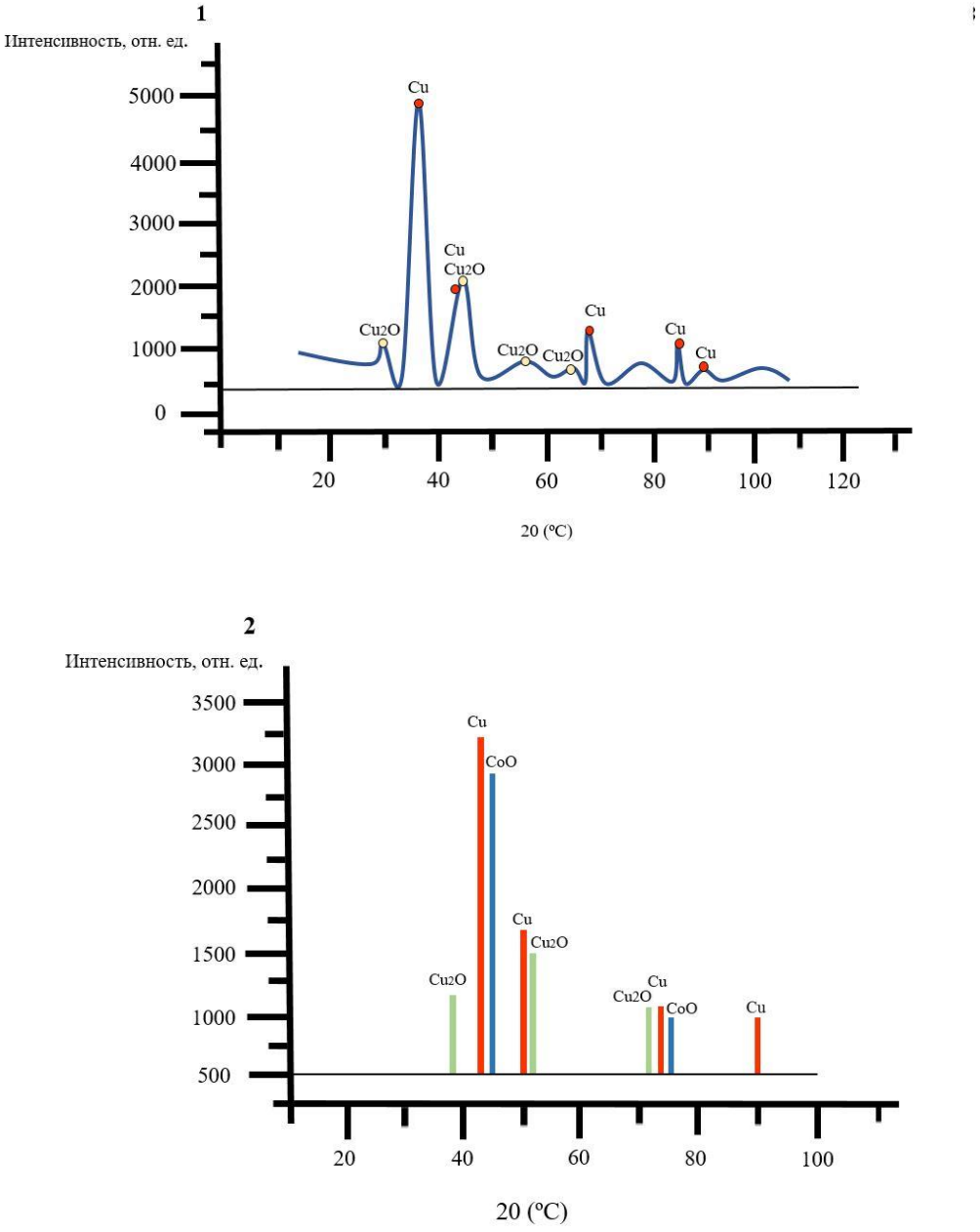


Рис. 10. Сравнение результатов рентгенофазового анализа медно-кобальтовых и медно-никелевых осадков.

Сенсорная активность по отношению к компонентам крови (глюкозе) тестировалась на осадке системы Cu-Co. Выбор системы основан на результатах тестирования микротреков, показанных на рис.8.

Микротреки Cu-Co демонстрируют наибольшую амплитуду изменения параметров электропроводности треков в зависимости от состава раствора для осаждения, т.е. позволяют наиболее эффективно управлять параметрами сенсорной активности. Результаты тестирования датчиков приведены на рис. 11.

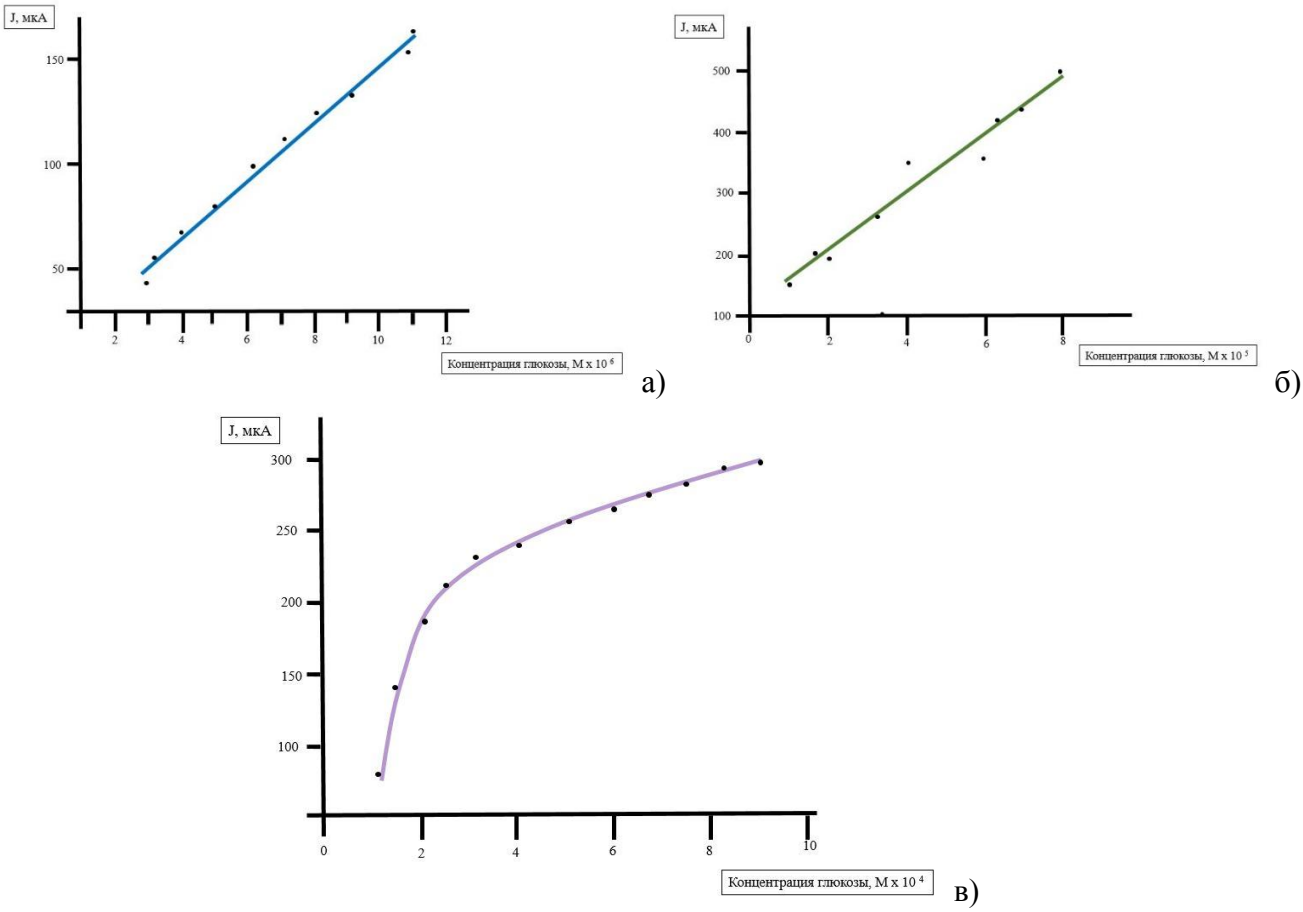


Рис. 11. Результаты тестирования сенсорной активности медно-кобальтовых микротреков в отношении глюкозы, в ячейке, имитирующей состав человеческой крови.

Датчики представляли собой пластину Ситалла СТ-50-1 размером 0,3Х0,3 см с осажденным медно-кобальтовым треком длиной 1 мм. Электрические подводящие контакты трека были изолированы полимерными изоляторами. Поверхность датчика приводилась в соприкосновение с поверхностью раствора-имитатора крови в электрохимической ячейке для вольтамперометрических измерений. Результаты тестирования показали, что в области низких концентраций D-глюкозы (10-5 – 10-6 М), рис. 11 а, б наблюдается линейная зависимость тока от концентрации. При увеличении концентрации (рис. 11, в) линейность нарушается.

Заключение.

Применение современных лазерных технологий для создания элементов микроэлектроники стало мировым трендом [4]. Среди много численных альтернатив, лазерно-индуцированное осаждение является наиболее технологичным методом, поскольку позволяет автоматизировать все операции, имеет низкую трудоемкость и высокую экологическую чистоту.

Управление процессами лазерного осаждения идет по двум направлениям: выбор оптимальных поверхностей для синтеза наноматериалов и оптимальный состав растворов для лазерного осаждения. Настоящая работа показала, что в основе обоих процессов лежит принцип гетерофазности материала. Т.е. осаждение проводящих треков эффективнее всего идет на гетерофазных поверхностях, а наивысшей сенсорной активностью обладают гетерофазные треки.

На сегодняшний день наилучшей поверхностью для лазерного синтеза определен стеклоситалл СТ-50-1, который с одной стороны, инертен и устойчив к внешним воздействиям, является хорошим диэлектриком и изолятором, с другой стороны, в фокусе лазерного луча проявляет высокую каталитическую активность к реакциям восстановления многих металлов, в первую очередь, меди. Легкость в обработке дает возможность серийно производить на его основе микроскопические сенсоры, в том числе, для криминалистических целей с использованием лазерных технологий нанесения покрытий и треков различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Куликов, Д.Д., Яблочников, Е.И., Абышев, О.А., Чукичев, А.В. Проектирование технологических процессов в инвормационно-управляющей среде. 2021. СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ. НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (Санкт-Петербург)

[2] Kochemirovsky, V., Ermakov, S., etc. In situ laser-induced codeposition of copper and different metals for fabrication of microcomposite sensor-active materials. 2018. Analytica Chimica Acta Volume 1044, 31, Pages 138-146.

[3] Kochemirovsky, V., Kochemirovskaya, S., etc. Laser method of microscopic sensor synthesis for liquid and gas analysis using glucose and H2S as an example. 2019. Journal of Solid State Electrochemistry volume 23, pages3173–3185.

[4] Логунов, Л.С., Бальмаков, М.Д., Кочемировский, В.А. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОРФОЛОГИЮ ПРОДУКТА ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ. 2016. Физика и химия стекла. Т. 42. № 2. С. 306-308.
[5] Кочемировский, В.А., Скрипкин, М.Ю., Тверьянович, Ю.С., Мерещенко, А.С., Горбунов, А.О., Панов, М.С., Тумкин, И.И., Сафонов, С.В. ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ ИЗ ВОДНЫХ И ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. 2015. Успехи химии. Т. 84. № 10. С. 1059-1075.
[6] Kochemirovskaia, S.V., Myund, L.A., etc. Structure of bimetallic tartrate complexes for the rapid formation of new non-enzymatic bimetallic sensors of glucose and hydrogen peroxide in aqueous solutions using laser synthesis. 2022. Materials LettersVolume 306, 1, 130973.
[7] Tanaka, K., Tamaru S. Acid-base Concept and Catalytic Activity of Oxides. 1964. Bulletin of the Chemical Society of Japan. Vol. 37. – P. 1862-1865.
[8] Sanderson, R. T. 1960. Chemical Periodicity, Reinhold, New York.
[9] Wilmshèrst, I.K., The sensitive ammine frequencies and electronegativities of complex transition metal ion radicals. 1960. Canadian Journal of Chemistry. V 38, P. 467-472.
[10] Giles, R.D., Harrison, J.A., Thirsk H.R. Anodic dissolution of silver and formation of Ag_2O in hydroxide solutions using single crystal electrodes a faradaic impedance study. 1969. Journal of Electroanalytical Chemistry. V. 22, P. 375-388.
[11] Olshin, P. K., Povolotskiĭ, A. V., Man'shina, A. A., Markov, V., Sokolov, I. Optic properties of niobium-phosphate glasses containing lithium, sodium, and potassium oxides. 2017. Glass Physics and Chemistry volume 43, pages294–297.
[12] Grujicic, D., Pesic, B. Reaction and nucleation mechanisms of copper electrodeposition from ammoniacal solutions on vitreous carbon. 200. Electrochimica Acta. V. 50. P. 4426–4443.
[13] Хачатурян, А.Г. Теория фазовых превращений и структура твѐрдых растворов. 1974 М.: Наука, – 384 с.
[14] Банных, О. А., Будберг, П.Б., Алисова, С. П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. 1986. М. Металлургия, 440 с.
[15] Иванов, В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. 1990. М.: Машиностроение, 384 с.
[16] Под ред. Шухардина, С.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. 1979. М Наука, 248 с.

[17] Лякишев, Н.П., Банных, О.А., Рохлин Л.Л. и др., Диаграммы состояния двойных металлических систем(справочник). 1996. М.Машиностроение, Т1, 992 с.
[18] Łydzba-Kopczynska, B., Czaja T., Ciesla R., Rusek G. Application of chemometric methods for the determination of fading and age determination of blue ballpoint inks. 2021. Journal of Raman Spectroscopy.52, 1, 159-169.
[19] Bhatt, P.V., Pandey, G., Tharmavaram, M., Rawtani, D., Hussain, Ch. M. 2020. Nanotechnology and Taggant Technology in Forensic Science. Wiley Online Library, chapter 14.
[20] Mallick, S. Singh, K.R.B., Nayak, V., Singh, J., Singh, R.P. Potentialities of core-shell nanomaterials for biosensor technologies. 2022. Materials Letters, 2022 Volume 306, 1,130912.

D.D. Mokhorov, Yu.Yu. Denisova, D.L. Ischuk, A.A. Vogel,
M.O. Novomlinsky, S.V. Kochemirovskaya, V.A. Kochemirovsky

FORMATION OF INFORMATION CULTURE OF STUDENTS IN THE STUDY OF PROFESSIONAL DISCIPLINES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article proposes a promising method for creating nanosized biosensors. Deposits of the following metals were obtained on various non-conductive surfaces: Co (II), Ni, Fe, Zn. The morphology of deposits and their conductivity are studied depending on the substrate material. The best surface for laser synthesis is glass-ceramic ST-50-1, which, on the one hand, is inert and resistant to external influences, is a good dielectric and insulator, first of all, copper.

Keywords: laser deposition, nanocatalysts, biosensors, glass-ceramic.

REFERENCES

[1] Kulikov, D.D., Yablochnikov, E.I., Abyshev, O.A., Chukichev, A.V., Design of technological processes in an inversion-control environment. 2021. MODERN ENGINEERING. SCIENCE AND EDUCATION. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (St. Petersburg)

[2] Kochemirovsky, V., Ermakov, S., etc. In situ laser-induced codeposition of copper and different metals for fabrication of microcomposite sensor-active materials. 2018. Analytica Chimica Acta Volume 1044, 31, Pages 138-146.
[3] Kochemirovsky, V., Kochemirovskaya, S., etc. Laser method of microscopic sensor synthesis for liquid and gas analysis using glucose and H2S as an example. 2019. Journal of Solid State Electrochemistry volume 23, pages3173–3185.
[4] Логунов, Л.С., Бальмаков, М.Д., Кочемировский, В.А. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОРФОЛОГИЮ ПРОДУКТА ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ. 2016. Физика и химия стекла. Т. 42. № 2. С. 306-308.
[5] Kochemirovskii, V.A., Skripkin, M.Yu., Tveryanovich, Yu.S., Mereshchenko, A.S., Gorbunov, A.O., Panov, M.S., Tumkin, I.I. ., Safonov, S.V. LASER-INDUCED COPPER DEPOSITION FROM AQUEOUS AND AQUEOUS-ORGANIC SOLUTIONS: STATUS AND PROSPECTS OF RESEARCH. 2015. Advances in Chemistry. T. 84. No. 10. S. 1059-1075.
[6] Kochemirovskaia, S.V., Myund, L.A., etc. Structure of bimetallic tartrate complexes for the rapid formation of new non-enzymatic bimetallic sensors of glucose and hydrogen peroxide in aqueous solutions using laser synthesis. 2022. Materials LettersVolume 306, 1, 130973.
[7] Tanaka, K., Tamaru S. Acid-base Concept and Catalytic Activity of Oxides. 1964. Bulletin of the Chemical Society of Japan. Vol. 37. – P. 1862-1865.
[8] Sanderson, R. T. 1960. Chemical Periodicity, Reinhold, New York.
[9] Wilmshèrst, I.K., The sensitive ammine frequencies and electronegativities of complex transition metal ion radicals. 1960. Canadian Journal of Chemistry. V 38, P. 467-472.
[10] Giles, R.D., Harrison, J.A., Thirsk H.R. Anodic dissolution of silver and formation of Ag_2O in hydroxide solutions using single crystal electrodes a faradaic impedance study. 1969. Journal of Electroanalytical Chemistry. V. 22, P. 375-388.
[11] Olshin, P. K., Povolotskiĭ, A. V., Man'shina, A. A., Markov, V., Sokolov, I. Optic properties of niobium-phosphate glasses containing lithium, sodium, and potassium oxides. 2017. Glass Physics and Chemistry volume 43, pages294–297.
[12] Grujicic, D., Pesic, B. Reaction and nucleation mechanisms of copper electrodeposition from ammoniacal solutions on vitreous carbon. 200. Electrochimica Acta. V. 50. P. 4426–4443.
[13] Khachaturyan, A.G. Theory of phase transformations and the structure of solid solutions. 1974 M.: Science, - 384 p.

[14] Bannykh, O. A., Budberg, P. B., Alisova, S. P. et al. State diagrams of binary and multicomponent systems based on iron. 1986. M. Metallurgy, 440 pp.
[15] Ivanov, V. N. Dictionary-reference book on foundry production. 1990. M.: Mashinostroenie, 384 p.
[16] Ed. Shukhardina, S.V. Double and multicomponent systems based on copper. 1979. M Science, 248 p.
[17] [Lyakishev, N.P., Bannykh, O.A., Rokhlin L.L. et al., State Diagrams of Binary Metallic Systems (Handbook). 1996. M. Engineering, T1, 992 p.
[18] Łydzba-Kopczynska, B., Czaja T., Ciesla R., Rusek G. Application of chemometric methods for the determination of fading and age determination of blue ballpoint inks. 2021. Journal of Raman Spectroscopy.52, 1, 159-169.
[19] Bhatt, P.V., Pandey, G., Tharmavaram, M., Rawtani, D., Hussain, Ch. M. 2020. Nanotechnology and Taggant Technology in Forensic Science. Wiley Online Library, chapter 14.
[20] Mallick, S. Singh, K.R.B., Nayak, V., Singh, J., Singh, R.P. Potentialities of core-shell nanomaterials for biosensor technologies. 2022. Materials Letters, 2022 Volume 306, 1,130912.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.01

А. И. Попов[1], Д.А. Строшков[2], К.А. Строшков[3], Д. Н. Пилькевич[4],
Д.С.Фомин[5], М. В. Яковицкая[6], М.М. Радкевич[7]

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

[1]Александр Иннокентьевич Попов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: a.popov@spbstu.ru.

[2]Строшков Дмитрий Анатольевич,
ООО «Аквамарин»
Россия, Екатеринбург
Тел. +7 (912) 245-22-3, E-mail: asmirnow@mail.ru

[3]Строшков Константин Анатольевич,
ООО «НПК «РусПроМет»
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 980-71-60, E-mail: ska@rusprometru.

[4]Пилькевич Дмитрий Николаевич
ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет
Россия, Екатеринбург
Тел. 8-912-236-55-58, e-mail: dpilkevich@yandex.ru

[5]Фомин Даниил Сергеевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: trerer325796@gmail.com

[6]Яковицкая Марина Валентиновна,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: mava1968@gmail.com

[7]Михаил Михайлович Радкевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-93-02, E-mail: radkevich_mm@spbstu.ru

Аннотация

В работе изучается влияние струйной электролитно-плазменной обработки на материалы, полученные селективным лазерным сплавлением из сплава Инконель 718. Рассмотрены вопросы размерной и финишной обработки данного материала. Результаты показали, что самые значительные изменения параметра шероховатости Ra достигаются только после снижения общего уровня макронеровностей поверхности размерной струйной обработкой. Повышение скорости размерной обработки достигается за счет увеличения плотности тока на поверхности, объема пропускаемого электролита и его концентрации. Уменьшение параметра шероховатости Ra обработанной поверхности происходит при увеличении температуры процесса, уменьшения скорости перемещения токоподвода, оптимизации геометрии электрод - инструментов и подбора электролита. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для струйной электролитно-плазменной обработки медицинских инструментов, полученных методом селективного лазерного сплавления.

Ключевые слова: медицинские инструменты, лазерное плавление, струйная обработка, электролитная плазма, морфология поверхности, ячеистая структура.

Введение

Объединение деятельности различных видов предприятий для развития технологической идеи позволяет решать значимые задачи в реализации жизненного цикла изделия [1-5].

Решению одной из таких сложных технических задач посвящена данная работа. В нашем случае идея изготовления медицинских инструментов, применяемых в хирургии методом селективного лазерного сплавления (Selective laser melting) была предложена Д.А. Строшковым.

Изделия, полученные LSM-методом, обладают несомненными преимуществами. Среди которых, пониженный до 60% вес изделия, скорость изготовления, возможность получать формы недоступные другим технологическим методам, возможность сплавления материалов разных составов и др. Однако не смотря на явные преимущества метода, постобработка полученных деталей часто представляет из себя сложную

техническую задачу. Это объясняется тем, что детали часто имеют сложную геометрическую форму, неравномерную поверхность с остатками поддержек для печати изделия, и наличием сплавленных и выступающих над поверхностью частиц, образующих неравномерную макрогеометрию. При этом исходный параметр Ra на поверхности может достигать 10-12 мкм и выше. Удаление остатков элементов печати и исходная шероховатая поверхность требуют применения технологических решений для получения поверхности изделия медицинских инструментов с параметром шероховатости Ra ≤ 0.32мкм в соответствии с ГОСТ 21239-93 [6].

Для размерной обработки, использующихся для предварительной обработки изделий, можно отнести удаление поддержек, пилами, отрезными машинками, лазером и с использованием ручного слесарного инструмента. Получистовая обработка поверхности изделия предусматривает зачистку электроинструментом с абразивными лентами, кругами, шарошками или применением пескоструйной обработки. В качестве финишной обработки используется обработка войлочными кругами, ремнями с абразивной пастой, электрохимическое полирование и нанесение защитных покрытий [7]. Поэтому при изготовлении изделий, полученных LSM – методом, мы сталкиваемся с необходимостью применения нескольких технологических процессов, использующих десятки инструментов. Выбор технологии всегда остается за технологическими возможностями и традициями производителя.

Очевидно, что наиболее предпочтительным является метод обработки, позволяющий в одной технологической операции выполнить весь цикл обработки. Таким методом является технология струйной электролитно-плазменной обработки. Преимуществами данной технологии является низкая энергоемкость процесса, использование экологически чистых электролитов, низкий уровень испарений от зоны обработки, низкая температура процесса, технологическая возможность обрабатывать как вогнутые, так и выпуклые поверхности, более высокая точность обработки по сравнению с обработкой в электролитической ванне [8-18], возможность проводить как размерную, так и финишную обработку [19-27].

Однако работ, посвященных комбинированной струйной обработке материалов, полученных LSM- методом, недостаточно.

Поэтому целью нашей работы является оценка возможности обработки медицинских инструментов для хирургии полученных с помощью лазерного селективного сплавления струйной электролитно - плазменной обработкой. Для выполнения данной цели необходимо решить следующие задачи: оценить возможности размерной, и финишной обработки, выполнить анализ возникновения дефектов в процессе

обработки, оценить влияние конструктивных особенностей материала, оценить изменения морфологии поверхности в процессе струйного электролитно - плазменного полирования.

Методы

При решении возможности технологического применения струйной электролитно-плазменной обработки материалов, полученных LSM-методом, имеющих ячеистую структуру нами были использованы заготовки из сплавов Инконель 718, и медицинский ранорасширитель (рис. 1), разработанный Д.Н. Пилькевичем [28].

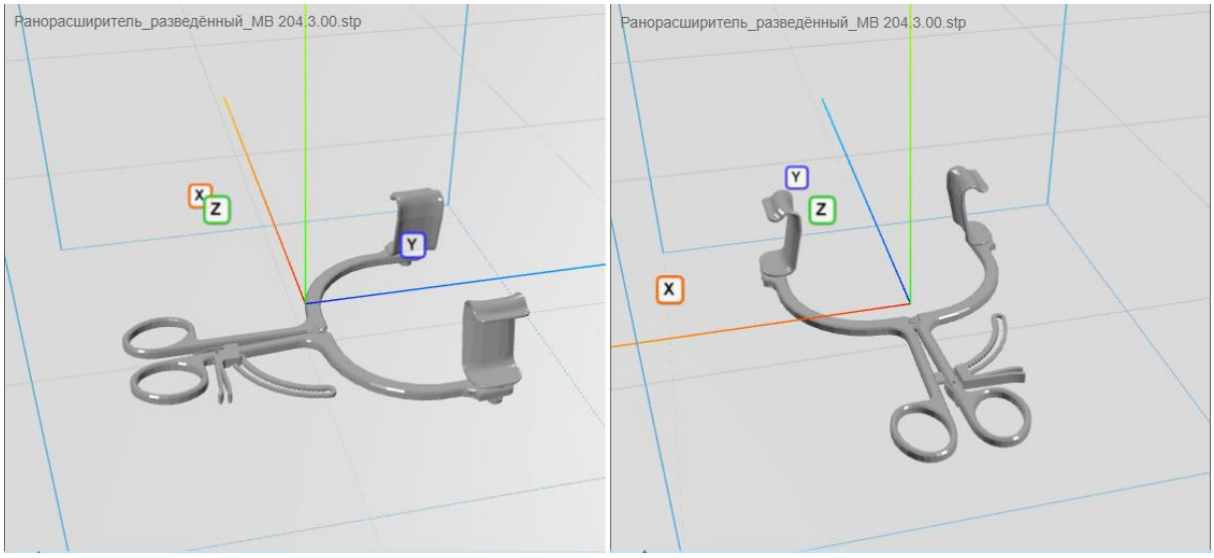


Рис. 1. Объект для струйной электролитно-плазменной обработки: медицинский ранорасширитель.

В качестве применяемого оборудования нами была использовано оборудование, разработанное в СПбПУ [23-26]. Данное оборудование представляет собой автоматизированную установку струйной электролитно-плазменной обработки собранной на базе источника питания собранного по схеме Ларионова.

В качестве электролитов использовали растворы солей NaCl, Na_2SO_4, $NaNO_3$ в водопроводной воде с концентрацией 30-50г/л.

Результаты проведенных исследований

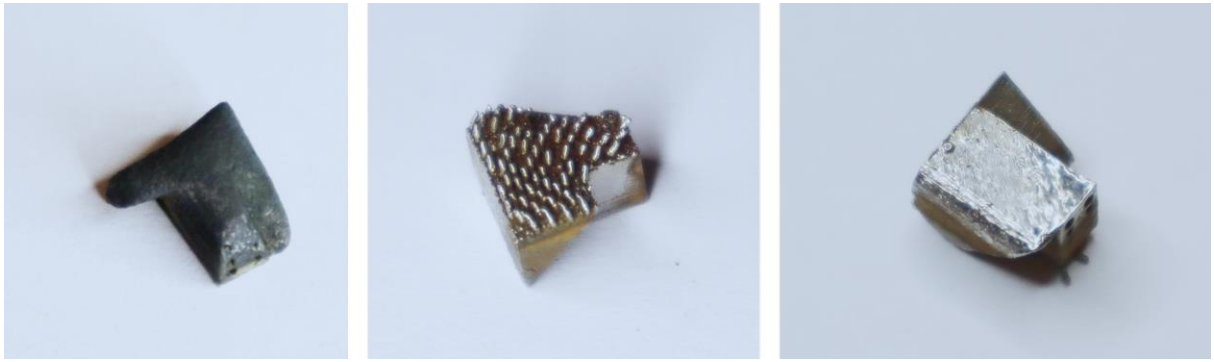
4.1. Анализ возможности размерной обработки изделий, полученных методом лазерного селективного сплавления

Наличие многочисленных наружных дефектов в виде поддержек, ошибок печати либо развитой макрогеометрии поверхности с проседанием

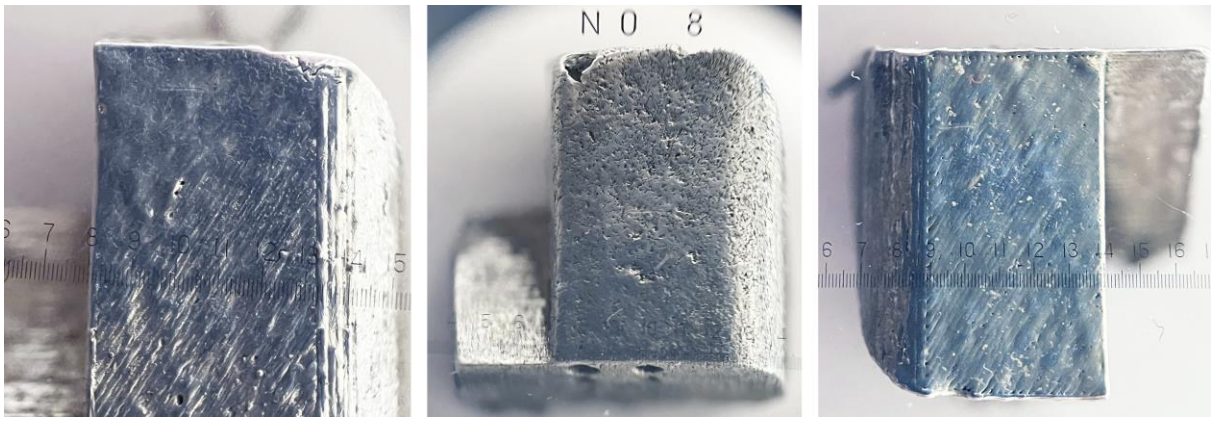
металла в локальных местах на регулярной основе предполагает ее удаление для выравнивания основы и дальнейшей финишной обработки. Нами была предпринята попытка размерно обработать образцы после 3D-печати струей электролита с формированием в ней электролитно-плазменного разряда. Результат обработки (рис. 2, а) показывает, что при ≥2А/см² материал Инконель 718 достаточно легко удаляется в виде объемов металла. На более мягких режимах 0,5-2А/см² удаляются с поверхности поддержки в виде столбиков Ø 0,8-1,2 мм (рис. 2, б). Применение режимов размерной обработки для чистовой обработки (рис. 2, в) ведет к тому, что при высоких плотностях тока материал с поверхности удаляется с большой скоростью и выходит на частично заполненную ячеистую структуру в виде отверстий (рис. 2, г).

4.2. Анализ возможности финишной обработки

Финишная обработка поверхности заключается в удалении микрослоев металла с поверхности изделия. При высоком качестве исходного поверхностного слоя, полученного шлифованием (Ra 0,4-0,8 мкм) на нержавеющей стали электролитно-плазменной полировкой можно получить параметр шероховатости Ra 0,034 мкм [23-26]. Однако материалы, полученные LSM- методом и имеющие исходную ячеистую структуру возможно обрабатывать струйной обработкой только после соответствующей подготовки. В эту подготовку может входить предварительное выглаживание исходной поверхности шлифованием, пескоструйной обработкой либо размерной струйной обработкой. Чем ниже уровень параметра Ra на предварительной подготовке, тем легче обеспечить финишный параметр шероховатости.



а) б) в)

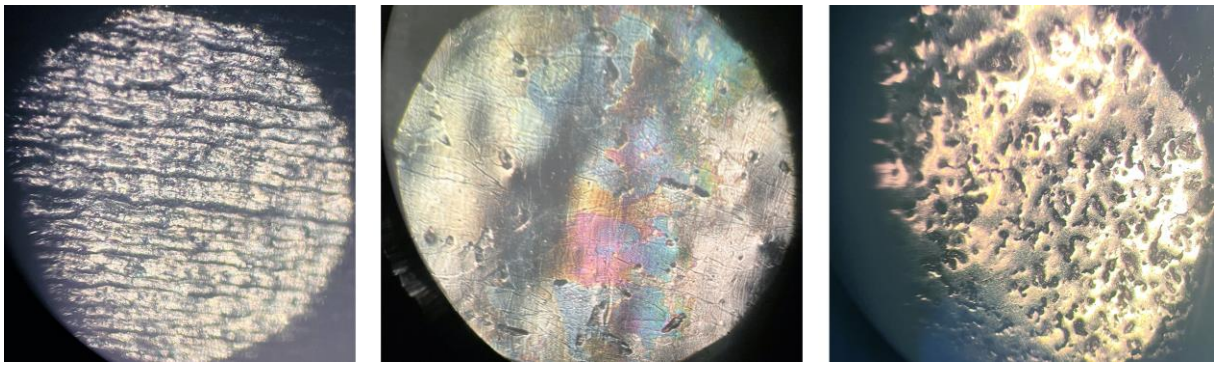


г) д) е)

Рис. 2. Технологические возможности струйной электролитно-плазменной обработки, материал Инконель 718: а) размерная обработка образца; б) полирование малых конструктивных элементов - поддержек; в) локальное полирование поверхностного слоя; г) частичное снятие сплошного поверхностного слоя с выходом на ячеистую структуру; д) получистовая обработка поверхности; е) финишная обработка поверхности

4.3. Анализ возникновения дефектов в материале, полученном методом лазерного селективного сплавления

Анализ показывает, что различные материалы, полученные LSM-методом, имеют много общего. Во-первых, это способ производства. Он предполагает расплавление порошковых частиц металла и сплавление их между собой при остывании. Каждый последующий слой формируется на основе предыдущего и формирует многослойные структуры (рис. 3, а). Это позволяет создавать структуры полностью или частично заполненные металлом структуры различных конфигураций.



а) б) в)

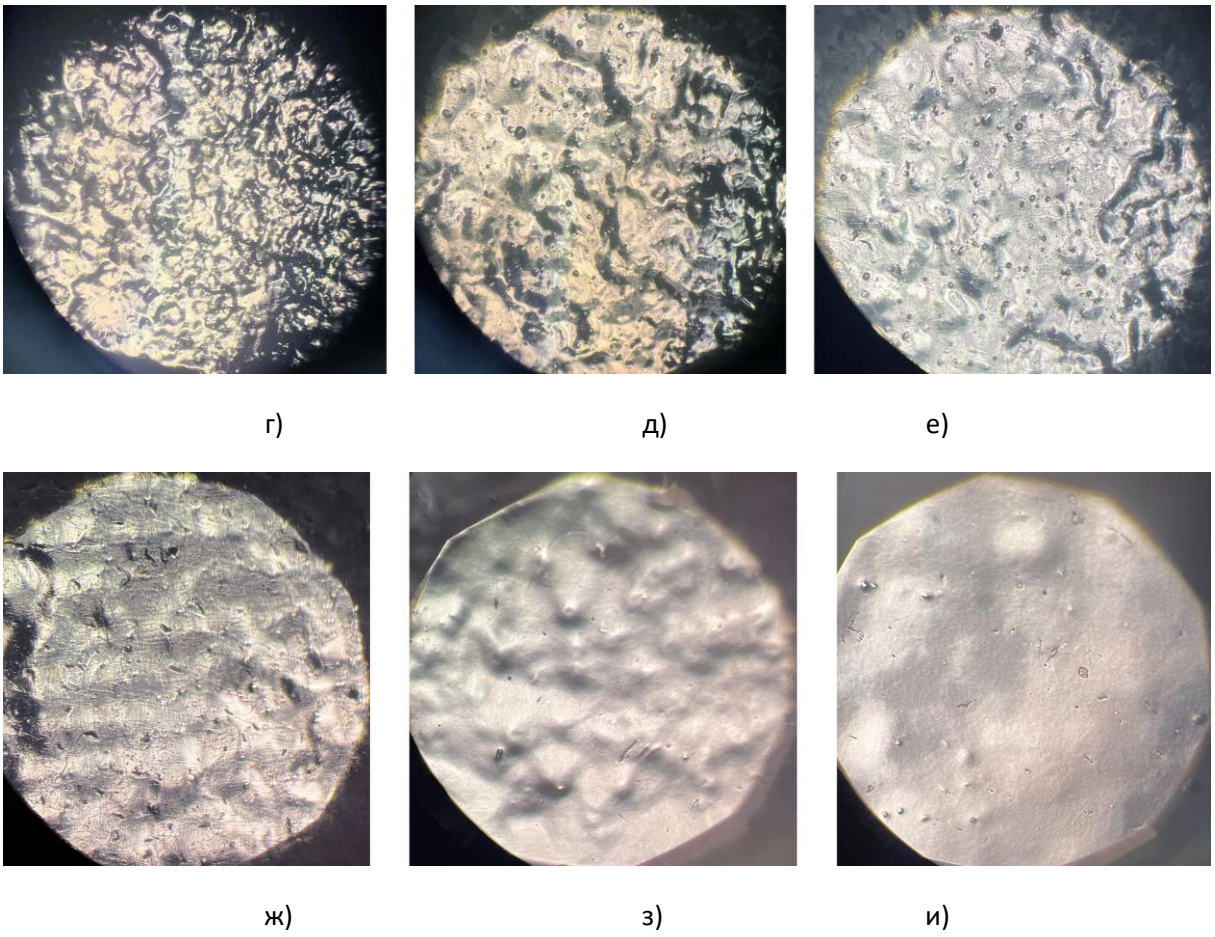


Рис. 3. Морфология поверхности материала полученного методом LSM, до и после струйной электролитно-плазменной обработки: а) исходная поверхность образца (ЭП 648); б) наличие внутренних расслоений разрывов и короблений (ЭП 648); в) локальное удаление сплошного поверхностного слоя (Инконель 718); г) - и) изменение морфологии при финишной и суперфинишной обработке поверхности (Инконель 718).

Выращивание многослойных структур привлекательно своей простотой, однако послойное формирование слоя за слоем металла накапливает в объеме и поверхности растягивающие напряжения, что приводит к короблению изделия, формированию микротрещин (рис. 3, а, б). Внутренние микротрещины в материале полученном LSM - методом наблюдаются после LSM-обработки (рис. 3, а). В середине наплавленного слоя фиксируется микротрещина с острыми краями. Это может быть связано с нарушениями технологического процесса, увеличенной скоростью подачи лазерного луча, неправильным подбором фракции или химического состава. В отдельных случаях структура, полученная LSM – методом, неоднородна и имеет несплошности и разрывы (рис. 3, б).

4.4. Анализ влияния конструктивных особенностей материала при струйной электролитно-плазменной обработки

Ячеистая структура материала является по сути основой, на которую наращивают материал. На финишных этапах этого процесса возникает необходимость формирования достаточно плотного поверхностного слоя, выполняющего различную функциональную нагрузку: декоративную, формообразующую, прочностную и др. Для разных видов деятельности толщина плотного поверхностного слоя будет различна. Это подразумевает, что плотный поверхностный слой 3D- изделия несет на себе не только функциональную нагрузку, но и технологическую. Поэтому при изготовлении для поверхностного слоя должен закладываться технологический припуск на финишную обработку поверхности. Так как изначально сама поверхность изделия имеет по разным оценкам параметр шероховатости Ra ≥ 12,5 мкм для деталей, полученных LSM – методом, в большинстве случаев необходима постобработка в виде технологических операций шлифования, полирования или операций электрохимической, электролитно-плазменной полировки. Очевидно, что каждая из этих операций имеет свою глубину съема. При малых толщинах плотного поверхностного слоя менее (0,1-0,3 мм) существует вероятность его частичного удаления. При этом возможно проявление как сквозных отверстий в поверхностном слое (рис. 2, г, 3, в), открывающих полые ячеистые структуры, так и несквозных отверстий из-за пористой структуры поверхностного слоя (рис. 2, д).

4.5. Обработка медицинского ранорасширителя

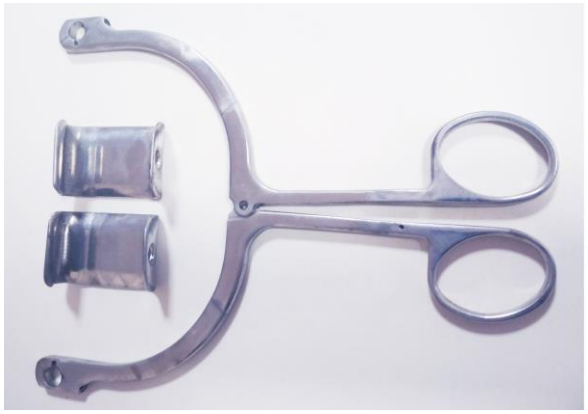
Обработку деталей медицинского расширителя проводили после нескольких исходных состояний поверхности. Исходное состояние поверхности ножниц ранорасширителя после предварительной обработки шлифованием было Ra 0,8-0,4 мкм, полированных частей ручным способом Ra 0,1 мкм. Оценочный параметр шероховатости внутренней поверхности ранорасширителя Ra 10-12 мкм.

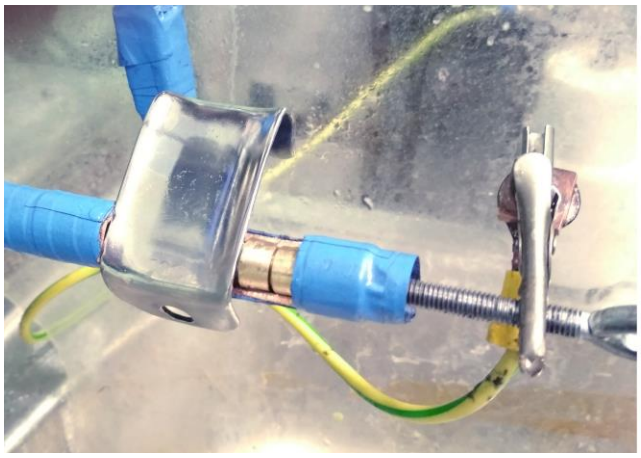
В результате струйной размерной обработки поверхностей ранорасширителя после 3D -печати параметр шероховатости поверхности составил Ra 0,4-0,2 мкм (рис. 4, а, б). После финишной обработки параметр шероховатости составил Ra 0,1 мкм (рис. 4, г.). Наибольшую трудность обработки вызывает финишная обработка поверхностей с обратным уклоном. Ограниченное пространство между стенками затрудняет применение металлических токоподводов из-за возникновения дуговых разрядов, разрушающих поверхность (рис. 4, е).

Обсуждение

Результаты исследований показывают, что исходная поверхность материала Инконель 718, полученного LSM-методом, имеет многочисленные дефекты. Размерная обработка изделия показывает, что достаточно легко убираются поддержки и объемы материала. Наружный поверхностный слой недостаточно толстый, не более 0,3-0,5 мм. При размерной обработке существует опасность удаления поверхностного слоя материала с выходом на внутреннюю ячеистую структуру.

а) б)





в) г)

д) е)

Рис. 4. Обработанные изделия из материала Инконель 718 : а) - набор медицинского расширителя; б) - сложнопрофильные элементы расширителя; в) - элемент расширителя с применяемой технологической оснасткой; г) - результаты измерения шероховатости после струйной электролитно-плазменной обработки; д) - обработка поверхности с раскрытым углом, е) - обработка поверхности с обратным уклоном.

При финишной обработке поверхность материалов, полученных LSM – методом, имеет хорошую отражающую способность и блеск. При изготовлении изделий 3D-печати LSM–методом необходимо предусмотреть величину сплошного поверхностного слоя не менее 0.8-1 мм. Это обеспечит возможность формирования технологического припуска под последующую обработку (шлифования, пескоструйной обработки, полирования) с учетом локального проседания материала на поверхности. При комбинированной струйной электролитно-плазменной обработке возможно добиться низких параметров шероховатости поверхности до Ra 0,1 мкм и ниже.

Выводы

1. Возможна размерная и финишная технологическая обработка изделий, полученных LSM-методом струйной электролитно-плазменной обработкой с достижением параметра шероховатости Ra 0,1 мкм при исходном параметре шероховатости более Ra 12 мкм.

2. Для технологии струйной электролитно-плазменной обработки изделия, полученного LSM-методом, необходимо обеспечить технологический припуск плотного поверхностного слоя, толщина которого должна быть не менее 0,8-1,0 мм, так как ошибки технологии могут привести к выходу на полую ячеистую структуру.

4. Предпочтительно, для снижения времени обработки на выравнивание поверхности, предварительно закладывать в технологический процесс операцию пескоструйной обработки.

Благодарность

Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Диане Поповой за подготовку иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Попова, А. И. Основные факторы инновационно-технологического развития / А. И. Попова // Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей : Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2012 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2012 – С. 123-125. – EDN WDWGTH.

[2] Попова, А. И. Кластерный подход в поддержке малого и среднего предпринимательства в Санкт-Петербурге в условиях глобализации / А. И. Попова // Процессы глобальной экономики : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020 – С. 66-75. – EDN RHIDPB.

[3] Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Т. И. Безденежных, В. В. Шапкин, О. В. Угольникова [и др.]; 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.

[4] Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников //Датчики и системы. – 2006 – № 11 – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

[5] Обеспечение этапов жизненного цикла лопаток паровых турбин применением ультразвукового контроля / А. И. Попова, А. И. Попов, В. С. Медко, М. И. Тюхтяев // Металлообработка. – 2013 – № 5-6(77-78). – С. 43-47. – EDN SBOFBP.

[6] ГОСТ 21239-93 (ИСО 7741-86) Инструменты хирургические. Ножницы. Общие требования и методы испытаний.

[7] Eco-friendly NaCl-based electrolyte for electropolishing 316L stainless steel September 2020 Journal of Manufacturing Processes 58:1257-1269 DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.036
[8] Kulikov I.S., Vashenko S.V., Kamenev A.Y. Elektrolitno - plazmennaya obrabotka materialov [Electrolytic plasma processing of materials] - Minsk: Belarusian science, 2010. p. 232. ISBN 978-985-08-1215-5. (in Russian).
[9] Danilov, I., Paul, R., Hackert-Oschätzchen, M., Zinecker, M., Quitzke, S., Schubert, A. Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel Procedia CIRP Volume 95, 2020, Pages 981-98620th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, ISEM 2020; Zurich, Online; Switzerland; 19 January 2021 до 21 January 2021.
[10] Фомичев А.М., Юльметова О.С., Щербак А.Г., Новиков В.И. Использование плазменной и лучевой технологий для обработки узлов гироприборов Металлообработка. 2014. № 1 (79). С. 17-20.
[11] Ушомирская Л.А., Фоломкин А.И., Новиков В.И. Особенности чистовой обработки турбинных лопаток Металлообработка. 2008. № 4 (46). С. 19-21.
[12] Ushomirskaya L. A., Veselovskiy A.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya detaley mashin pri ispolzovanii razlichnykh vidov energii [Intensification of technological processes of manufacturing machine parts using different types of energy]// Metalloobrabotka [Metalworking]. 2010. 2(56). C.46 (in Russian).
[13] D'yakov, I.G., Belkin V.S., Shadrin, S.Y. et al. Peculiarities of heat transfer at anodic plasma electrolytic treatment of cylindrical pieces. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 50, 346–355 (2014). DOI:10.3103/S1068375514040061
[14] Aliakseyeu Y.G., Korolyov A.Y., Parshuto A.E., Niss V.S. (2017). Electrolyte-plasma treatment under non-stationary mode in a high-gradient electric field. Science & Technique. 16. P. 391-399. DOI:10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399.
[15] Особенности расчета теплового баланса гидросъемника с учетом влияния на шероховатость поверхности электролитно-плазменного полирования / В. И. Новиков, А. Е. Пушкарев, А. П. Щербаков, О. В. Кузьмин // Металлообработка. – 2020. – № 4(118). – С. 16-23. – DOI 10.25960/mo.2020.4.16. – EDN DHRFXY.
[16] Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И. Методика моделирования теплового баланса элементов конструкции строительно-дорожных машин для струйной цементации грунтов Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С. 369-376.

[17] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Schubert A., Meichsner G., Edelmann J. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation and inline metrology. Micromachines. 2019. T. 10. № 3. C. 214.
[18] Zakharov, S.V., Korotkikh, M.T. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model 2020 Lecture Notes in Mechanical Engineering c. 193-208.
[19] Fortov V.E. (2008). Encyclopedia of low-temperature plasma. High Temperature. 46. 1-2. DOI: 10.1134/S0018151X0801001X.
[20] Quitzke, S.; Kröning, O.; Martin, A.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schulze, H.-P.; Kranhold, C.; Zeidler, H.; Schubert, A.: Design of a Test Rig for Local Surface Modification by Jet Plasma Electrolytic Polishing. In: Proceedings of the 14th International Symposium on ElectroChemical Machining Technology 2018, Editors: Bergs, T.; Herrig, T.; Harst, S.; Klink, A., 2018, pp. 63-72, ISBN 978-3-86359-667-5
[21] Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A. Localized surface functionalization of steel by jet-plasma electrolytic polishing 2020 Proceedings of the 20th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2020 pp. 133-136
[22] Ablyaz, T.R.; Muratov, K.R.; Radkevich, M.M.; Ushomirskaya, L.A.; Zarubin, D.A. Electrolytic Plasma Surface Polishing of Complex Components Produced by Selective Laser Melting. Russ. Eng. Res. 2018, 38, P. 491–492. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068798X18060035
[23] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S., Shilling N.G., Rudavin A.A. Magnetronnaya raspylitel'naya golovka [Magnetron spraying head]. Patent for an invention Russian Federation № 2656318. IPC: C25F7/00. 04.04.2017
[24] Popov A., Popova A., Novikov V., Scherbakov A., Kuzmin O. Specific Features Of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing. 2022. T. 247. C. 101-112.
[25] Popov A.I., Popova A.I., Zakharov S.V., Novoselov M.V., Teplukhin V.G., Fumin A.S., Radkevich M.M. Processes of contact interaction of an electrolyte plasma jet with a surface Advances in Mechanical Engineering. Cham, 2022. C. 176-184.
[26] Popov A., Popova A., Fumin A., Novoselov M., Zakharov S., Radkevich M. High-Speed Dimensional Processing Of Metallic Materials With An Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method. Mechanisms and Machine Science (book series) 2022. T. 108 MMS. C. 481-489.
[27] Ablyaz, T.R., Muratov, K.R., Ushomirskaya, L.A., Zarubin, D.A., Sidhu, S.S. Electrolytic plasma polishing technique for improved surface finish of ed machined components 2019 Engineering Solid Mechanics 7(2), c. 131-136.

[28] Пилькевич Д.Н., Чекасина М.А., Ануфриева С.С. Возможности видеоассистированной мини-торакотомии при долевых резекциях легкого // Клиническая и экспериментальная хирургия. Журнал имени академика Б.В. Петровского. 2021. Т. 9, № 3. С. 112-117. DOI: https://doi.org/10.33029/2308-1198-2021-9-3-112-117

A.I. Popov[1], D.A. Stroshkov, K.A. Stroshkov, D. N. Pilkevich[2],

D.S. Fomin[1], M.V. Yakovitskaya[1], M.M. Radkevich[1],

FEATURES OF PROCESSING MEDICAL INSTRUMENTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ural State Medical University

Abstract

The paper studies the effect of electrolytic plasma jet treatment on materials obtained by selective laser melting from the Inconel 718 alloy. The issues of dimensional and finishing processing of this material are considered. The results showed that the most significant changes in the roughness parameter Ra are achieved only after reducing the overall level of surface macroroughness by dimensional blasting. An increase in the speed of dimensional processing is achieved by increasing the current density on the surface, the volume of the passed electrolyte and its concentration. The decrease in the roughness parameter Ra of the treated surface occurs with an increase in the process temperature, a decrease in the speed of the current lead, optimization of the geometry of the electrode-tools and electrolyte selection. The obtained experimental data can be used for jet electrolytic-plasma treatment of medical instruments obtained by selective laser melting.

Keywords: laser melting, jet processing, electrolyte plasma, medical instruments, surface morphology, cellular structure.

Acknowledgments

The authors would like to thank graphic designer Diana Popova for preparing the illustrations.

REFERENCES

[1] Institucional'nye aspekty innovacionnoj ekonomiki: monografiya / T. I. Bezdenezhnyh, V. V. SHapkin, O. V. Ugol'nikova [i dr.]; Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet servisa i ekonomiki. – Sankt-Peterburg: Sankt- Peterburgskij gosudarstvennyj universitet servisa i ekonomiki, 2012 – 131 s. – ISBN 978-5-228-00590-7. – EDN TLVEJZ.(in Russian).

[2] Popova, A. I. Osnovnye faktory innovacionnotekhnologicheskogo razvitiya / A. I. Popova // Integraciya ekonomiki v sistemu mirohozyajstvennyh svyazej : Sbornik nauchnyh trudov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 23–25 oktyabrya 2012 goda. – Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo", 2012 – S. 123-125. – EDN WDWGTH. (in Russian).

[3] Popova, A. I. Klasternyj podhod v podderzhke malogo i srednego predprinimatel'stva v Sankt-Peterburge v usloviyah globalizacii / A. I. Popova // Processy global'noj ekonomiki : Cbornik nauchnyh trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 26–27 oktyabrya 2020 goda. – Sankt-Peterburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya associaciya vysshih uchebnyh zavedenij, 2020 – S. 66-75. – EDN RHIDPB.(in Russian).

[4] Principy postroeniya avtomatizirovannyh sistem podderzhki zhiznennogo cikla innovacionnyh produktov / A. I. Nadeev, A. I. Popova, A. V. Surina, YU. K. Svechnikov //Datchiki i sistemy. – 2006 – № 11 – S. 59-63. – EDN KWMQTP.(in Russian).

[5] Obespechenie etapov zhiznennogo cikla lopatok parovyh turbin primeneniem ul'trazvukovogo kontrolya / A. I. Popova, A. I. Popov, V. S. Medko, M. I. Tyuhtyaev // Metalloobrabotka. – 2013 – № 5-6(77-78). – S. 43-47. – EDN SBOFBP.(in Russian).

[6] GOST 21239-93 (ISO 7741-86) Instrumenty hirurgicheskie. Nozhnicy. Obshchie trebovaniya i metody ispytanij.(in Russian).

[7] Eco-friendly NaCl-based electrolyte for electropolishing 316L stainless steel September 2020 Journal of Manufacturing Processes 58:1257-1269 DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.036

[8] Kulikov I.S., Vashenko S.V., Kamenev A.Y. Elektrolitno - plazmennaya obrabotka materialov [Electrolytic plasma processing of materials] - Minsk: Belarusian science, 2010. p. 232. ISBN 978-985-08-1215-5. (in Russian).

[9] Danilov, I., Paul, R., Hackert-Oschätzchen, M., Zinecker, M., Quitzke, S., Schubert, A. Random sequential simulation of the resulting surface

roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel Procedia CIRP Volume 95, 2020, Pages 981-98620th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, ISEM 2020; Zurich, Online; Switzerland; 19 January 2021 до 21 January 2021.
[10] Fomichev A.M., YUl'metova O.S., SHCHerbak A.G., Novikov V.I. Ispol'zovanie plazmennoj i luchevoj tekhnologij dlya obrabotki uzlov giropriborov Metalloobrabotka. 2014. № 1 (79). pp. 17-20. (in Russian).
[11] Ushomirskaya L.A., Folomkin A.I., Novikov V.I. Osobennosti chistovoj obrabotki turbinnyh lopatok Metalloobrabotka. 2008. № 4 (46). pp. 19-21.(in Russian).
[12] Ushomirskaya L. A., Veselovskiy A.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya detaley mashin pri ispolzovanii razlichnykh vidov energii [Intensification of technological processes of manufacturing machine parts using different types of energy]// Metalloobrabotka [Metalworking]. 2010. 2(56). pp.46-49 (in Russian).
[13] D'yakov, I.G., Belkin V.S., Shadrin, S.Y. et al. Peculiarities of heat transfer at anodic plasma electrolytic treatment of cylindrical pieces. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 50, 346–355 (2014). DOI:10.3103/S1068375514040061
[14] Aliakseyeu Y.G., Korolyov A.Y., Parshuto A.E., Niss V.S. (2017). Electrolyte-plasma treatment under non-stationary mode in a high-gradient electric field. Science & Technique. 16. pp. 391-399. DOI:10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399.(in Russian).
[15] Osobennosti rascheta teplovogo balansa gidros"emnika s uchetom vliyaniya na sherohovatost' poverhnosti elektrolitno-plazmennogo polirovaniya / V. I. Novikov, A. E. Pushkarev, A. P. SHCHerbakov, O. V. Kuz'min // Metalloobrabotka. – 2020. – № 4(118). – pp. 16-23. – DOI 10.25960/mo.2020.4.16. – EDN DHRFXY.(in Russian).
[16] Novikov V.I., Pushkarev A.E., Voroncov I.I. Metodika modelirovaniya teplovogo balansa elementov konstrukcii stroitel'no-dorozhnyh mashin dlya strujnoj cementacii gruntov Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2019. № 3. pp.369-376. (in Russian).
[17] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Schubert A., Meichsner G., Edelmann J. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation and inline metrology. Micromachines. 2019. T. 10. № 3. pp. 214.
[18] Zakharov, S.V., Korotkikh, M.T. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model 2020 Lecture Notes in Mechanical Engineering pp. 193-208.
[19] Fortov V.E. (2008). Encyclopedia of low-temperature plasma. High Temperature. 46. 1-2. DOI: 10.1134/S0018151X0801001X.
[20] Quitzke, S.; Kröning, O.; Martin, A.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schulze, H.-P.; Kranhold, C.; Zeidler, H.; Schubert, A.: Design of a Test Rig for

Local Surface Modification by Jet Plasma Electrolytic Polishing. In: Proceedings of the 14th International Symposium on ElectroChemical Machining Technology 2018, Editors: Bergs, T.; Herrig, T.; Harst, S.; Klink, A., 2018, pp. 63-72, ISBN 978-3-86359-667-5

[21] Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A. Localized surface functionalization of steel by jet-plasma electrolytic polishing 2020 Proceedings of the 20th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2020 pp. 133-136

[22] Ablyaz, T.R.; Muratov, K.R.; Radkevich, M.M.; Ushomirskaya, L.A.; Zarubin, D.A. Electrolytic Plasma Surface Polishing of Complex Components Produced by Selective Laser Melting. Russ. Eng. Res. 2018, 38, P. 491–492. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068798X18060035

[23] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S., Shilling N.G., Rudavin A.A. Magnetronnaya raspylitel'naya golovka [Magnetron spraying head]. Patent for an invention Russian Federation № 2656318. IPC: C25F7/00. 04.04.2017(in Russian).

[24] Popov A., Popova A., Novikov V., Scherbakov A., Kuzmin O. Specific Features Of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing. 2022. T. 247. pp. 101-112.

[25] Popov A.I., Popova A.I., Zakharov S.V., Novoselov M.V., Teplukhin V.G., Fumin A.S., Radkevich M.M. Processes of contact interaction of an electrolyte plasma jet with a surface Advances in Mechanical Engineering. Cham, 2022. pp. 176-184.

[26] Popov A., Popova A., Fumin A., Novoselov M., Zakharov S., Radkevich M. High-Speed Dimensional Processing Of Metallic Materials With An Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method. Mechanisms and Machine Science (book series) 2022. T. 108 MMS. pp. 481-489.

[27] Ablyaz, T.R., Muratov, K.R., Ushomirskaya, L.A., Zarubin, D.A., Sidhu, S.S. Electrolytic plasma polishing technique for improved surface finish of ed machined components 2019 Engineering Solid Mechanics 7(2), pp. 131-136.

[28] Pil`kevich D.N., Chekasina M.A., Anufrieva S.S. Vozmozhnosti videoassistirovannoj mini-torakotomii pri dolevy`x rezekciyax legkogo // Klinicheskaya i e`ksperimental`naya xirurgiya. Zhurnal imeni akademika B.V. Petrovskogo. 2021. V. 9, № 3. pp. 112-117. DOI: https://doi.org/10.33029/2308-1198-2021-9-3-112-117

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621. 735

М.М. Радкевич

ВЛИЯНИЕ ПМТО НА ДЕФОРМАЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ, СКЛОННОСТЬ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЙ

Михаил Михайлович Радкевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, Санкт-Петербург.
Тел: (812)552-93-02, E-mail: radmich@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с особенностями улучшения комплекса механических свойств изделий из металлов и сплавов при программной механико-термической обработке. Результаты исследований влияния ПМТО на деформационную способность, склонность к хрупкому разрушению и устойчивость структуры изделий из сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов оказывает существенное значение.

Ключевые слова: программная механико-термическая обработка, хрупкое разрушение, деформационная способность, структура, наследственность.

Введение

Цель данного исследования заключалась в установлении влияния режимов штамповки поковок с применением ПМТО на повышение ресурса работоспособности изделий в условиях эксплуатации.

Так, как одной из важных характеристик сталей является сопротивление хрупкому разрушению, то необходимо было провести серию испытаний по определению сопротивления вязкому и хрупкому разрушению. Кроме этого, требовалось провести оценку влияния скорости деформирования на эксплуатационные свойства стали. Для этого были проведены испытания по определению работы зарождения ($a_з$) и работы

распространения трещины (a_p), а также оценить склонность сталей к хрупкому разрушению при различных режимах обработки.

Устойчивость структуры изделий после ПМТО объясняется эффектом наследования как субструктуры, которая образовалась в результате этой обработки, так и соответствующего высокого комплекса свойств после повторной фазовой перекристаллизации α-γ-α.

Результаты

К конструкционным сталям, применяемым для изготовления деталей машин и других конструкций, предъявляются требования по всему комплексу механических свойств, а не по высокому значению какого-либо одного параметра. Материал, идущий на изготовление деталей, подвергающихся значительным нагрузкам, должен быть работоспособным и, наряду с высокой прочностью, иметь достаточную вязкость, чтобы хорошо сопротивляться динамическим и ударным воздействиям.

Как правило, повышение прочности материалов путем применения некоторых способов термомеханического воздействия сопровождается склонностью их к хрупкому разрушению. Одной из примечательных особенностей программной механико-термической обработки является совместимость улучшения прочностных и пластических свойств, то есть такая обработка изделий приводит к заметному улучшению всего комплекса механических свойств металлов и сплавов. В кристаллах мартенсита, фрагментированных субграницами, при нагружении возникают скольжения дислокаций, то есть создаются меньшие пики локальных напряжений. Кроме того, при развитом субзеренном строении, напряжения, локализованные у вершины трещины, могут легко релаксировать. Меньший уровень и более легкая релаксация пиковых напряжений обуславливает высокую сопротивляемость распространению трещины в сталях, подвергнутых программной механико-термической обработке.

Поскольку одной из наиболее важных характеристик сталей является сопротивление хрупкому разрушению, то были проведены испытания по определению сопротивления вязкому (a_p) и хрупкому разрушению (T_{50}). В проводимых исследованиях [1] работу развития трещины при данной температуре определяли путем испытания ударной вязкости на стандартных образцах с мягким (R = 1 мм), острым (R = 0,25 мм) и предельно острым надрезом - усталостной трещиной (R = 0 мм). При этом принималась линейная зависимость KCU от радиуса надреза (прямая линия ABC на рис.1).

Гуляев А.П. считает, что при экстраполяции этой зависимости до R = 0 мм получается значение ударной вязкости, равное работе развития

трещины (a_p), так как в этом случае можно считать, что, работа зарождения ($a_з$) равна нулю.

Оценку склонности сталей к хрупкому разрушению для различных обработок осуществляли по температуре, при которой в изломе образца содержалось 50% вязкой составляющей (T_{50} - порог хладноломкости) [2].

Испытания проводили в температурном интервале перехода стали из вязкого в хрупкое состояние при температурах от +20 до -196 ^{0}C.

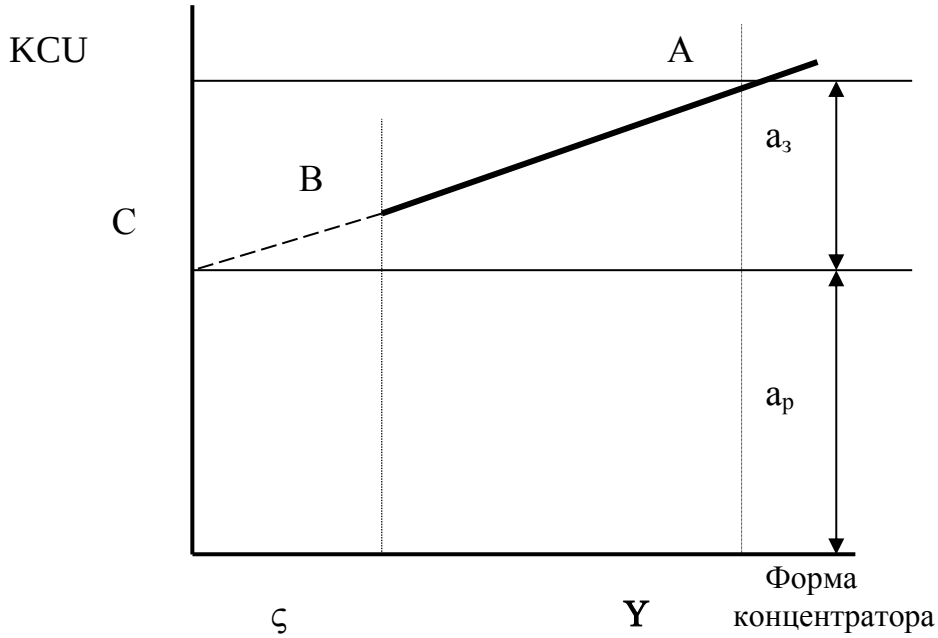


Рис.1. Схема разложения ударной вязкости на две составляющие a_p и $a_з$.

Кроме этого, производилась оценка, влияния скорости деформирования на эксплуатационные свойства стали 45Х. Для этого были проведены испытания по определению работы зарождения ($a_з$) и работы распространения трещины (a_p). Исследованию подвергались образцы из поковок, изготовленных горячей штамповкой по режиму ПМТО на кривошипном горячештамповочном прессе и молоте. По результатам опытов были построены графики.

На рис.2 представлены кривые определения работы распространения и зарождения трещины для разных значений скорости деформирования.

Установлено, что работа зарождения трещины у изделий, изготовленных на КГШП больше по сравнению с изготовлением на молоте, и, соответственно, равна 400 и 170 кДж/м^2. Что же касается значений работы распространения трещины, то все наоборот.

Так, для изделий, полученных на КГШП a_p =400 кДж/м^2, а для изделий, полученных на молоте a_p = 1190 кДж/м^2.

Итак, можно утверждать, что увеличение скорости деформирования с 5 до 150 1/с приводит к снижению работы зарождения трещины и увеличению работы распространения трещины [2].

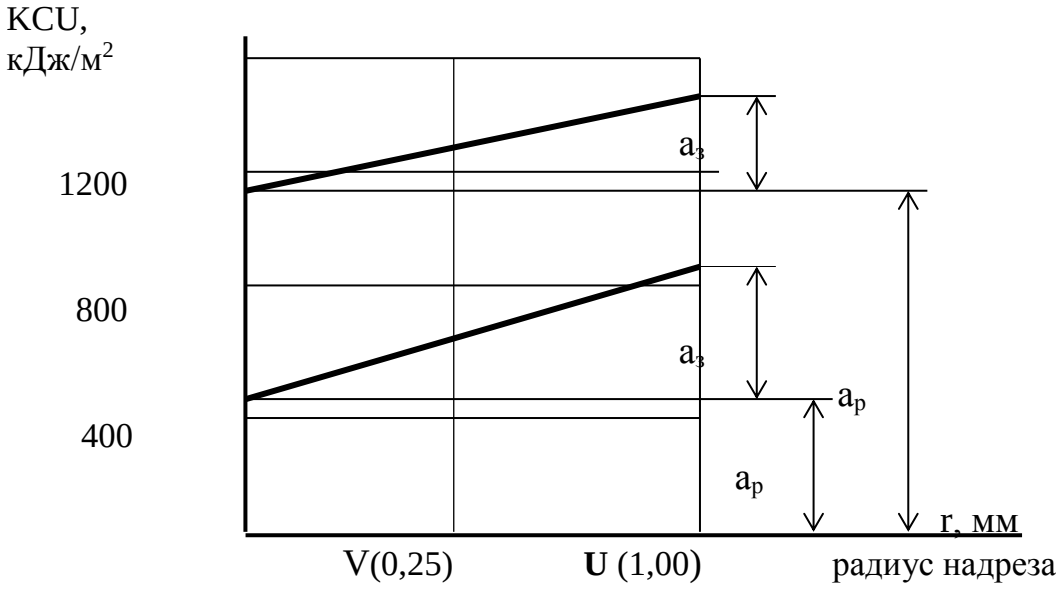


Рис.2. Определение работы зарождения и распространения трещины.

Результаты испытаний по определению порога хладноломкости образцов из стали 45Х, изготовленных на молоте и КГШП по режимам программной механико-термической обработке, представлены на рис.3. В ходе испытаний установлено, что температурный порог хладноломкости (T_{50}) увеличивается (смещается в сторону более низких температур) с увеличением скорости деформации и составляет для штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах T_{50}=-70 ^{0}C, а на молотах T_{50}=-60 ^{0}C.

Из изложенного следует, что с точки зрения сопротивления стали хрупкому разрушению, оптимальной, является структура, полученная в результате программной механико-термической обработки на молоте. Такая структура обеспечивает более высокие значения ударной вязкости, в частности работы распространения трещины.

Большим преимуществом программной механико-термической обработки, является то, что после данной обработки существует эффект наследования как субструктуры, которая образовалась в результате этой обработки, так и соответствующего высокого комплекса свойств после повторной фазовой перекристаллизации α-γ-α.

Механизмы микросдвиговой релаксации напряжений и диффузионного перераспределения дефектов в энергетически выгодные положения, протекающие в процессе программной механико-термической обработки, приводят к снижению внутренней энергии системы и способствуют созданию более однородной механически равновесной структуры. Поэтому структура и свойства, упрочненных программной механико-термической обработкой металлов и сплавов, оказываются более

устойчивыми к внешним термическим и механическим воздействиям по отношению к нагреву, чем обработанным по заводской технологии.

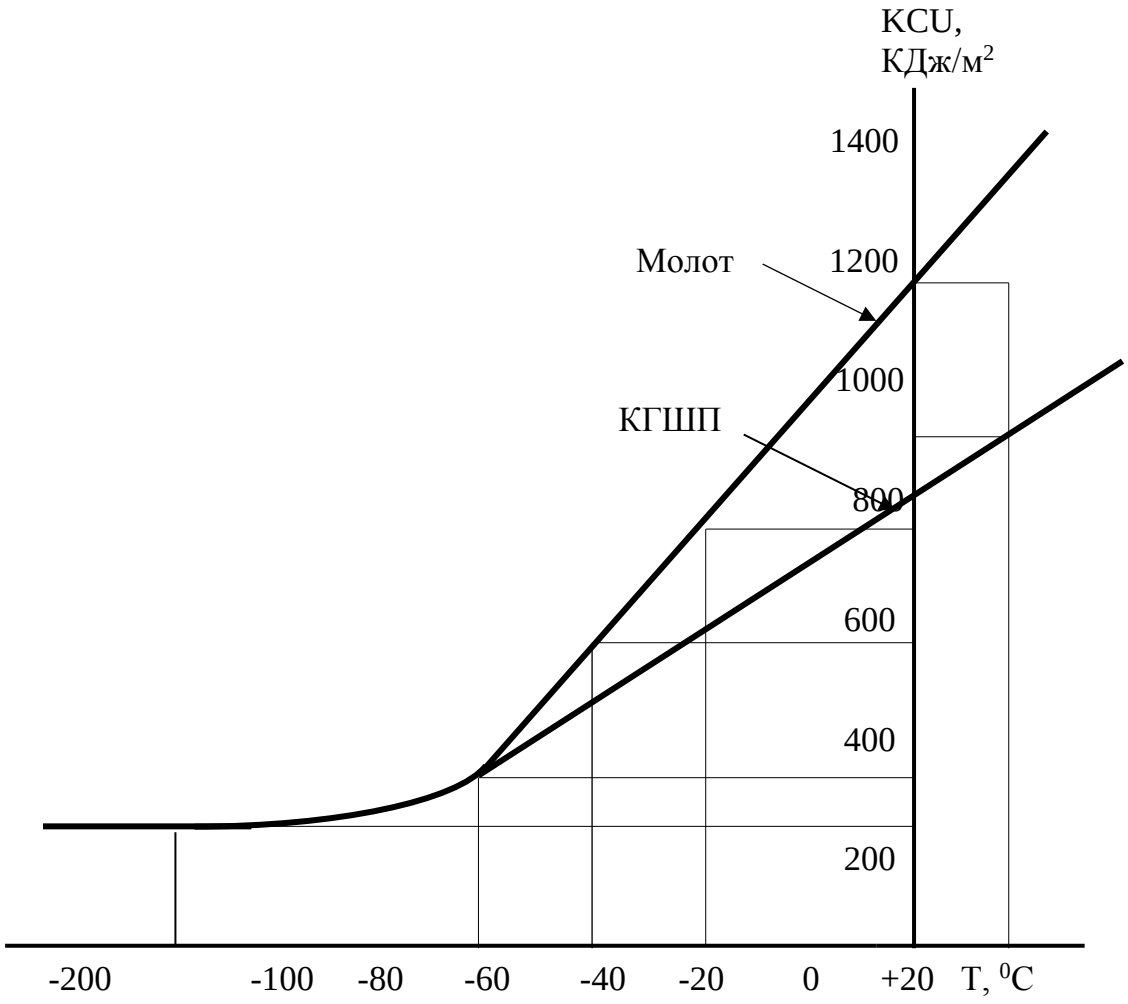


Рис.3. Сериальные кривые определения порога хладноломкости стали 45Х после программной механико-термической обработки.

Необходимо иметь в виду, что упрочненные в результате деформационно-термической обработки заготовки во многих случаях являются полуфабрикатом, а поэтому подлежат последующей термической обработке, после изготовления из них готовых деталей [3,4].

Вопрос наследования изделием ранее полученного упрочненного структурно-механического состояния после повторных нагревов являются очень важными и актуальными. С этим связано понятие устойчивости суб- и микроструктуры, а также деградация свойств изделий в условиях эксплуатации. Для получения ответа на вопрос, на сколько и в какой степени сохраняется упрочненное состояние, нами была проведена серия экспериментов, которые заключались в проведении дополнительной термической обработке заготовок, изготовленных по технологии ПМТО.

Дополнительная термическая обработка для всех исследуемых сталей заключалась в улучшении.

Проведенные исследования позволили установить, что для исследуемых стальных поковок, изготовленных по режимам программной механико-термической обработки и подвергнутых дополнительной закалке и высокому отпуску, сохраняется высокий комплекс механических свойств. В табл.1 представлены результаты механических испытаний образцов сталей 45Х, 20Х13, 08Х18Н10Т, а на рис.4 и 5 приведены сравнительные диаграммы механических свойств поковок из этих сталей.

Из представленной таблицы видно, что даже при столь жестких условиях проведения дополнительной термической обработки, сохраняется упрочненное состояние, достигнутое в результате программной механико-термической обработки.

Таблица 1. Механические свойства исследуемых сталей.

№ п/п	Марка стали	Режим обработки	Механические свойства				
			σ_{02}	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU
			МПа		%		кДж/м^2
1	45Х	ПМТО	1278	1403	7,7	32,2	1090
		ПМТО+З.О.	1092	1252	11,5	33,1	972
2	20Х13	ПМТО	1382	1568	14,3	50,0	678
		ПМТО+З.О.	1071	120	15,4	52,2	563
3	08Х18Н10Т	ПМТО	355	590	46,0	69,0	2980
		ПМТО+З.	432	560	47,0	76,0	2900

Итак, установлено, что эффект наследования упрочненной структуры, а, следовательно, сохранения свойств имеет место. Между тем, существует некоторое отличие в степени "наследования" структуры и свойств, для различных сталей.

Так, для изделий из стали 45Х повторная закалка, и отпуск снижает предел прочности на 10 %, предел текучести на 8,5 %, но, тем не менее, при этом, характеристики прочности остаются выше, чем после изготовления их по заводской технологии.

Для стали 20Х13 разница между прочностными свойствами после программной механико-термической обработки и повторной закалки составила 8 %, но вместе с тем, по сравнению со стандартной заводской технологией свойства изделий несколько выше.

а) $\sigma_в, \sigma_{0,2}$, МПа δ, ψ,%;

б) $\sigma_в, \sigma_{0,2}$, ·10 МПа;

$\delta, \psi \cdot 10^{-1}$,%;

KCU·10, кДж/м^2

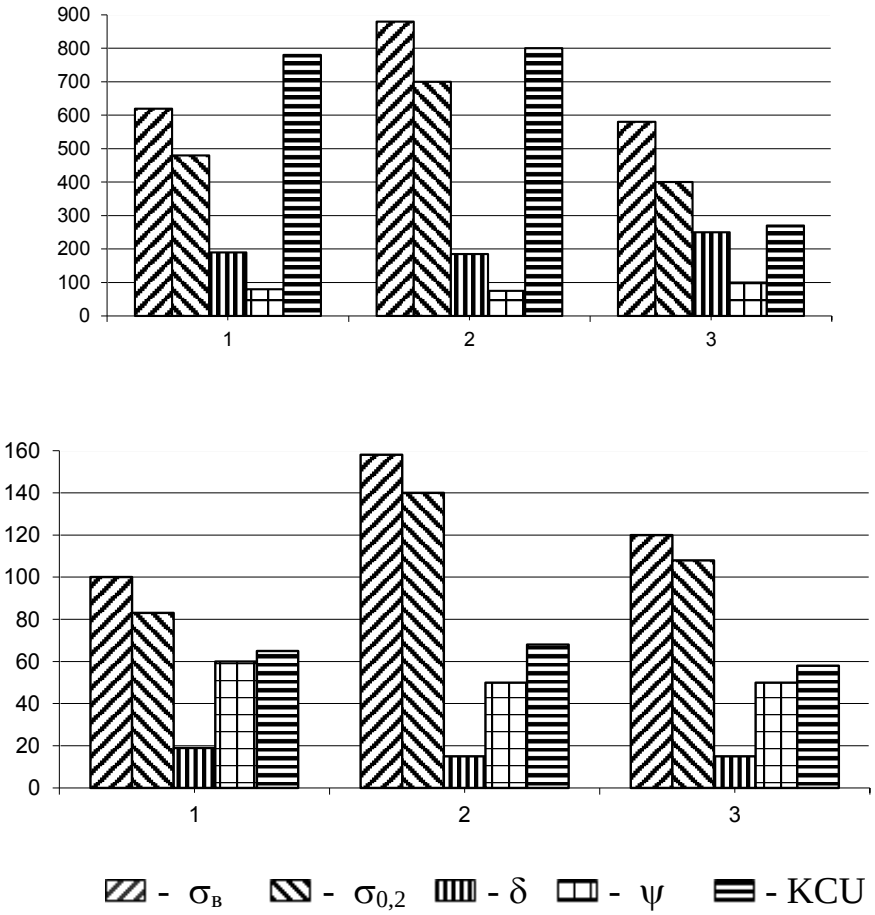


Рис.4. Механические свойства стали 20 (а) и стали 45Х (б), подвергнутых различным видам обработки: 1- ОТО; 2- ПМТО; 3 – ПМТО+ТО

Что касается стали 08Х18Н10Т и других сталей аустенитного класса, степень наследования свойств после программной механико-термической обработки несколько меньше чем для сталей перлитного и мартенситного классов [5-7].

Из экспериментальных данных видно, что положительное влияние программной механико-термической обработки на устойчивость структуры и свойства исследуемых сталей очевидно. Структурная и фазовая однородность металлов, достигнутые в результате программной механико-термической обработки способствует снижению внутренней энергии системы, повышают устойчивость металлов к возврату и, еще в большей степени, к рекристаллизации.

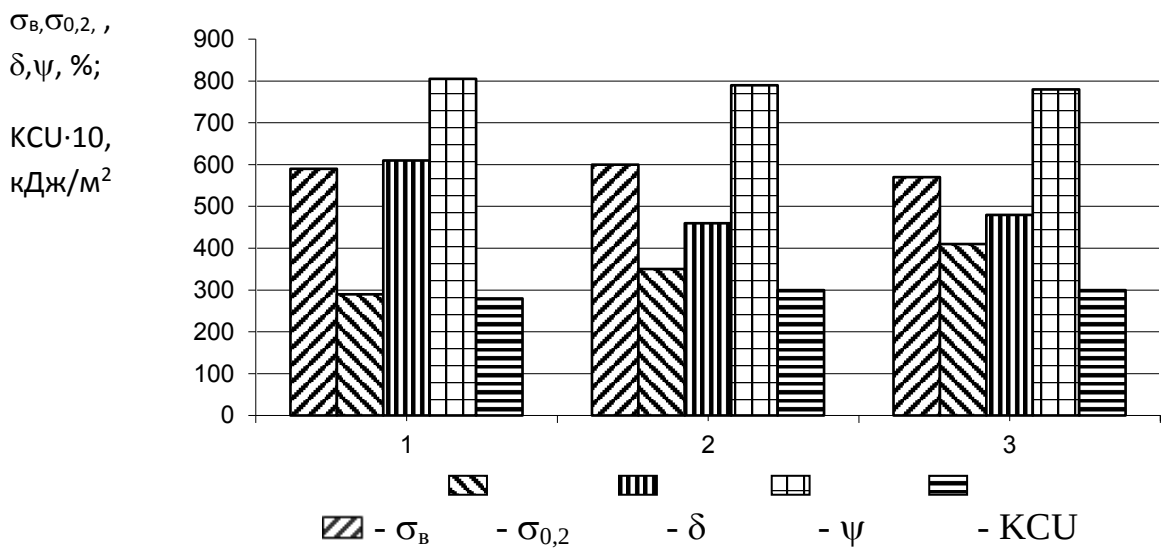


Рис. 5. Механические свойства стали 20Х13, подвергнутых различным видам обработки: *1* - ОТО; *2* - ПМТО; *3* - ПМТО+ТО.

Учитывая, что ползучесть кристаллических тел представляет собой процесс термического активирования и последовательного включения в деформацию "слабых" мест решетки с различными критическими напряжениями [8, 9], и тот факт, что при программной механико-термической обработке происходит упрочнение именно этих мест, то, по-видимому, такая обработка окажет положительное влияние и на параметры ползучести металлов. Это предположение требует дополнительного исследования.

В отличие от тепловой энергии, поглощаемой равномерно во всем объеме кристалла, выделение энергии звуковых волн и их затухание происходит в основном у дефектов кристаллического строения, в частности на дислокациях. Включение ультразвука в процессе статического деформирования кристаллов вызывает снижение напряжения течения, то есть приводит к снижению сопротивления пластической деформации [10, 11]. Отмечено также, что упрочненные образцы требуют большего напряжения деформирования при одновременном действии статической нагрузки и ультразвуковых колебаний [12, 13].

Полученные данные, по влиянию программной механико-термической обработки на деформационную способность сталей, позволяют высказать предположение о том, что при деформировании упрочненных металлов наблюдается большая пластичность, которая обусловлена меньшей интенсивностью межзеренного проскальзывания, характеризующей большую микроскопическую деформационную способность.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования и изложенные факты позволяют утверждать, что программная механико-термическая обработка способствует повышению устойчивости субструктуры и механических свойств металлов. Для выявления эффекта программной механико-термической обработки на другие свойства металлов требуются дополнительные исследования.

Технология горячей штамповки с применением программной механико-термической обработки, способствует также увеличению предела текучести, статической и динамической прочности, запаса пластичности, вязкости, снижению температурного порога хладноломкости и степени анизотропии стальных изделий. Эффект упрочнения изделий, полученный в результате программной механико-термической обработки имеет тенденцию к его сохранению при проведении различных последующих термообработок.

Анализ и обобщение фактов убедительно показывает важность теоретических и экспериментальных исследований физических явлений, природы вещества на вопросы прочности металла в конструкции. При этом, предварительное знание указанных явлений, значительно облегчает пути достижения желаемой прочности при удовлетворительных вязко-пластических свойствах и выбор оптимального технологического процесса изготовления изделия, а также его правильную эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия. 1977. 647 с.

[2] Bernstein M.l. Thermomechanical processing of metals and alloys. Moscow: Metallurgia. 1996. vol. 1and 2.1171 seconds

[3] Bernstein Ml Hot plastic deformation and hardening mechanism of steel at TMP. Steel. №. 2.1972. s. 157-165.

[4] Radkevich M.M. Radkevich I.M. Raznozernistost′ structure termoupročnennyh forgings.//Science № 1.1998 production. c. 17-19.

[5] Radkevich M. M. Osobennosti formirovaniya ochaga plasticheskoi deformacii v usloviyah DTO. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. №2. 2001. s. 18-23 (rus).

[6] Radkevich M. M. Tehnologicheskie aspekti uprochnyaushei programmnoi mehaniko-termicheskoi obrabotki. // FGAOU VO “SpbPU Petra Velikogo”, S. Peterburg, izdatel’stvo politegnicheskogo universiteta. 2020. s. 205. (rus)

[7] Кеннеди А.Д. Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургиздат. 1965. 312 с.

[8] Варгасов Н.Р., Радкевич М.М. Закономерности поведения титановых сплавов в условиях структурной сверхпластичности. Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение. Наука и образование», Россия, Санкт-Петербург, 30-1 июля. 2016, с.1075-1088
[9] Radkevich M.M., Vargasov N.R. Manufacture of Parts from a Titanium Alloy under Superplasticity Conditions. RUSSIAN METALLURGY (METALLY) 2016. T. 2016. № 13. с. 1295-1297
[10] Варгасов Н.Р., Радкевич М.М., Журавлев Д.С. Усовершенствование технологии изготовления изделий из титанового сплава. Современное машиностроение. Наука и образование. MMESE-2017. №6, 2017, с.625-638
[11] Розенберг В.М. Ползучесть металлов. М.: Металлургиздат. 1967. 215с.
[12] Гиндин И.А., Неклюдов И.М., Малик Г.Н. Влияние скорости нагружения на ползучесть алюминия при звуковом облучении. // ФММ. 1969. № 27. С. 774-778.
[13] Гиндин И.А., Неклюдов И.М., Малик Г.Н. Действие ультразвуковых колебаний на сопротивление пластической деформации кристаллов. // ФММ. 1972. № 14. С. 1308-1312.

M.M. Radkevich

THE INFLUENCE OF PMTO ON DEFORMATION CAPACITY, TENDENCY TO BRITTLE DESTRUCTION AND STABILITY OF THE STRUCTURE OF PRODUCTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper deals with issues related to the peculiarities of improving the complex of mechanical properties of products made of metals and alloys during software mechanical and thermal treatment. The results of studies of the influence of PMTO on the deformation ability, the tendency to brittle destruction and the stability of the structure of products from steels of perlite, martensitic and austenitic classes are of significant importance.

Key words: software mechanics and heat treatment, brittle fracture, deformation ability, structure, heredity.

REFERENCES

[1] Gulyaev A.P. Metallovedenie. M.: Metallurgiya. 1977. 647 c.

[2] Bernstein M.l. thermomechanical processing of metals and alloys. Moscow: metallurgia. 1996. vol. 1and 2.1171 seconds
[3] Bernstein Ml Hot plastic deformation and hardening mechanism of steel at TMP. Steel. №. 2.1972. s. 157-165.
[4] Radkevich M.M. Radkevich I.M. Raznozernistost′ structure termoupročnennyh forgings.//Science № 1.1998 production. c. 17-19.
[5] Radkevich M. M. Osobennosti formirovaniya ochaga plasticheskoi deformacii vusloviyah DTO. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. №2. 2001. s. 18-23 (rus).
[6] Radkevich M. M. Tehnologicheskie aspekti uprochnyaushei programmnoi mehaniko-termicheskoi obrabotki. // FGAOU VO “SpbPU Petra Velikogo”, S. Peterburg, izdatel’stvo politegnicheskogo universiteta. 2020. s. 205. (rus)
[7] Kennedy A.D. Creep and fatigue in metals. M.: Metallurgizdat.1965. 312 c.
[8] Vargasov N.R., Radkevich M.M. Patterns of behavior of titanium alloys in conditions of structural superplasticity. International Scientific and Practical Conference "Modern Mechanical Engineering. Science and Education", Russia, St. Petersburg, July 30-1. 2016, p.1075-1088
[9] Radkevich M.M., Vargasov N.R. Manufacture of Parts from a Titanium Alloy under Superplasticity Conditions. RUSSIAN METALLURGY (METALLY) 2016. T. 2016. № 13. c. 1295-1297
[10] Vargasov N.R., Radkevich M.M., Zhuravlev D.S. Improvement of the technology of manufacturing products from titanium alloy. Modern mechanical engineering. Science and education. MMESE-2017. No6, 2017, p.625-638
[11] Rosenberg V.M. Creep of metals. M.: Metallurgizdat.1967. 215 c.
[12] Gindin I.A., Neklyudov I.M., Malik G.N. Influence of loading speed on aluminum creep during sound irradiation. FMM. 1969. № 27. C. 774-778.
[13] Gindin I.A., Neklyudov I.M., Malik G.N. Action of ultrasonic vibrations on the resistance of plastic deformation of crystals. FMM. 1972. № 14. C. 1308-1312.

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ_ПРЕСС, 2022.

УДК 621.78.01, 620.182

В.Г. Теплухин[1], А. И. Попов[1], Д.С. Фомин[1], М.М. Радкевич[1]

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕЙ С МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

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

[1]Александр Иннокентьеич Попов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)123-4567, E-mail: a.popov@spbstu.ru .

[1]Даниил Сергеевич Фомин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: trerer325796@gmail.com.

[1]Михаил Михайлович Радкеич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: radmich@mail.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы исследования износостойких сталей с метастабильной аустенитной структурой. Предложен экспресс-метод оценки доли ферромагнитной составляющей. Сопоставление полученных результатов с литературными данными показало возможность использования измерения силы отрыва постоянного магнита для определения количества мартенсита после аустенизации рассматриваемых сталей. Для предотвращения образования мартенситной структуры в поверхностном слое метастабильного аустенита при изготовлении образцов для

металлографических исследований предложен бездеформационный способ струйной электролитно-плазменной обработки.

Ключевые слова: метастабильный аустенит, мартенсит, постоянный магнит, электролитно-плазменная обработка, металлографичесские исследования.

1. Введение

Применение широко распространенной износостойкой аустенитной стали Гадфильда 110Г13Л неуклонно сокращается из-за токсичности производства и необходимости повышения экологической безопасности в целом. Кроме того, во многих производственных процессах требуется сочетание высокой стойкости к абразивному износу с соротивлением к коррозии в агрессивных средах. В этом случае, как правило, выбирают материал, стойкий к воздействию данной среды. Например, в сернокислых растворах используются низкоуглеродистые высоконикелевые стали и сплавы, легированные молибденом и медью [1]. Однако внешний вид изношенного рабочего колеса центробежного насоса (рис.1) для перекачки пульпы при производстве бентонитовой глины в растворе с содержанием около 8% серной кислоты показывает, что уже через 200-300 часов работы происходит именно абразивный износ.

Рис.1. Износ рабочего колеса центробежного насоса в сернокислой среде.

Сопоставление химического состава с бинарной диаграммой железо-никель показывает, что большинство сталей аустенитного класса приобретают аустенитную структуру не только за счет легирования аустенитообразующими элементами, но и за счет значительного количества альфа-стабилизаторов, в первую очередь, хрома. Легирующие элементы и углерод способствуют снижению температуры мартенситного превращения вплоть до его полного подавления [2]. Отмечается [3], что понижение

стабильности аустенита благоприятно сказывается на стойкости к абразивному износу.

Известно [4-6], что в износостойкой стали 95Х18 (440С) возможно получение практически полностью аустенитной структуры. В этом случае кроме износостойкости сталь должна обладать комплексом высоких характеристик механических свойств, особенно ударной вязкостью. При традиционных режимах закалки и отпуска на структуру мартенсита сталь 95Х18 обладает низкой ударной вязкостью, так как интервал температур вязко-хрупкого перехода находится выше комнатной температуры [7]. Этой проблемы не существует для сталей с гранецентрированной кубической (ГЦК) кристаллической решеткой матрицы. Но повышение температуры, необходимое для обеспечения максимального содержания углерода и легирующих элементов в твердом растворе, приводит к интенсивному росту зерна [8]. Вероятно поэтому вопрос о практическом применении сталей типа 95Х18 в аустенитном состоянии в литературе практически не рассматривается.

Для растворения основной массы карбидов необходима температура выше 1100 ºС. При этом соотношение аустенита и мартенсита в результате закалки зависит не только от температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения, но и от способа охлаждения [9, 10].

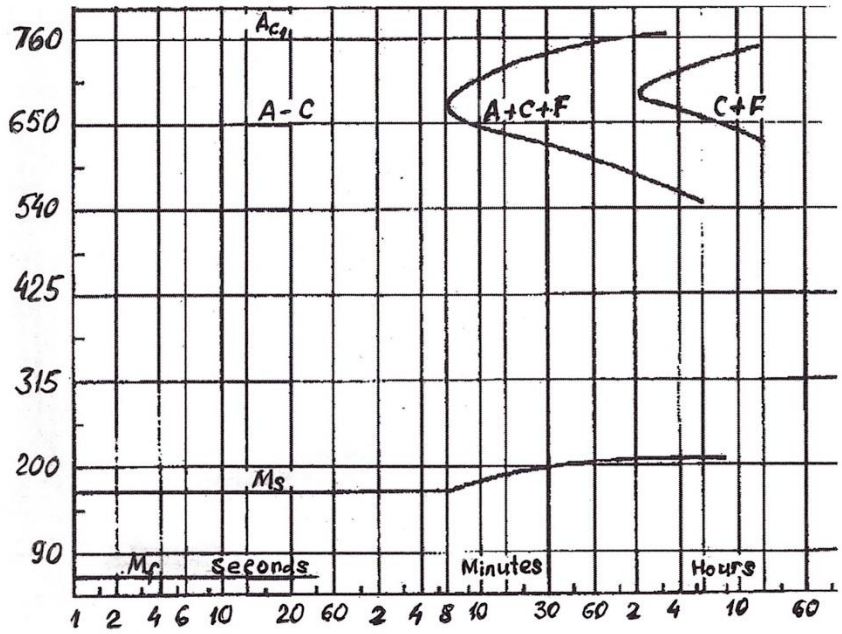


Рис.2. Диаграмма изотермического распада аустенита в стали 440 ºС (закалка 1040 ºС в масло) [11]

Необходимо достаточно быстрое охлаждение в области минимальной устойчивости аустенита (рис.2), а остановка или замедление охлаждения в интервале температур мартенситного превращения может привести к значительной стабилизации аустенита [10]. Таким образом, возможно

определение режимов термической обработки, приводящих к получению аустенитной структуры при реализации ее преимуществ в отношении механических свойств. Это потребует выполнения значительного объема экспериментальных исследований. Чтобы уменьшить количество рентгеноструктурных и высокотехнологичных металлографических исследований с применением растровой микроскопии и микроанализа, была решена задача разработки экспресс-метода оценки количества парамагнитных фаз по измерению усилия отрыва постоянного магнита от образца после различной термической обработки.

Дополнительной проблемой при проведении металлографических исследований сталей с метастабильной аустенитной структурой является образование мартенсита деформации на поверхности образца при абразивном шлифовании. Была рассмотрена возможность бездеформационного приготовления образцов с использованием струйной электролитно-плазменной обработки.

2. Материалы и методика

В качестве материала для исследований использовались образцы, изготовленные из стали 95Х18 (ГОСТ 5949-2018), пруток диаметр 36 мм.

Было разработано и изготовлено устройство для измерения силы отрыва постоянного магнита от образца [12], подвергнутого термической обработке по разным режимам (рис.3). Использовались образцы диаметром 36 мм и высотой 30 мм.

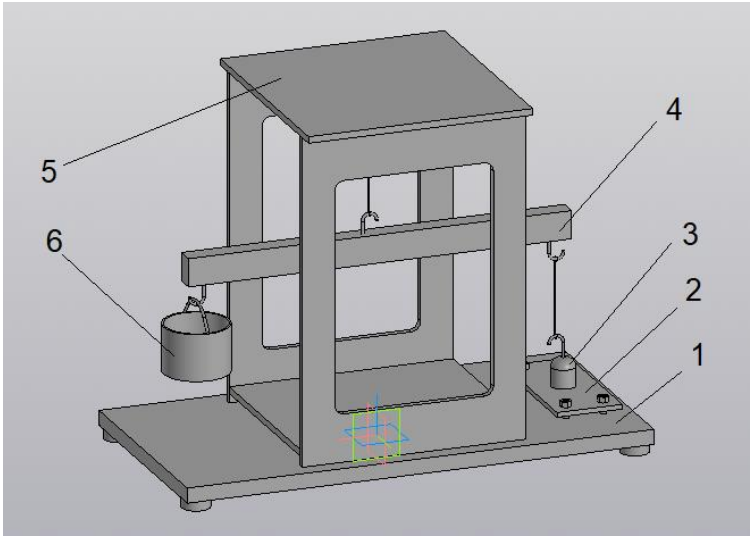


Рис. 3. Устройство для измерения силы отрыва магнита

На опорной плите (1) установлен блок для позиционировния и крепления образца (2). Образец закреплен прижимной планкой с отверстием,

в которое свободно входит магнит, приклеенный к торцу магнитного блока (3). Использовался постоянный магнит неодим-железо-бор диаметром 25 мм и толщиной 3 мм. Магнитный блок через планку (4), прикрепленную к верхней панели (5), связан с емкостью для груза (6). Для обеспечения минимальной дискретности весовых характеристик вместо разновесов используются бронзовые гранулы. Система нитей, соединяющих подвижные части установки с неподвижными, обеспечивает мобильность установки и возможность ее использования на не идеально ровных поверхностях (достаточно проконтролировать вертикальное расположение нитей). Измеряется минимальный вес груза, необходимый для отрыва магнита от образца.

Эксперимент по обработке поверхности для бездеформационного шлифования проводился на опытно экспериментальной установке (рис. 4) с бесступенчатой регулировкой напряжения и полым катодом [13].

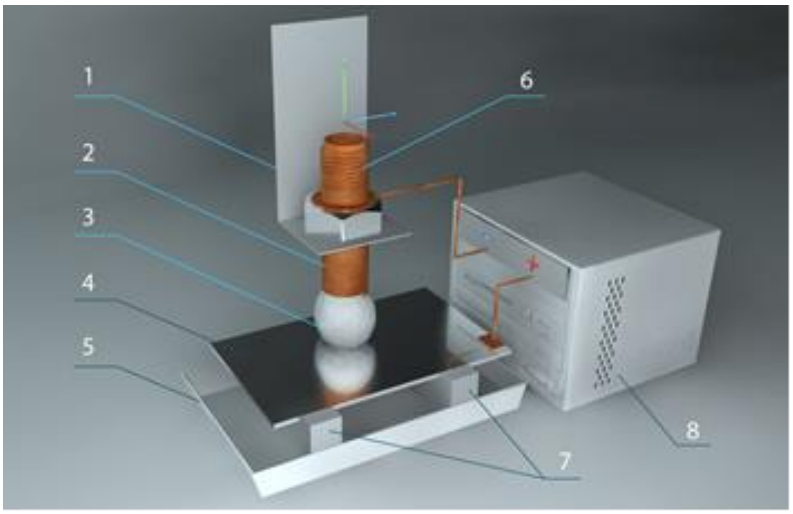


Рис. 4. Принципиальная схема струйной электролитно-плазменной обработки поверхности:1- держатель токоподвода, 2 -полый токоподвод, 3 - электролитический катод, 4 - образец – анод, 5 - ванна приема электролита, 6 - трубопровод подачи электролита, 7 - изолированные опоры, 8 - блок питания.

Для обработки были выбраны три состава электролита:

- раствор NaCl с концентрацией 35 г/л в водопроводной воде;
- раствор $NaNO_3$ с концентрацией 50 г/л в водопроводной воде, для струйной размерной обработки;
- раствор H_2SO_4 с концентрацией 4 г/л и Na_2SO_4 с концентрацией 30 г/л в водопроводной воде для финишной обработки поверхности.

Регулировались напряжение, межэлектродный промежуток, скорость подачи электрода. Основным контролируемым параметром являлась шероховатость поверхности Ra, которая измерялась профилометром TR-200.

В ходе эксперимента измерялись сила тока и температура на поверхности образца.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Определение фазового состава метастабильных аустенитных сталей.

Результаты измерения силы отрыва постоянного магнита в зависимости от режима термической обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние режима термической обработки на долю ферромагнитной составляющей в стали 95Х18

Режим термической обработки	Вес, необходимый для отрыва магнита, г	Доля ферромагнитной составляющей, %
Закалка 1190°С, 60 мин, вода	131	3,8
Закалка 1160°С, 60 мин, вода	322	9,4
Закалка 1130°С, 60 мин, вода	1195	34,9
Закалка 1080°С, 60 мин, вода	3210	93,7
Отжиг 910°С, 2 ч, с печью	3185	93
Сталь 20, нормализация	3425	100

Очевидно, что ферромагнитными свойствами в структуре 95Х18 может обладать только альфа-железо (феррит, мартенсит, бейнит). Аустенит и специальные карбиды являются парамагнитными. В качестве эталона материала, состоящего из полностью ферромагнитных фаз (феррита и небольшого количества цементита в составе перлита) была выбрана низкоуглеродистая сталь 20.

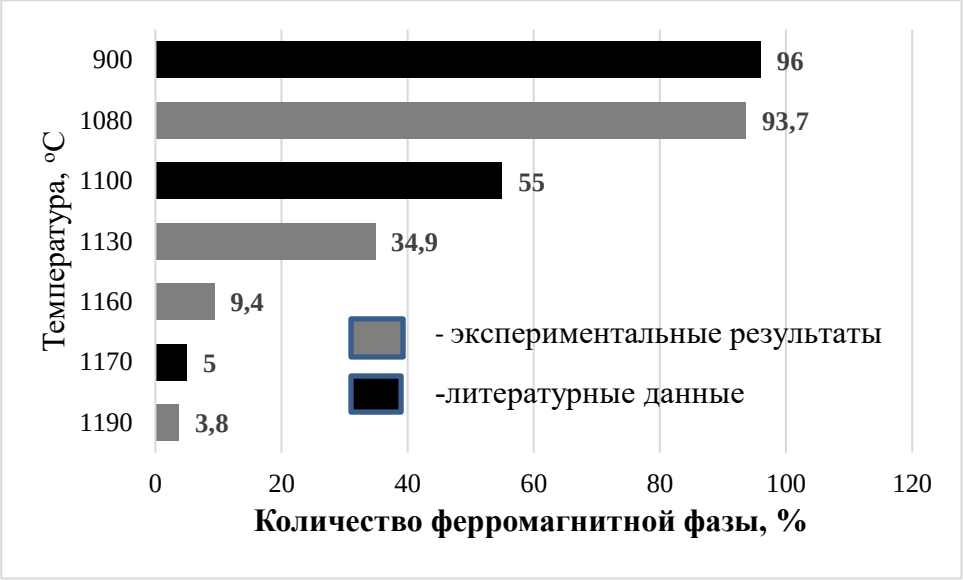


Рис. 5. Влияние температуры закалки на количество мартенсита в стали 95Х18

На рис. 5 представлена диаграмма зависимости количества ферромагнитной составляющей от температуры закалки, которая кроме полученных в работе экспериментальных данных содержит результаты аналогичных исследований, основанных на рентгеноструктурном анализе, приведенных в литературе [14]. Очевидно, что полученные результаты могут быть использованы для сравнительной оценки соотношения аустенитной и мартенситной структурной составляющей в случае использования достаточно массивных образцов и мощных постоянных магнитов.

3.2 Применение струйной электролитно-плазменной обработки в металлографических исследованиях метастабильных аустенитных сталей.

В таблице 2 приведены результаты эксперимента для трех наиболее характерных режимов струйной электролитно-плазменной обработки. На рис. 6 показан вид структуры, выявляемой в результате обработки по указанным режимам.

Таблица 2. Влияние режима струйной электролитно-плазменной обработки на шероховатость поверхности

№	Напряжение, В	Сила тока, А	Подача, мм/мин	Межэлектродный промежуток, мм	Температура в месте обработки, °С	Ra, мкм	Состав электролита
1	275	4,8	210	3-3,5	48	3,2	раствор NaCl (35 г/л) в воде
2	330	3,7	144	12	43	6,1	раствор $NaNO_3$(50 г/л) в воде
3	300	2,5-3	180	7	76-80	0,2	раствор Na_2SO_4 (4 г/л) + H_2SO_4 (30 г/л) в воде

Видно, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает состав электролита. Для размерной обработки наиболее эффективным показал себя раствор $NaNO_3$ (50 г/л) в водопроводной воде. Увеличение межэлектродного промежутка значительно снижает скорость удаления слоев.

Шероховатость поверхности при обработке по режиму 1 соответствует аналогичной величине при тонкой абразивной обработке металлографических шлифов, а обработка по режиму 3 приводит к шероховатости, соответствующей шероховатости металлографических шлифов после химического травления [15].

а) б) в)

Рис. 6. Вид микроструктуры стали 95Х18, выявляемой при струйной электролитно-плазменной обработке по различным режимам: а) режим 1, х50; б) режим 2, х50; в) режим 3, х100

При электролитно-плазменной обработке по указанным режимам одновременно с выравниванием поверхности происходит травление, состоящее в селективном растворении различных структурных составляющих. Обработка по режиму 2 приводит к избыточному травлению. Такой результат возможен и при любых других способах исследования микроструктуры в процессе металлографических исследований. Видно, что последующая обработка по режиму 3 приводит к выявлению основных характеристик микроструктуры – размера аустенитного зерна и наличию карбидов.

Важным результатом проведенных измерений является то, что температура на поверхности образца не превышала 80 °С. Такая температура, учитывая скорость подачи электрода, не может привести к каким-либо структурным изменениям.

Вместе с тем процесс удаления материала с поверхности протекает достаточно быстро и составлял 50-100 мкм за один проход. В рассмотренных опытах исходная шероховатость поверхности составляла Ra > 25. Ранее показано, что данный вид обработки позволяет получать полированные поверхности с параметром шероховатости Ra ≥ 0,034 [16].

4. Заключение

Изучение структуры и свойств сталей с метастабильной аустенитной структурой представляет собой определенные трудности, снижающие интерес исследователей к их проведению. В частности, доля остаточного аустенита является функцией многих взаимозависимых параметров помимо химического состава и температуры нагрева под закалку, что приводит к существенным противоречиям в результатах разных исследований. Для выявления условий формирования структуры метастабильного аустенита целесообразно проведение предварительного экспресс-анализа количества

ферромагнитной составляющей на стадии планирования эксперимента. Рассмотренная методика может представлять интерес и для исследования структуры и свойств других сталей, например, сталей аустенитно-мартенситного класса, применяемых для изготовления рабочих колес центробежных компрессоров [17].

Применение бездеформационной подготовки образцов для металлографических исследований обязательно для изучения сталей со структурой метастабильного аустенита. Но использование струйной электролитно-плазменной обработки в металлографии не ограничивается этой задачей. Способ является универсальным и достаточно производительным. Необходимо проведение дальнейших исследований широкого спектра режимов обработки, состава реактивов, подбора их комбинаций для различных сталей и сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Alekseeva E., Effect of Inclusions on the Corrosion Properties of the Nickel-Based Alloys 718 and EP718 / Alekseeva E., Karasev A., Jönsson P.G, Alkhimenko A. // Metals. – 2020. –10(9). – p. 1177.

[2] Теплухин Г.Н. Материаловедение. Металлические материалы / Г.Н. Теплухин, В.Г. Теплухин, И.В. Теплухина. – 2-е изд., испр. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 170 с.

[3] Мулявко, Н.М. Анализ эксплуатационной стойкости отливок из стали 110Г13Л / Н.М. Мулявко // Известия Челябинского научного центра. - 2001. – вып. 4 (13). – С. 28-30.

[4] Yang J.R. Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel / J.R. Yang, T.H. Yu, C.H. Wang // Materials Science and Engineering A 438–440 (2006). – p. 276–280.

[5] Новые режимы обработки высокохромистых сталей с высокой износостойкостью для насосов буровых установок / Никифорова С.М., Хадыев М.С., Жилин А.С., Филиппов М.А., Рыжков М.А., Озерец Н.Н. // – Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-1. – С. 73-77.

[6] Теплухин, В.Г. О поверхностной закалке стали 95Х18 для использования в деталях горного и металлургического оборудования / В.Г. Теплухин, И.И. Козарь, В.П. Третьяков // XVII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», Санкт-Петербург, 23 апреля 2020г. – С.260-263.

[7] Геллер Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – 5-е изд. – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.

[8] Effect of Partial Solution Treatment Temperature on Microstructure and Tensile Properties of 440C Martensitic Stainless Steel / Syarif, J., Yousuf,

M.H., Sajuri, Z., Baghdadi, A.H., Merabtene, M., Omar, M.Z. // Metals. – 2020. –10(5). – p. 694.
[9] Investigation of microstructures and properties of 440c martensitic stainless steel / S. H. Salleh, M. Z. Omar, J. Syarif, M. J. Ghazali, S. Abdullah and Z. Sajuri // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME). – Vol. 4 (2009), No. 2. – p. 123-126.
[10] Счастливцев В.М. О роли остаточного аустенита в структуре легированных сталей и влиянии на него внешних воздействий. / В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина, А.Ю. Калетин. // Физика металлов и металловедение. – 2014. – том 115, №9. - С. 962-976.
[11] Crucible Industries. Data Sheets. 440C. – URL: https://www.crucible.com/Products.aspx?c=DoList (дата обращения 22.05.2022).
[12] Экспресс-методика определения количества остаточного аустенита/ В.Г. Теплухин, И.В. Лопатко, В.Н. Кудрявцев, В.С. Кобчиков, Гао Пань, В.С. Петрович, А.Ю. Стогов, Н.В. Лобанов // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. – Санкт-Петербург, 2022. С. 131-136.
[13] Popov A.I Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma / Popov A.I., Radkevich,M.M., Teplukhin,V.G. // Advances in Mechanical Engineering. – LNME, Springer, Cham, 2020. – p. 139–149.
[14] Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей / М.А. Филиппов, М.А. Гервасьев, С.М. Никифорова и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – №3. – С. 434-439.
[15] Герасимова Л.П. Практическая металлография / Л.П. Герасимова, Ю.П. Гук. - Москва, 2017.
[16] Исследование процессов съема металла при электролитической струйной прошивке отверстий в нержавеющих сталях / Попов А.И., Радкевич М.М., Теплухин В.Г. и др. // Современное машиностроение : Наука и образование. - 2021. - № 10. - С. 657-674.
[17] Внедрение технологичного коррозионностойкого материала взамен стали 07Х16Н6 для изготовления рабочих колес центробежных копрессоров / Поморцев Е.Н, Галиахметов И.Г., Чигарин В.И. и др. // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – №5. – с. 44-47.

V.G. Teplukhin, A.I. Popov, D.S. Fomin, M.M. Radkevich,

FEATURES OF INVESTIGATION OF STEELS WITH METASTABLE AUSTENITIC STRUCTURE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper considers the issues of studying wear-resistant steels with a metastable austenitic structure. An express method for estimating the proportion of the ferromagnetic component is proposed. A comparison of the obtained results with the literature data showed the possibility of using the measurement of the pull-off force of a permanent magnet to determine the amount of martensite after austenitization of the considered steels. To prevent the formation of a martensitic structure in the surface layer of metastable austenite during the manufacture of samples for metallographic studies, a deformation-free method of jet electrolytic plasma treatment is proposed.

Key words: metastable austenite, martensite, permanent magnet, electrolytic plasma treatment, metallographic studies

REFERENCES

[1] Alekseeva E., Effect of Inclusions on the Corrosion Properties of the Nickel-Based Alloys 718 and EP718 / Alekseeva E., Karasev A., Jönsson P.G, Alkhimenko A. // Metals. – 2020. –10(9). – p. 1177. (rus.)

[2] Teplukhin G.N. Material Science. Metallic materials / G.N. Teplukhin, V.G. Teplukhin, I.V. Teplukhin. - 2nd ed., corrected. - St. Petersburg. : POLYTECH-PRESS, 2022. - 170 p. (rus.)

[3] Mulyavko, N.M. Analysis of the operational durability of castings from steel 110G13L / N.M. Mulyavko // Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center. - 2001. - issue. 4 (13). – S. 28-30. (rus.)

[4] Yang J.R. Martensitic transformations in AISI 440C stainless steel / J.R. Yang, T.H. Yu, C.H. Wang // Materials Science and Engineering A 438–440 (2006). - R. 276–280.

[5] New modes of heat treatment of high-chromium steels with high wear resistance for pumps / Nikiforova S.M., Khadyev M.S., Zhilin A.S., Filippov M.A., Ryzhkov M.A., Ozerets N.N. . // – Basic research. - 2016. - No. 10-1. - S. 73-77.

[6] Teplukhin, V.G. On surface hardening of steel 95X18 parts for mining and metallurgy equipment / V.G. Teplukhin, I.I. Kozar, V.P. Tretyakov // XVII International Scientific and Practical Conference "Innovations and Prospects

for the Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2020", St. Petersburg, April 23, 2020. – P.260-263. (rus.)
[7] Geller Yu.A. Tool steels / Yu.A. Geller. – 5th ed. - M. : Metallurgy, 1983. - 527 p.
[8] Effect of Partial Solution Treatment Temperature on Microstructure and Tensile Properties of 440C Martensitic Stainless Steel / Syarif, J., Yousuf, M.H., Sajuri, Z., Baghdadi, A.H., Merabtene, M., Omar, M.Z. // Metals. – 2020. –10(5). – p. 694. (rus.)
[9] Investigation of microstructures and properties of 440c martensitic stainless steel / S. H. Salleh, M. Z. Omar, J. Syarif, M. J. Ghazali, S. Abdullah and Z. Sajuri // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME). – Vol. 4 (2009), no. 2.-p. 123-126.
[10] Schastlivtsev V.M. On the role of residual austenite in the structure of alloyed steels and the influence of external influences on it. / V.M. Schastlivtsev, Yu.V. Kaletina, E.A. Fokina, A.Yu. Kaletin. // Physics of metals and metal science. - 2014. - Volume 115, No. 9. - S. 962-976. (rus.)
[11] Crucible Industries. data sheets. 440C. – URL: https://www.crucible.com/Products.aspx?c=DoList (Accessed 05/22/2022).
[12] Express method for determining the amount of residual austenite / V.G. Teplukhin, I.V. Lopatko, V.N. Kudryavtsev, V.S. Kobchikov, Gao Pan, V.S. Petrovich, A.Yu. Stogov, N.V. Lobanov // Models and methods for the development of engineering technologies in the context of digitalization of the Russian economy. - St. Petersburg, 2022. S. 131-136. (rus.)
[13] Popov A.I Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma / Popov A.I., Radkevich, M.M., Teplukhin, V.G. // Advances in Mechanical Engineering. – LNME, Springer, Cham, 2020. – p. 139–149.
[14] The use of residual austenite to improve the abrasive wear resistance of high-chromium steels / M.A. Filippov, M.A. Gervasiev, S.M. Nikiforova et al. // Actual problems in mechanical engineering. - 2016. - No. 3. - S. 434-439. (rus.)
[15] Gerasimova L.P. Practical metallography / L.P. Gerasimov, Yu.P. Hook. - Moscow, 2017. (rus.)
[16] A.I. Popov, M.M. Radkevich, V.G. Teplukhin, Investigation of metal removal processes during electrolytic jet piercing of holes in stainless steels. etc. // Modern engineering: Science and education. - 2021. - No. 10. - S. 657-674.
[17] Implementation of technological corrosion-resistant material instead of steel 07X16H6 for the manufacture of impellers of centrifugal compressors / Pomortsev E.N., Galiakhmetov I.G., Chigarin V.I. etc. // Compressor technology and pneumatics. - 2013. - No. 5. - with. 44-47. (rus.)

ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование :
материалы 11-й Международной научной конференции / Под ред. А.Н. Евграфова и
А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.

УДК 621.77.014

П. А. Кузнецов[1], Р. В. Кузнецов[1], А. О. Просторова[1], В. П. Третьяков[1]

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СО СПЕЧЕННЫМИ ВКЛАДЫШАМИ

[1]Павел Алексеевич Кузнецов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: kuznetsov_pa@spbstu.ru.

[1]Руслан Валерьевич Кузнецов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-7537, E-mail: kuznetsov_rv@spbstu.ru.

[1]Александра Олеговна Просторова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9530, E-mail: prostorova_ao@spbstu.ru.

[1]Валерий Павлович Третьяков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-9302, E-mail: tretyakov_vp@spbstu.ru.

Аннотация

Статья посвящена исследованию формования биметаллических материалов и изделий с рабочими вкладышами из спеченных порошковых материалов. Исследуемые способы заключаются в предварительном изготовлении спеченных рабочих элементов со специальными свойствами из порошков требуемого состава, последующем совместном формовании спеченных элементов с материалом основы из жидкого металла или из порошков, и совместной термообработке. Процесс обеспечивает получение биметаллических изделий из разнородных порошков и металлов с

различающимися физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Технология может эффективно использоваться при изготовлении биметаллических деталей широкой номенклатуры: подшипников скольжения, катализаторов, фильтров и т. д.

Ключевые слова: биметаллы, формование материалов, прессование порошков, спеченные изделия, штамповка жидкого металла.

Введение

Применение биметаллических материалов позволяет эффективно решать задачи создания новых рациональных процессов получения и обработки функциональных материалов, а также производства изделий со специальными свойствами [1]. Методы порошковой металлургии существенно расширяют номенклатуру получаемых биметаллических изделий, в том числе подшипников скольжения, биметаллических пластин, электроконтактов и т. д. [2].

Чаще всего для изготовления биметаллических изделий из порошков используют прессование в жестких пресс-формах, однако при этом следует учитывать особенности совместной формовки двух материалов с разными свойствами, их спекания и другой обработки. Наиболее простым является прессование изделий с горизонтальным расположением слоев: порошки поочередно засыпаются в полость матрицы из отдельных бункеров, порошки прессуются, и спрессованное изделие выталкивается из матрицы нижним пуансоном.

При прессовании биметаллических изделий с вертикальным расположением порошковых слоев можно выделить несколько технологических вариантов. В экспериментальных работах и при получении маленьких партий изделий небольшой высоты при засыпке разных слоёв порошков используются жесткие перегородки. Для прессования более высоких многослойных изделий используется принцип стадийного прессования [3], показанный на рис. 1. Прессование осуществляется следующим образом. Порошок наружного слоя 2 засыпается в матрицу 1 и прессуется внешним пуансоном 3 до требуемой плотности. Внутренний пуансон 4 извлекается из матрицы, в образовавшееся пространство засыпается порошок внутреннего слоя 5, который прессуется в свою очередь пуансоном 4, и одновременно напрессовывается на порошок наружного слоя. Стадии повторяются до получения изделия требуемого размера по высоте.

Многообразие технологических вариантов изготовления биметаллических изделий из порошков обусловлено широкой гаммой их физических и механических свойств и режимов обработки [4, 5].

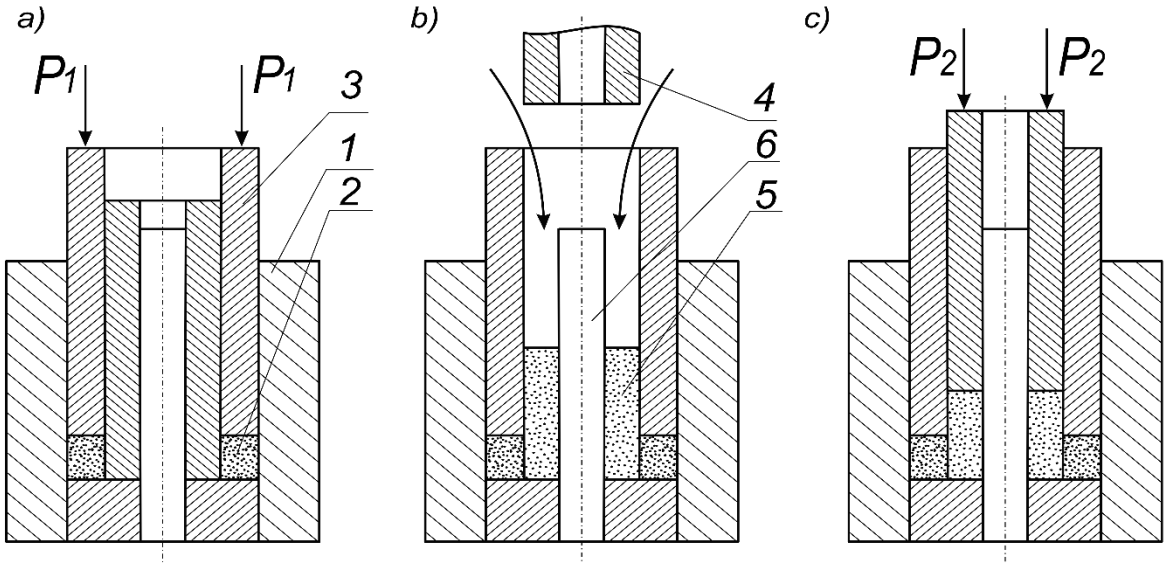


Рис. 1. Схема прессования биметаллических изделий из порошков: *a)* – засыпка и прессование 1-ой дозы порошка наружного слоя, *b)* – засыпка 1-ой дозы порошка внутреннего слоя; *c)* – прессование 1-ой дозы порошка внутреннего слоя, где 1 – матрица, 2 – порошок наружного слоя; 3 – пуансон внешний; 4 – пуансон внутренний; 5 – порошок внутреннего слоя; 6 – оправка.

При одинаковых значениях давления, необходимого для прессования внутреннего и наружного слоев, формование порошков проводится в одной матрице совместно. Если для прессования каждого слоя необходимы разные величины давления, тогда порошки нужно прессовать отдельно и, как правило, в разных матрицах. В этом случае используется «пооперационное прессование», при котором один из элементов послойного изделия прессуется в отдельной пресс-форме, а затем вставляется во вторую пресс-форму. После засыпки порошка второго слоя вся система прессуется в биметаллическое изделие. Однако в описанном варианте необходимо согласовывать температуры спекания спрессованных слоев биметаллического изделия. Если интервалы возможных температур спекания данных слоев и времени их спекания имеют общие значения, можно сказать «пересекаются», то слои можно спекать вместе. При невыполнении этих условий слои приходится спекать раздельно и прессовать так же по отдельности. Сначала спекается слой из материала с более высокой температурой плавления, затем на него напрессовывается порошок соседнего слоя, и они спекаются вместе. Такое возможно, если температура взаимной диффузии двух слоев меньше, чем температуры спекания этих слоев. Если данное условие не выполняется, то слои прессуются и спекаются раздельно, а затем соединяются, например, с помощью пластической деформации.

Технологические возможности будут шире, если рабочий слой биметаллического изделия предварительно изготовить в виде профилированного спеченного вкладыша с требуемыми свойствами [6, 7,

8]. В этом случае биметаллическое изделие можно изготовить путем совместного формования вкладыша с материалом основы – другим порошком, жидким металлом и т. д., что существенно расширяет технологические возможности получения биметаллических материалов самого широкого назначения [9, 10]. Основной особенностью такой технологии является возможность получения не только биметаллического материала, но и готового изделия.

Методы

Для изучения технологических возможностей и особенностей изготовления биметаллических изделий с использованием предварительно спрессованных и спеченных вкладышей была выбрана типовая деталь – «биметаллическая втулка» и разработана пресс-форма для её прессования. Марки порошковых материалов, использованных при исследовании представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов

Наименование марки порошка	Химический состав (%)						Добавка
	Fe	Cu	C	Ni	Sn	Окислы	
АНС 100.29	99,84	-	0,003	-	-	0,13	0,7% - стеарат цинка
РМ 225Н	95,5	2	0,5	2	-	-	
БрОГр2	-	88,3	2	-	9	-	

На рис. 2 представлена принципиальная схема прессования биметаллического изделия типа «биметаллическая втулка» по предлагаемому варианту использования заранее изготовленного спеченного вкладыша. Предварительно на прессе ПСУ-125 из бронзового порошка БрОГр2 ГОСТ 26719-85 прессовали вкладыш в виде втулки с относительной плотностью 0,75. Спекание втулки осуществляли в электропечи с защитной атмосферой ПКЛ-1,2-36 со следующими режимами: время спекания 1,5 часа, температура спекания 800 °С. Совместное прессование изделий типа «биметаллическая втулка», представленное на рисунке 2, осуществлялось следующим образом. На подвижную оправку *2* устанавливали предварительно полученную спеченную втулку *9* высотой ho. Высота засыпки порошка $Hz.o.$ определялась из условия, что доза порошка равна массе основы требуемой плотности. Усилие прессования выбиралось по экспериментальной кривой уплотняемости конкретного порошка.

В зазор между нижним пуансоном *3* и матрицей *1* засыпался порошок основы изделия марки АНС 100.29. Прессование осуществлялось верхним пуансоном *10*, который уплотнял наружный слой на нижнем упоре-пуансоне *3* и одновременно перемещал вкладыш *9* в конечное положение. Одновременно с прессованием происходила напрессовка порошка на спеченный материал.

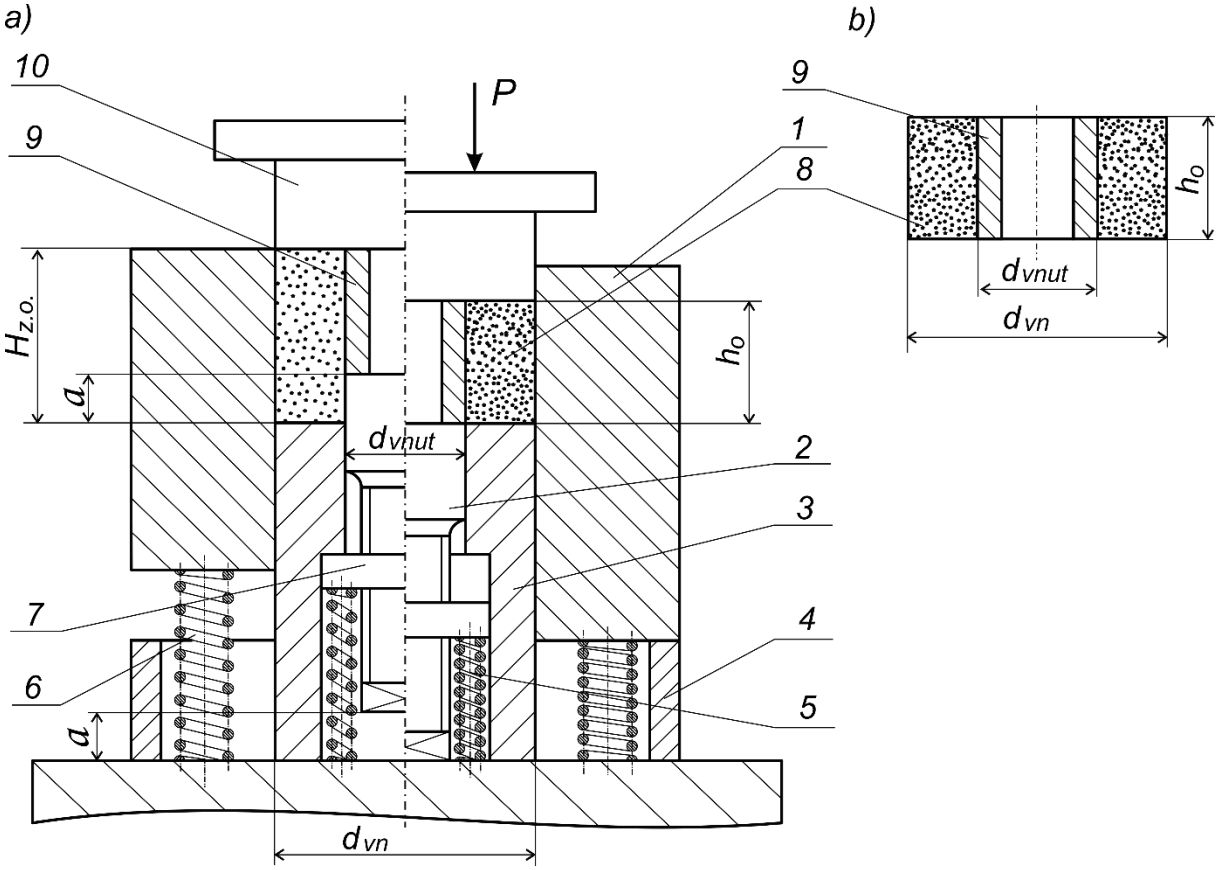


Рис. 2. Принципиальная схема пресс-формы *(a)* для совместного прессования изделий типа «биметаллическая втулка» *(b)*: 1 – матрица; 2 – подвижная оправка; 3 – нижний пуансон; 4 – опорная втулка; 5 – пружина оправки; 6 – пружина матрицы; 7 – регулировочная гайка; 8 – порошок основы; 9 – спеченный вкладыш- втулка; 10 – верхний пуансон

Спекание спрессованного биметаллического изделия осуществлялось в той же электропечи с защитной атмосферой ПКЛ-1,2-36 при следующем режиме: время спекания равнялось 2 часа, температура спекания составляла 900 °С.

Перспективным методом изготовления биметаллических изделий со спеченными вкладышами можно считать метод совместной штамповки вкладышей с жидким металлом [11]. На рис. 3 представлена принципиальная схема процесса совместной штамповки жидкого металла и рабочего вкладыша из спеченного порошка. Для исследования вкладыш прессовали из порошка РМ225Н, обладающего антифрикционными

свойствами. Прессование проводили до плотности 0,70-0,75, а процесс спекания осуществляли при температуре 1150 °С в течение 1,5 часов.

Штамповку биметаллических образцов производили следующим образом. Матрицу *1* устанавливали и закрепляли на нижней плите *2*, в полость матрицы *1* коаксиально устанавливали оправку *3* в опоре *4*. На рабочие поверхности матрицы, оправки и опоры наносили защитное антипригарное покрытие. Собранную оснастку нагревали до рабочей температуры с помощью нагревательного элемента *5*. В матрицу 1 заливали фиксированную дозу жидкого алюминия АК9ч, являвшегося основой 6 биметаллического образца [12].

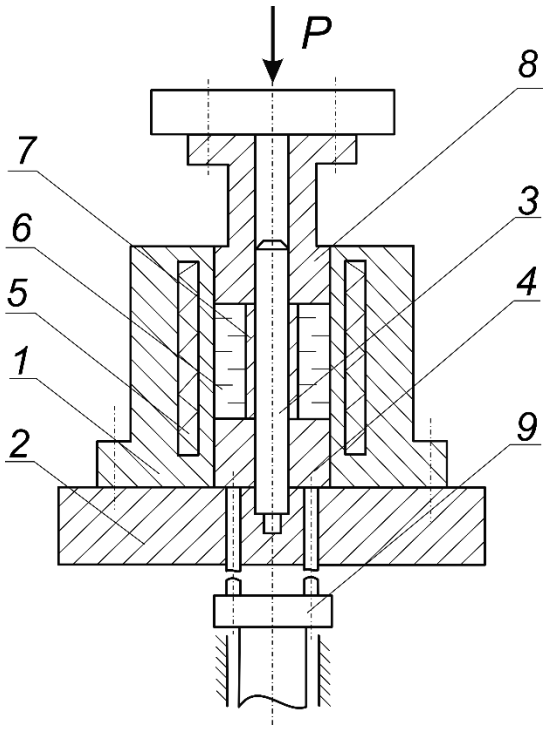


Рис. 3. Принципиальная схема штамповки вкладыша с жидким металлом: 1 -матрица, 2 - нижняя плита, 3 - оправка, 4 - опора, 5 - нагревательные элементы, 6 - жидкий алюминий, 7 - вкладыш, 8 - пуансон, 9 - выталкиватель.

Рабочий вкладыш *7* из спеченного порошкового материала, зафиксированный на оправке *3* с помощью пуансона *8*, погружали в жидкий металл основы *6* и фиксировали в требуемом положении. При дальнейшем движении пуансона *8* осуществляли совместную штамповку жидкого металла *6* и вкладыша *7*. Готовое биметаллическое изделие выталкивали из матрицы *1* выталкивателем *9*.

Результаты

Испытания прочности соединения слоев изделия, полученного совместной штамповкой спеченного образца с жидким металлом,

проводились на кольцеобразных образцах размером Ø55×20 мм, с определением усилия – $\tau_{ср}$. Численное значение $\tau_{ср}$ определяли путем отношения усилия, создаваемого испытательной машиной, к площади контактной поверхности между алюминиевым сплавом и порошковой втулкой. Прочность соединения на срез составила 38-42 МПа.

Металлографические исследования зоны соединения слоёв показали направленное затвердевание алюминиевого сплава, равномерность его структуры, а также отсутствие несплошностей и газовых пор в зоне соединения слоёв из заданных материалов (рис. 4) [12].

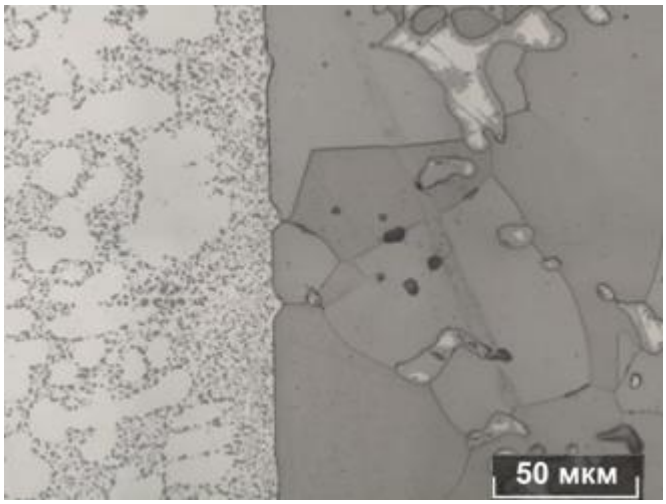


Рис. 4. Микроструктура зоны соединения слоев АК9ч и РМ 225Н

Обсуждение

Исследованные технологические процессы обеспечивают высокое качество биметаллического узла для изделий общего и специального машиностроения с повышенными техническими и эксплуатационными характеристиками благодаря высоким адгезионным свойствам биметалла.

Полученные результаты создают обоснованные предпосылки для практического использования и дальнейшего исследования технологии совместного прессования порошковых, спеченных материалов и жидкого металла, а также других процессов, которые могут явиться основой для создания эффективных комбинированных процессов изготовления новых биметаллических материалов [13, 14, 15]. Данная технология может существенно расширить номенклатуру биметаллических изделий за счет использования практически любых пар материалов и/или изготовления рабочего элемента (вкладыша) произвольной формы. Кроме того, данный способ может быть реализован как на пресс-автоматах, так и на универсальных гидравлических прессах. Применение известных способов улучшения адгезии между слоями биметаллического материала, например, введение в поверхностный слой порошкового материала легирующих

элементов, позволит увеличить прочность соединения слоёв [16, 17]. Следовательно, способы можно будет эффективно применять при изготовлении нагруженных конструкционных деталей, например, зубчатых колес. Предлагаемая технология создает предпосылки для автоматизации всего цикла изготовления биметаллических изделий, что является актуальной современной задачей [18].

Заключение

Анализ результатов исследований предлагаемых способов изготовления биметаллических изделий показывает, что применение в качестве рабочего слоя предварительно спрессованного и спеченного материала делает процесс более технологичным, позволяет прогнозировать технологические и эксплуатационные характеристики биметалла. Использование в качестве материалов основы порошков при прессовании и жидких металлов при кокильном литье или штамповке обеспечивают высокий коэффициент использования материала.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследовательских работ и разработки новых технологий изготовления таких деталей как подшипники скольжения, катализаторы, многослойные фильтры и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Федорченко И.М., Францевич И.Н., Радомысельский И.Д. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения. Справочник. Киев: Наукова думка. 1985. 624 с.

[2] Кобелев А.Г., Потапов И.Н., Кузнецов Е.В. Технология слоистых металлов. М: Металлургия. 1991. 247 с.

[3] Любимов В.И., Ковалевич Ю.А., Варавини В.А., Заяц О.В. АС СССР №1026958, Бюллетень № 25, 1982.

[4] Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Girshov, V.L. Structure and Properties of Bimetallic Tools from Steels 5KhNM/R6M5. Metal Science and Heat Treatment. 2021. 62 (11-12). pp. 753-758.

[5] Kuznetsov, P.A., Prostorova, A.O., Tretyakov, V.P., Yakovitskaya, M.V. Adsorption cryogenic vacuum pumps with sorbent elements based on zeolite and cooper powders. AIP Conference Proceedings. 2020. 2285. 040011. pp. 159-166.

[6] Кузнецов Р.В., Кузнецов П.А., Карачевцев И.Д. Эластостатическое прессование спеченных рабочих вкладышей с градиентной структурой для биметаллических подшипников скольжения. Современное машиностроение: Наука и образование. 2019. С. 663-673.

[7] Rudskoy, A.I., Kokorin, V.N. Compaction of heterophase mechanical mixtures in technological processes for the utilization of technogenic waste from ferrous metallurgy plants. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54, Iss. 6. pp. 518-521.
[8] Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Phuc, D.V. Research and simulation of the deformation process of dispersion-hardened powder in a capsule. Materials Physicsand Mechanics. 2016. 25(1). pp 68-76.
[9] Novák, P., Pruša, F., Jaworska, L. Modern methods in powder metallurgy of alloys, intermetallic and composites. 26th International Conference on Metallurgy and Materials. 2017. pp. 1619-1624.
[10] Nguyen N.D., Eremeeva, Zh.V., Lopatin, V.Yu. Formation of structure and properties during the thermal treatment of powder steels with different carbon-containing components. Wschodnioeuropejskie Czasopismo naukowe. East European Scientific Journal. 2019. #10(50). pp. 47-50.
[11] Кузнецов Р.В., Радкевич М.М., Кузнецов П.А., Изобретения. Полезные модели. Оф. Бюллетень ФСИС (Роспатент) 22. ФИПС. Москва. 2019.
[12] Kuznetsov, R.V., Radkevich, M.M., Kuznetsov, P.A., Ol'khovik E.O. The technology for producing of wear-resistant composite bimetal based on cast aluminum and powder materials. TPACEE-2019. E3S Web of Conferences. #164. 03045. 2020. doi:10.1051/e3sconf/202016403045.
[13] Aksenov, L.B., Kunkin, S.N., Potapov, N.M. System Analysis of Cold Axial Rotary Forging of Thin-Walled Tube Blanks, Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. pp. 20-29.
[14] Aksenov, L.B., Kunkin, S.N., Potapov, N.M., Axial Rotary Forging of Inner Flanges at Thin Wall Tube Blanks, Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. pp. 1-9.
[15] Bufferd, Allan S., Antes, H.W., Lenel, F.V. Progress in powder metallurgy 1972. Progress in Powder Metallurgy. 2017. 28 p.
[16] Zhang, X.M. et al. Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 436. #1. pp. 012-019.
[17] Wei, M. et al. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing. Journal of Adhesion Science and Technology. 2018. Vol. 32. # 19. pp. 2150-2161.
[18] Любомудров С.А., Колодяжный Д.Ю., Орлов С.Г. Технологическое обеспечение качества машиностроительного производства. СПб: СПбПУ. 2020. 191 с.

P.A. Kuznetsov, R.V. Kuznetsov, A.O. Prostorova, V.P. Tretyakov

TECHNOLOGY OF BIMETALLIC PRODUCTS FORMING BASED ON SINTERED INSERTS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article is devoted to the study of the formation of bimetallic materials and products with working inserts made of sintered powder materials. The methods under study consist in the preliminary manufacture of sintered working elements with special properties from powders of the required composition, subsequent joint molding of sintered elements with a base material of liquid metal or powders, and joint heat treatment. The process ensures the production of bimetallic products from dissimilar powders and metals with different physical, mechanical and operational characteristics. The technology can be effectively used in the manufacture of bimetallic parts of a wide range: sliding bearings, catalysts, filters, etc.

Key words: bimetals, forming of materials, pressing of powders, sintered products, stamping of liquid metal.

REFERENCES

[1] Fedorchenko I.M., Frantsevich I.N., Radomyselsky I.D. Powder metallurgy. Materials, technology, properties, applications. Guide. Kiev: Naukova dumka. 1985. 624 p.
[2] Kobelev A.G., Potapov I.N., Kuznetsov E.V. Technology of layered metals. M: Metallurgy. 1991. 247 p.
[3] Lyubimov V.I., Kovalevich Yu.A., Varavin V.A., Zayats O.V. AS USSR. No.1026958, Bull. No.25, 1982.
[4] Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Girshov, V.L. Structure and Properties of Bimetallic Tools from Steels 5KhNM/R6M5. Metal Science and Heat Treatment. 2021. 62 (11-12). pp. 753-758.
[5] Kuznetsov, P.A., Prostorova, A.O., Tretyakov, V.P., Yakovitskaya, M.V. Adsorption cryogenic vacuum pumps with sorbent elements based on zeolite and cooper powders. AIP Conference Proceedings. 2020. 2285. 040011. pp. 159-166.
[6] Kuznetsov R.V., Kuznetsov P.A., Karachevtsev I.D. Elastostatic pressing of sintered working inserts with gradient structure for bimetallic sliding bearings. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. C. 663-673.

[7] Rudskoy, A.I., Kokorin, V.N. Compaction of heterophase mechanical mixtures in technological processes for the utilization of technogenic waste from ferrous metallurgy plants. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54, Iss. 6. pp. 518-521.
[8] Tsemenko, V.N., Ganin, S.V., Phuc, D.V. Research and simulation of the deformation process of dispersion-hardened powder in a capsule. Materials Physicsand Mechanics. 2016. 25(1). pp 68-76.
[9] Novák, P., Pruša, F., Jaworska, L. Modern methods in powder metallurgy of alloys, intermetallic and composites. 26th International Conference on Metallurgy and Materials. 2017. pp. 1619-1624.
[10] Nguyen N.D., Eremeeva, Zh.V., Lopatin, V.Yu. Formation of structure and properties during the thermal treatment of powder steels with different carbon-containing components. Wschodnioeuropejskie Czasopismo naukowe. East European Scientific Journal. 2019. #10(50). pp. 47-50.
[11] Kuznetsov, R.V., Radkevich M.M., Kuznetsov P.A., RU 2 696 164 C1, IPC B22D 18/02, B32B 15/00. Russian Federation, assignee 2019.
[12] Kuznetsov, R.V., Radkevich, M.M., Kuznetsov, P.A., Ol'khovik E.O. The technology for producing of wear-resistant composite bimetal based on cast aluminum and powder materials. TPACEE-2019. E3S Web of Conferences. #164. 03045. 2020. doi:10.1051/e3sconf/202016403045.
[13] Aksenov, L.B., Kunkin, S.N., Potapov, N.M. System Analysis of Cold Axial Rotary Forging of Thin-Walled Tube Blanks, Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. pp. 20-29.
[14] Aksenov, L.B., Kunkin, S.N., Potapov, N.M., Axial Rotary Forging of Inner Flanges at Thin Wall Tube Blanks, Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. pp. 1-9.
[15] Bufferd, Allan S., Antes, H.W., Lenel, F.V. Progress in powder metallurgy 1972. Progress in Powder Metallurgy. 2017. 28 p.
[16] Zhang, X.M. et al. Microstructure and Bonding Strength of Aluminum Bronze on ASTM 1045 Steel by CMT welding. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 436. #1. pp. 012-019.
[17] Wei, M. et al. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing. Journal of Adhesion Science and Technology. 2018. Vol. 32. # 19. pp. 2150-2161.
[18] Lyubomudrov S.A., Kolodyazhny D.Yu., Orlov S.G. Technological quality assurance of machine-building production. SPb: SPbPU, 2020. 191 p.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А
Аксенов Л.Б., 371
Андриенко П. А., 43, 59, 126
Арсентьева К. С., 3, 429
Арслан Х., 385
Арышенский В.Ю., 397
Арышенский Е.В., 397

Б
Белова С.Б., 355
Бортяков Д.Е., 310
Былов Б.Б., 355

В
Васильев А.А., 331

Г
Гасюк Д.П., 18, 341
Грачев А.А., 310
Гусев В.В., 225

Д
Давыденко Л.В., 355
Денисова Ю.Ю., 441
Добрецов Р.Ю., 29

Е
Евграфов А.Н., 82, 126
Егоров Е.Н., 355
Егоров И.М., 153
Егорова Ю.Б., 355
Елисеев К. В., 162
Емельянов А.В., 281

З
Зиновьева Т.В., 210
Зотов О.Г., 281

И
Иванова Г.В., 196
Ищук Д.Л., 441

К
Калатозишвили И.В., 429
Каразин В.И., 59
Козликин Д.П., 43, 59, 126
Коротких М.Т., 385
Косова В.А., 18, 341
Кочемировская С.В., 441
Кочемировский В.А., 441
Кудряшов Е.В., 294
Кузнецов П.А., 501
Кузнецов Р.В., 501
Кункин С.Н., 371
Кутьин А. Ю., 415
Куц Е. Н., 71

М
Мамутов В.С., 429
Манжула К.П., 263
Мансырев Э.И., 281
Махнов В.Ю., 162
Мельникова Н.Б., 294
Мохоров Д.Д., 441

Н
Нефедьев Е. Ю., 173
Никитин С.В. 310
Новомлинский М.О., 441

П
Петров Г.Н., 82, 126
Пилькевич Д.Н., 461
Платовских М.Ю., 185
Пожбелко В.И., 71, 91
Полищук М.Н., 232
Попов А. И., 461, 489
Попов А.Н., 232
Потапов Н.М., 371
Просторова А.О., 501

Р
Рагазин А.А., 397

Радкевич М.М., 461, 478, 489
Решетов Д.В., 232
Рябикин А.Ю., 196

С
Семенов Ю.А., 43, 101
Семенова Н.С., 43, 101
Скотникова М.А., 196
Смирнов А.С., 113
Смольников Б.А., 113
Стояновский Л. О., 173
Строшков Д.А., 461
Строшков К.А., 461
Сюндюков И.С., 196

Т
Теплухин В.Г., 489
Терешин В.А., 59, 82, 126
Третьяков В.М., 137
Третьяков В.П., 501

Ф
Филиппенко Г.В., 210
Фогель А.А., 441
Фомин Д.С., 461, 489

Х
Хисамов А.В., 59
Хлебосолов И.О., 59

Ч
Чеканин А.В., 248
Чеканин В.А., 248
Чернышева Н. В., 185

Ш
Шлепетинский А.Ю., 263

Я
Яковицкая М.В., 461

СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ 2022

Материалы 11-й Международной
научной конференции

23 июня 2022 года

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и призводственная литература

Подписано в печать 21.06.2022. Формат 60×90/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 33,0. Тираж 100. Заказ 2890.

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.