

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа машиностроения

ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сборник статей
Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых

27–30 ноября 2023 года



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2024

УДК 621(063)

ББК 34

И66

Рецензенты:

Доктор технических наук, доцент,
профессор Высшей школы автоматизации и робототехники
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого *А. Н. Волков*
Кандидат технических наук, главный металлург
Публичного акционерного общества «ЗВЕЗДА» *Р. В. Кузнецов*

Инновационные идеи в машиностроении : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, 27–30 ноября 2023 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 199 с.

В сборнике статей Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» размещены в авторской редакции 38 статей, подготовленные молодыми учеными и обучающимися Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а также представителями других высших учебных заведений и предприятий реального сектора экономики. В сборнике выделены следующие направления: «Технология машиностроения», «Компьютерные технологии в машиностроении», «Конструкторско-технологические разработки триботехнического назначения», «Машины и обработка металлов давлением», «Управление качеством в машиностроении», «Обработка перспективных конструкционных материалов».

Представленные материалы могут быть полезны специалистам, работающим в области технологии машиностроения, материаловедения, трибологии, управления качеством. Приведенные статьи в значительной степени направлены на использование преподавателями, обучающимися по программам бакалавриата, магистратуры и аспирантуры технических высших учебных заведений.

Все работы публикуются в авторской редакции.

Научные редакторы: доктор технических наук, профессор *А. А. Попович*,
доктор технических наук, профессор *Д. П. Гасюк*

Ответственный за выпуск – доктор технических наук, профессор *Д. П. Гасюк*

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-8432-1

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2024

Уважаемые коллеги! Молодые ученые и начинающие исследователи!

У нас уже стало традицией проводить Всероссийскую научно-практическую конференцию молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» на базе Высшей школы машиностроения. Я очень рад видеть в зале открытые, улыбающиеся лица молодых людей. Надеюсь, что знания, полученные на этой конференции, помогут вам стать тем поколением, которое возродит независимость страны в области передовых технологических процессов и оборудования. Наш Институт машиностроения, материалов и транспорта уделяет особое внимание поддержке молодежи и формированию кадрового резерва. Эта поддержка, в том числе, выражается в знакомстве и общении с передовыми предприятиями страны – лидерами в области металлообработки.

Дорогие участники конференции! От имени Программного и Организационного комитетов хочу пожелать Вам успешной и продуктивной работы.

Председатель Программного комитета,
Директор Института машиностроения,
материалов и транспорта,
доктор технических наук, профессор
Попович Анатолий Анатольевич

Д.П. Гасюк, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ РОЛЬ В УПРАВЛЕНИИ ПОЛНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Аннотация

В статье рассмотрена роль цифровых технологий в управлении полным жизненным циклом продукции машиностроения.

Ключевые слова: цифровые технологии, полный жизненный цикл,

Безусловно, *машиностроение* в современных условиях призвано играть одну из ключевых ролей в структурно развитии экономики страны, перед ним стоит задача обеспечения высокого технологического уровня, качества и конкурентоспособности продукции машиностроения на основе развития и использования его конкурентных преимуществ путем широкой интеграции с высокотехнологичными секторами отечественной промышленности.

Роль и значение *машиностроения* определяется, прежде всего, тем, что это **базовая отрасль экономики страны**, обеспечивающая их устойчивое функционирование, наполнение потребительского рынка, и являющаяся основой развития **технологического насыщения отечественной промышленности**.

На современном этапе развития интеллектуальных технологий машиностроения наиболее перспективным является их **цифровизация**.

Процесс цифровизации экономики России регламентирован рядом нормативно-правовых документов:

- Указом Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017 - 2030 годы» [1];
- решением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р, которым утверждена программа "Цифровая экономика РФ" [2].

Данными документами введены основные термины и определения в области цифровизации экономики России:

- **цифровая экономика** – экономическое производство с использованием цифровых технологий;
- **цифровая технология** – технология, основанная на методах кодирования и передачи информации дискретной системы;
- **цифровое предприятие** (Digital Enterprise) – организация, которая использует информационные технологии (ИТ) в качестве конкурентного преимущества во всех сферах своей деятельности: производстве, бизнес-процессах, маркетинге и взаимодействии с клиентами.

В соответствии со стратегией развития машиностроения до 2025 г [3], основные задачи в области формирования опережающего научно-технического задела и развития системы информационно-аналитического обеспечения предприятий машиностроения и его модернизации содержат:

- внедрение современных средств проектирования и компьютерных технологий;
- внедрение перспективных систем обеспечения качества;

- эффективное использование информационных ресурсов в рамках единого информационного пространства, *цифровизации всех интегрирующих процессов, реализуемых в ходе управления жизненным циклом продукции машиностроения.*

В соответствии с положениями *Концепции, определяющей содержание Государственной комплексной программы развития машиностроения России до 2025 года* [3] и *Концепции развития национальной системы стандартизации на период до 2027 года* [4] основной акцент развития машиностроения должен быть направлен на *создание и внедрение системы управления полным жизненным циклом (СУ ПЖЦ) продукции машиностроения.*

В соответствии с требованиями *ГОСТ Р 15.000-2016* [5] под *жизненным циклом продукции (ЖЦП)* понимают *совокупность взаимосвязанных процессов последовательного изменения состояния продукции от обоснования ее разработки до окончания эксплуатации и последующей ликвидации.*

Жизненный цикл продукции состоит из *стадий и этапов.*

Стадия жизненного цикла рассматривается как часть ЖЦ, выделяемая по признакам характерных для неё явлений, процессов (работ) и конечных результатов.

Этап жизненного цикла рассматривается как часть стадии ЖЦ, выделяемая по признакам моментов контроля, в которых предусматривается проверка характеристик проектных решений типовой конструкции и технических характеристик продукции.

Жизненный цикл продукции содержит следующие *стадии:*

- исследование и проектирование;
- разработка;
- изготовление (производство);
- поставка;
- эксплуатация (потребление, хранение);
- ремонт;
- утилизация.

Система управления полным жизненным циклом (СУ ПЖЦ) [6] представляет собой сложную организационно-техническую систему, которая состоит из:

- совокупности её участников (заказчиков, разработчиков и производителей продукции машиностроения, эксплуатирующих организаций и др.);
- инфраструктуры (информационной, организационной, технологической);
- нормативно-правовой и нормативно-технической базы;
- *технологий управления ПЖЦ продукции машиностроения.*

Функционирование данной системы направлено на управление ПЖЦ, которое обеспечит достижение *требуемых показателей качества продукции машиностроения*, позволяющих в *максимальной степени удовлетворять потребности не только населения России*, но и *всех отраслей экономики России*, при *минимизации затрат* на материально-техническое обеспечение создания данной продукции машиностроения.

На сегодняшний день, *одной из серьезных проблем при создании СУ ПЖЦ* является отсутствие отлаженного механизма *получения участниками ПЖЦ продукции машиностроения достоверной и своевременной информации*, начиная с информации о нуждах и потребностях, на основе которых разрабатываются и согласовываются технические задания (ТЗ) на создание продукции машиностроения, информации о требованиях к организации процессов на стадиях жизненного цикла и мониторинге их результативности.

Косвенно, тому подтверждением служит отчёт Центра стратегических разработок «Северо-Запад» [7], предметом исследования которого был уровень развития управления ПЖЦ российских компаний, в том числе и предприятий машиностроения. В результате установлено, что из 125 анкетированных компаний, только 42 предприятия (34 %) используют технологии по управлению ПЖЦ, во весь цикл полностью вовлечено лишь 23 компании (18 %), а **наименее развитыми являются стадии: «эксплуатации», «ремонта» и «утилизации» продукции.**

Существующие технологии по управлению ПЖЦ продукции машиностроения и степень их внедрения представлены на рисунке 1.

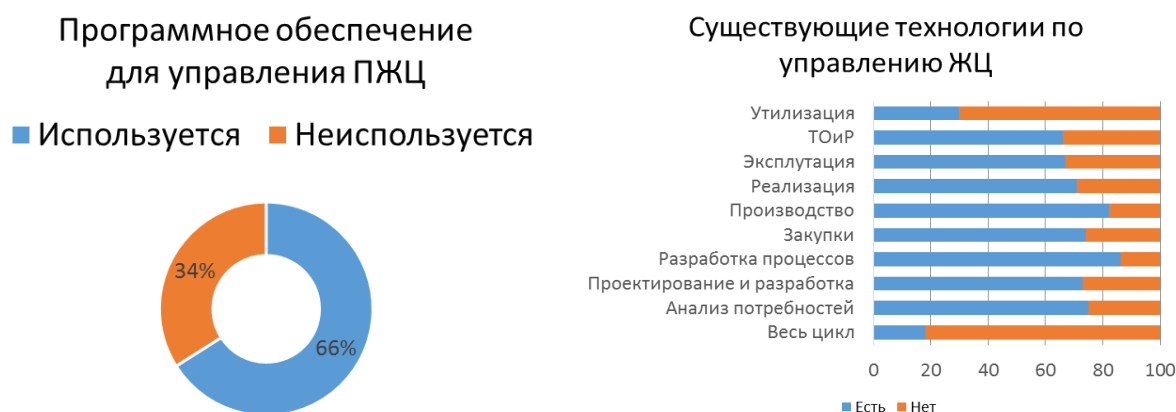


Рисунок 1 – Технологии по управлению ПЖЦ продукции машиностроения и степень их внедрения

Одним из **основных направлений разработки технологий управления ПЖЦ** на предприятиях машиностроения является **создание СУ ПЖЦ продукции машиностроения на основе внедрения цифровых технологий**, позволяющих участникам данной системы оперировать **достоверной и своевременной информацией о качестве продукции машиностроения** на всех стадиях жизненного цикла.

Создание данной системы **позволит существенно снизить финансовые и материальные затраты на всех стадиях ЖЦ** создания продукции машиностроения и несомненно позволит повысить эффективность производственных возможностей отечественных предприятий машиностроения.

Одной из основных задач в рамках решения проблемы создания СУ ПЖЦ на основе цифровых технологий можно считать **электронное (кодированное) представление информации о потребностях и нуждах, обоснованных требованиях, формировании свойств при проектировании, разработке, производстве и применении продукции машиностроения, т.е. разработку электронной модели продукции (цифрового двойника)**, которая становится базовым компонентом CALS-технологии и открывает принципиально новые возможности по информационному обеспечению всех этапов применения данной продукции, в том числе и с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ). Модель СУ ПЖЦ продукции машиностроения представлена на рисунке 2.

Цифровой двойник (ЦД) – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [8].

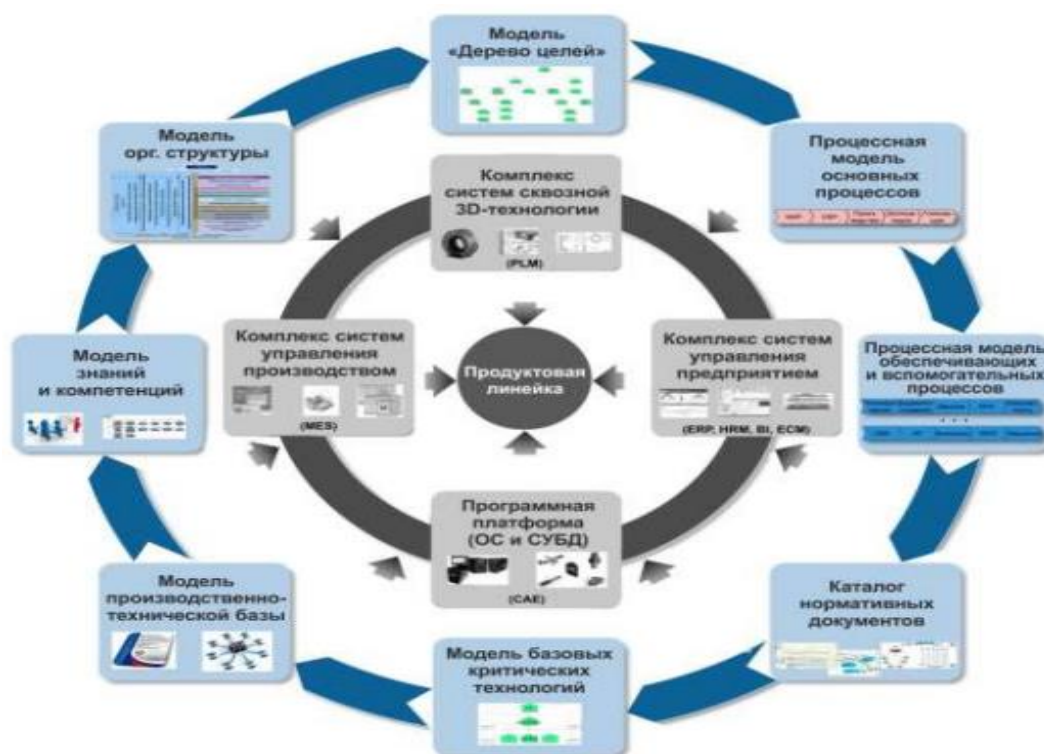


Рисунок 2 – Система управления полным жизненным циклом продукции машиностроения

Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях ЖЦ продукции, он предоставляет возможность в режиме реального времени:

- отслеживать потоки информации;
- реализовывать различные программы планирования проектирования, разработки, производства и эксплуатации;
- проводить оценку эффективности функционирования СУ ПЖЦ продукции в целом.

Основные требования к цифровизации технологических процессов при этом остаются такими же, как при использовании традиционных моделей производства:

- гибкость;
- трудоёмкость и ресурсоемкость;
- точность и стабильность;
- автоматизация и способность к быстрой переналадке оборудования.

Следует отметить, что **ЦД** – это не какая-либо отдельная технология, а **совокупность (агрегатор) различных современных цифровых технологий**, которые уже активно используются на промышленных предприятиях машиностроения.

Отсутствие универсальных методик построения **ЦД технологий** в машиностроении, подробных документов по стандартизации и типовых решений затрудняет повсеместное внедрение данных технологии и является **актуальным направлением проведения исследований в данной предметной области**.

Вышеуказанные тенденции свидетельствуют о **необходимости совершенствования всех процессов на стадиях ЖЦП и разработки концепции технического облика перспективной СУ ПЖЦ продукции машиностроения на основе внедрения технологии ЦД**.

Следует сделать вывод о том, что трансформация традиционных теорий и практик управления процессами создания продукции машиностроения на стадиях её

ЖЦ в направлении совершенствования методологии и инструментария управления данными стадиями необходимо осуществлять на основе формирования:

- интегральной информационной среды;
- системной инженерии;
- информатизации и автоматизации процессов с привлечением современных программных средств.

Данное направление развития технологий управления ПЖЦ продукции машиностроения является крайне **актуальной задачей развития системы информационно-аналитического обеспечения предприятий машиностроения.**

Необходимость развития и внедрения цифровых технологий в управлении ПЖЦ продукции машиностроения **определяет объективную потребность в подготовке специалистов, компетентных в данной предметной области.**

Подготовка данных специалистов в среднесрочной перспективе будет связана, прежде всего, с совершенствованием существующей 3-ступенчатой системой обучения.

Потребуется **внедрение автоматизированных информационных технологий и технологий искусственного интеллекта** таких как:

- адаптивное обучение;
- персонализированное обучение;
- автоматическое оценивание;
- интервальное обучение

и другие инновационные подходы к процессу обучения, что является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017 - 2030 годы».
2. Программа "Цифровая экономика РФ", утвержденная решением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р.
3. Государственная комплексная программа развития машиностроительного комплекса России на период до 2025 года.
4. Концепции развития национальной системы стандартизации на период до 2027 года.
5. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения.
6. Гасюк, Д.П. Функциональное моделирование процессов жизненного цикла вооружения и военной техники / Д.П. Гасюк, П.А. Дроговоз, В.А. Дубовский // Вестник Академии военных наук. – 2020. – № 3 (72). – С. 105-112.
7. Кежаев, В.А. Методика системного анализа адаптивного управления техническим состоянием ракетно-артиллерийского вооружения / В.А. Кежаев, В.А. Чубасов // Известия РАН. – 2018. – № 1(101). – С. 87-93.
8. ГОСТ Р 57700.37 – 2021. «Компьютерное моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

УДК 669.295

Д.С. Аксенов, Е.В. Агеева
Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия,
aksenov.denny@gmail.com

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПОРОШКА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-20 МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА

Аннотация

В данной статье представлен сравнительный анализ состава исходного прутка из титанового сплава ВТ-20 и электроэрозионного порошка, полученного из него. Исследование проведено с использованием рентгенофлуоресцентного анализа, который позволяет определить элементный состав образцов. Результаты показывают различия в составе порошка по сравнению с исходным прутком, особенно в содержании железа. Обнаруженное изменение состава может влиять на свойства и последующие области практического применения нового сплава. Дополнительные исследования требуются для более полного понимания влияния этих изменений.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, добыча, обработка, свойства, применение, ВТ20, прутки, порошок.

Введение

Титановые сплавы являются одними из самых значимых материалов в современной промышленности благодаря своим выдающимся механическим свойствам, высокой удельной прочности и превосходной коррозионной стойкости. В процессе производства сплавов может возникнуть необходимость в изменении формы или размера материала. В данной работе проведен сравнительный анализ состава исходного прутка из титанового сплава ВТ-20 и электроэрозионного порошка, полученного из него методом электроэрозионного диспергирования в воде, дистиллированной для выявления таких изменений [1].

Методы

Важным аспектом изучения титановых сплавов является анализ их элементного состава, который может играть определяющую роль в их свойствах и областях практического применения. В данной статье представлены результаты сравнительного исследования элементного состава исходного титанового сплава ВТ-20 и электроэрозионного порошка.

Метод рентгенофлуоресцентного анализа был выбран для определения элементного состава образцов, поскольку он является быстрым, неразрушающим и точным методом анализа. Этот метод позволяет изучить спектр вторичного флуоресцентного излучения, вызванного рентгеновским излучением, и определить концентрацию различных элементов в образце. Используя портативный

рентгенофлуоресцентный спектрометр NitonGOLDD, получены данные о фактическом составе исходного прутка и электроэрозионного порошка из титанового сплава ВТ-20 [2].

Целью данного исследования является сравнительный анализ элементного состава исходного прутка и порошка титанового сплава ВТ-20. Также нужно выяснить возможные причины различий в составе исходного образца и порошка, а также рассмотреть влияние этих изменений на свойства и области дальнейшего применения сплава.

Сравнение состава исходного прутка и порошка титанового сплава ВТ-20 может помочь в оптимизации процесса получения порошковых материалов и повышении качества конечного продукта. Это исследование имеет практическую значимость для инженеров и специалистов в области металлургии и материаловедения, которые занимаются разработкой и производством титановых сплавов [3].

В данном исследовании были использованы исходный пруток и электроэрозионный порошок из титанового сплава ВТ-20 для сравнительного анализа их элементного состава. Для определения состава образцов применен рентгенофлуоресцентный анализ с использованием портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра NitonGOLDD. Спектрометр представлен на рисунке 1.

Исходный пруток и порошок были проанализированы с помощью рентгенофлуоресцентного анализа, полученные данные позволили нам сравнить состав исходного прутка и порошка и выявить различия в содержании химических элементов. Образец порошка титанового сплава ВТ-20 представлен на рисунке 2.



Рисунок 1 – Внешний вид портативного спектрометра NitonGOLDD



Рисунок 2 – Образец электроэрозионного порошка из титанового сплава ВТ-20

При проведении рентгенофлуоресцентного анализа были соблюдены стандартные процедуры подготовки образцов и измерений. Образцы были подготовлены в соответствии с рекомендациями производителя прибора NitonGOLDD. Были осуществлены несколько измерений для каждого образца с целью обеспечения точности и надежности полученных данных [4].

Результаты анализа были представлены в процентном содержании каждого химического элемента в исходном прутке и порошке. Для оценки погрешности измерения использовались значения $\pm 2\delta$, полученные из повторных измерений.

Весь эксперимент был проведен с использованием современных приборов и методов, чтобы обеспечить точность и достоверность полученных данных о составе образцов. Сравнение состава исходного прутка и порошка титанового сплава ВТ-20 приведено в таблице 1.

В результате проведенного исследования нами получены следующие средние значения элементного состава исходного прутка: молибден (Mo) 2%, титан (Ti) 92,99%, ванадий (V) 2,63%, железо (Fe) 0,176% и цирконий (Zr) 2,18%. Данный состав полностью совпадает с марочником сплава для марки титанового сплава ВТ-20. Исследуемый порошок был получен методом электроэрозионного диспергирования прутка сплава ВТ-20 в воде дистиллированной [5].

Таблица 1 – Сравнение состава исходного прутка и порошка из титанового сплава ВТ-20

Химический элемент	Исходный пруток, %	Порошок, %
Mo	2,00	2,29
Ti	92,99	88,41
V	2,63	3,06
Fe	0,176	3,59
Zr	2,18	2,38

Результаты анализа показали изменения в составе порошка по сравнению с исходным прутком. Особенно заметно увеличение содержания железа (Fe) в порошке. Это изменение можно объяснить влиянием износа электродов, содержащих железо, в процессе электроэрозии. Износ электродов может приводить к постепенному их разрушению под действием электроэрозии и увеличению концентрации железа [6].

Обнаруженное изменение состава может оказать влияние на свойства и применение сплава. Например, увеличение содержания железа может влиять на его механические и коррозионные свойства. Дополнительные исследования требуются для более глубокого понимания эффектов изменения состава на свойства материала.

Увеличение процентного содержания железа в порошке титанового сплава ВТ-20 может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на свойства сплава, который будет получен из данного порошка. С одной стороны, повышение содержания железа может способствовать улучшению прочности и твердости сплава. Железо может формировать твердые растворы с титаном и другими элементами, что способствует укреплению структуры сплава. Более высокое содержание железа также может повысить стойкость сплава к износу и улучшить его механические свойства [7].

Однако повышение содержания железа может также оказать отрицательное влияние на некоторые свойства нового титанового сплава. Высокое содержание железа может привести к увеличению плотности сплава и ухудшению его коррозионной стойкости. Железо может быть источником поверхностных окислов и примесей, которые могут способствовать разрушению пассивной пленки на поверхности сплава и увеличению коррозии.

В целом, изменение состава электроэрозионного порошка из титанового сплава ВТ-20, особенно повышение содержания железа, требует дальнейшего более углубленного исследования и оценки его влияния на конечные свойства нового сплава. Это позволит лучше понять, какие аспекты свойств и процессов обработки могут быть оптимизированы для достижения требуемых характеристик [8].

Исследования, проведенные по сравнению составов исходного прутка и электроэрозионного порошка из титанового сплава ВТ-20, являются важным шагом в понимании влияния состава на свойства новых титановых сплавов. Эти результаты могут служить основой для дальнейших исследований и разработки более оптимальных процессов обработки и составов сплавов с целью улучшения их характеристик и расширения области их применения.

В будущем возможно проведение дополнительных исследований, включая более подробный анализ структуры сплава, испытания на механические свойства и коррозионную стойкость, с целью более полного понимания влияния изменения состава на конечные свойства нового титанового сплава. Это поможет оптимизировать процессы производства и повысить качество и надежность материала для различных промышленных приложений [9-14].

Заключение

В данной статье был представлен сравнительный анализ состава исходного прутка и электроэрозионного порошка из титанового сплава ВТ-20 методом рентгенофлуоресцентного анализа. Результаты показали различия в составе порошка, особенно в содержании железа, по сравнению с исходным прутком. Износ электродов, содержащих железо, в процессе электроэрозии может быть причиной данного изменения. Дальнейшие исследования необходимы для оценки влияния изменений состава на свойства и применение нового титанового сплава, полученного из электроэрозионного порошка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : Учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2014. – 136 с. – ISBN 978-5-7996-1096-8. – EDN ZUZTNX.

2. Аксенов, Д. С. Анализ современной ситуации в области применения титановых сплавов и их роль в промышленности / Д. С. Аксенов, Е. В. Агеева // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок : в 4 т., Курск, 01 декабря 2022 года. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 181-184.

3. Аксенов, Д. С. Исследование элементного состава титановых сплавов методом рентгенофлуоресцентного анализа / Д. С. Аксенов, Е. В. Агеева // Современные материалы, техника и технология : сборник научных статей 12-й Международной научно-практической конференции, Курск, 30 декабря 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 46-51.

4. Аксенов, Д. С. Анализ влияния структуры и микроструктуры на свойства титановых сплавов / Д. С. Аксенов // Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК : сборник научных статей Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 15 марта 2023 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И.Иванова, 2023. – С. 109-112.

5. Аксенов, Д. С. Получение порошковых материалов в процессе электроэрозионного диспергирования отходов титанового сплава ВТ-20 в дистиллированной воде / Д. С. Аксенов // Проблемы развития современного общества :

Сборник научных статей 8-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. В 4-х томах, Курск, 19–20 января 2023 года / Под редакцией: В.М. Кузьминой. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2023. – С. 201-204.

6. Агеева, Е. В. Исследование микротвердости синтезированной порошковой быстрорежущей стали из электроэрозионных порошков, полученных в водной среде / Е. В. Агеева, А. Ю. Алтухов, С. В. Пикалов // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 1(1). – С. 13-16.

7. Хардилов, С. В. Анализ характеристик износостойкости спеченных изделий из электроэрозионного порошка стали X13, полученного в бутиловом спирте / С. В. Хардилов, Е. В. Агеева, А. Е. Агеева // Современные материалы, техника и технологии. – 2021. – № 6(39). – С. 58-64.

8. Оценка износостойкости электроискровых покрытий, полученных с использованием электроэрозионных порошков быстрорежущей стали / Е. В. Агеева, Р. А. Латыпов, Е. В. Агеев [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – № 1. – С. 71-76.

9. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy / R. A. Latypov, G. R. Latypova, E. V. Ageev [et al.]. // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – Vol. 2017, No. 12. – P. 1083-1085.

10. X-ray analysis of the powder of micro- and nanometer fractions, obtained from wastes of alloy T15K6 in aqueous medium / E. V. Ageeva, E. V. Ageev, S. V. Pikalov [et al.]. // Журнал нано- и электронной физики. – 2015. – Vol. 7, No. 4. – P. 04058.

11. Ageev, E. V. Composition, structure and properties of hard-alloy powders obtained by electrodispersion of T5K10 alloy in water / E. V. Ageev, A. E. Ageeva // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66. – P. 146-154.

12. Электроэрозионные порошки микро- и нанометрических фракций для производства твердых сплавов / Р. А. Латыпов, Е. В. Агеева, О. В. Кругляков, Г. Р. Латыпова // Электрометаллургия. – 2016. – № 1. – С. 16-20.

13. Математический размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием жаропрочного никелевого сплава ЖС6У в воде / Е. В. Агеев, А. Е. Гвоздев, Е. А. Протопопов [и др.]. // Чебышевский сборник. – 2022. – Т. 23, № 1(82). – С. 197-208.

14. Физико-механический подход к анализу процессов вытяжки с утонением цилиндрических изделий с прогнозированием деформационной повреждаемости материала / Г. М. Журавлев, Н. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев [и др.]. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – № 4(67). – С. 39-56.

Д. Быченко^{1,2}, И.И. Козарь¹, С.А. Любомудров¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, denisba97@mail.ru

²АО «Армалит», Санкт-Петербург, Россия

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ДОПУСКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Аннотация

В работе проанализировано применение геометрических допусков (допусков формы, ориентации, месторасположения и биения) при изготовлении различных деталей в машиностроении. Рассмотрены причины их назначения применительно к деталям станочных приспособлений. Указано на имеющую место неоднозначность выбора степеней точности допусков и необходимость выявления закономерностей влияния геометрической точности приспособлений на точность изготавливаемых деталей.

Ключевые слова: станочные приспособления, геометрические допуски, точность.

Введение

Проектирование станочных приспособлений является важным этапом технологической подготовки производства, поскольку точность средств технологического оснащения непосредственно влияет на точность и качество выпускаемой продукции. Однако применение сложного и дорогостоящего оснащения может привести к излишнему удорожанию и долгой окупаемости производства. Так по данным [1-5] затраты на изготовление и приобретение оснастки достигают 20-25 % от себестоимости изделия. Поэтому проектирование и изготовление оснастки, к которой предъявляются высокие требования по точности размеров и геометрическим допускам (точности формы, ориентации, месторасположения и биения), должно быть соответствующим образом обосновано.

Точность размеров станочных приспособлений зачастую задается из конструктивных соображений. Применительно же к геометрическим допускам можно выделить три основных подхода [6]: работа по аналогу, выбор, исходя из уровня относительной геометрической точности, и расчетный метод. Последний подход является наиболее комплексным и предпочтительным, хотя и весьма сложным, поскольку позволяет обоснованно задавать геометрические допуски к элементам деталей станочных приспособлений, исходя из соответствующих допусков изготавливаемой с их помощью продукции.

Для реализации данного подхода необходимо проанализировать, какие из предусмотренных стандартами требований по геометрической точности наиболее часто предъявляются к общемашиностроительным деталям и с какой целью. Отсюда, а также на основании исследований и стандартов, посвященных точности отдельных элементов станочных приспособлений, можно будет выбрать необходимые виды геометрических допусков, назначить конструкторские базы, которые было бы удобно использовать и в качестве измерительных, и, наконец, создать расчетные схемы для определения числовых значений допусков.

Материалы и методы

Обобщенные сведения по нормированию геометрической точности деталей в наиболее типовых случаях на основе данных [7-9] представлены в таблице 1.

В таблице в числе допусков формы указан допуск профиля продольного сечения, не предусмотренный действующим ГОСТ Р 53442-2015, но достаточно часто встречающийся в разработанных ранее чертежах и по-прежнему используемый в настоящее время в связи с более простой и доступной схемой измерения в сравнении со схемой определения цилиндричности [7]. Допуск наклона, допуски формы заданного профиля и формы заданной поверхности не представлены в таблице, поскольку применяются сравнительно редко.

Таблица 1 – Применение геометрических допусков в машиностроении

Примеры назначения	Причины назначения, исходя из функциональных требований
Допуски формы: круглость, цилиндричность, профиль продольного сечения	
Шарики и ролики подшипников; шейки шпинделей и валов, отверстия под подшипники	Уменьшение взаимного перекоса и деформации колец подшипников качения, снижение динамических нагрузок и повышение плавности вращения; сохранение жидкостного трения в подшипниках скольжения при тяжелых нагрузках, повышение износостойчивости
Плунжеры, поршни, золотники; цилиндры, втулки и гильзы	Обеспечение плавности хода и герметичности при высоких давлениях
Поршневой палец и ответное отверстие в шатуне; конические соединения	Обеспечение износостойчивости и заданного характера посадки при знакопеременных нагрузках; повышение точности центрирования
Допуски формы: прямолинейность, плоскостность	
Базовые и направляющие поверхности измерительных приборов, машин и станков	Снижение погрешности базирования и повышение его надежности (устойчивости) [10 - 12], обеспечение заданной точности перемещения узлов, повышение износостойчивости
Поверхности разъема машин и уплотнительные поверхности арматуры	Обеспечение герметичности
Упорные подшипники скольжения	Сохранение режима жидкостного трения при тяжелых нагрузках, повышение износостойчивости
Конические соединения (прямолинейность образующей)	Обеспечение износостойчивости и заданного характера посадки под нагрузкой; повышение точности центрирования
Допуски ориентации: параллельность, перпендикулярность	
Опорные торцы крышек подшипниковых узлов и дистанционных колец	Уменьшение взаимного перекоса колец подшипников качения, обеспечение норм контакта зубьев в передаче за счет уменьшения перекоса

Продолжение таблицы 1

Примеры назначения	Причины назначения, исходя из функциональных требований
Основные рабочие и направляющие поверхности измерительных приборов, машин и станков; оси отверстий в головках шатуна, оси расточек под гильзы	Обеспечение заданной точности перемещения узлов, регулировки и отсчетов, центрирования или направления; снижение погрешности базирования (обеспечение заданного положения в пространстве поверхностей деталей, сопрягаемых с данной); обеспечение заданного характера посадки (зазоров, натягов по длине соединения) при сборке и далее при работе под нагрузкой
Допуски месторасположения: позиционирование (позиционный допуск)	
Отверстия во фланцах арматуры, крышек, шпинделей и т.д.	Обеспечение заданной точности взаимного расположения узлов и возможности их скрепления
Допуски месторасположения: соосность	
То же, что для радиального биения (см. ниже)	То же, что для радиального биения (см. ниже); нормирование соосности или биения должно определяться удобством проведения измерений
Допуски месторасположения: симметричность	
Шлицевые и шпоночные соединения; базовые и направляющие поверхности измерительных приборов, машин и станков	Обеспечение равномерности контакта боковых сторон шлицев и шпонок, повышение износоустойчивости и нагрузочной способности; обеспечение заданной точности перемещения узлов, центрирования или направления; снижение погрешности базирования
Допуски биения: торцевое биение	
Опорные и трущиеся поверхности при относительном вращении деталей: заплечики валов, шпинделей, кольца подшипников; опорные торцы отверстий корпусов, торцы зубчатых венцов, втулок и т. д.	Для восприятия больших осевых давлений при вращательном движении, сохранения режима жидкостного трения при тяжелых нагрузках, повышения износоустойчивости; уменьшение взаимного перекоса колец подшипников, обеспечение норм контакта зубьев в передаче; обеспечение точности осевого положения вращающихся узлов
Торцы тарелок	Обеспечение герметичности
Допуски биения: радиальное биение и биение в заданном направлении	
Шейки, посадочные и присоединительные поверхности шпинделей, валов и т. д., поверхности для выверки (контрольные пояски)	Обеспечение точности положения в пространстве вращающихся сопрягаемых деталей, в частности зубчатых колес (нормы контакта, нормы кинематической точности), ограничение дисбаланса вращающихся частей
Посадочные поверхности под уплотнения, конусы тарелок и седел клапанов	Обеспечение герметичности

Результаты и обсуждение

Сопоставляя данные таблицы 1 с данными стандарта [13] и ряда других, посвященных элементам станочных приспособлений, можно сделать ряд выводов.

Элементы станочных приспособлений зачастую движутся со сравнительно небольшими скоростями, либо являются неподвижными. В этом случае основной причиной назначения геометрических допусков является обеспечение заданного положения в пространстве рабочих поверхностей деталей приспособления, что в конечном счете ведет к уменьшению погрешности установки детали в приспособлении. При использовании в конструкциях приспособлений пневмо- и гидроприводов, подшипников, зубчатых передач и конических соединений виды применяемых допусков и причины их применения будут аналогичны приведенным в таблице 1.

В чертежах элементов приспособлений, совершающих вместе со шпинделем станка вращательное движение (токарных, шлифовальных), чаще всего нормируется биение и соосность, а также перпендикулярность (к примеру перпендикулярность оси центрирующей выточки относительно базовой плоскости). То же относится к деталям в форме тел вращения вне зависимости от предназначения приспособления, к примеру втулкам и пальцам. В чертежах элементов приспособлений, устанавливаемых неподвижно на столе станка (фрезерно-расточных, сверлильных), чаще всего нормируется параллельность, перпендикулярность, симметричность. Плоскостность нормируется для базовых торцов и плоскостей в случаях, когда невозможно ограничиться измерением торцевого биения.

Заключение

Рекомендуемая стандартами геометрическая точность колеблется в весьма широких пределах: 2-5 степень точности по ГОСТ 24643-81 – в приспособлениях для точных работ и для базовых поверхностей, 6-9 степень точности – в остальных случаях. Поэтому задача по выявлению конкретных закономерностей, связывающих геометрическую точность приспособлений с точностью изготавливаемых с их помощью деталей, является весьма актуальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мовшович, А. Я. Некоторые аспекты унификации обратной оснастки для металлорежущего оборудования / А. Я. Мовшович, М. М. Буденный, Ю. А. Кочергин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.–2010. – №1 (71). – С. 66-70.
2. Дубик, Е. А. Оценка эффективности использования универсально-сборных приспособлений при внедрении инновационного процесса на производственном предприятии / Е. А. Дубик, И. А. Павлова, И. В. Демаков // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-5. – С. 1081-1089.
3. Кузьменко, А. А. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке / А. А. Кузьменко, Д. П. Гасюк // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 434-439.
4. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А. В. Тебекин, Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4, № 11. – С. 30-38.

5. Модель прогноза стоимости и сроков модернизации промышленных предприятий / А. В. Тебекин, Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал исследований по управлению. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 31-37.

6. Быченко, Д. Выбор и расчет геометрических допусков деталей станочных приспособлений / Д. Быченко, И. И. Козарь, Д. Н. Шабалин // Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 33-39.

7. Палей, М. А. Отклонения формы и расположения поверхностей / М. А. Палей. – Москва: Изд-во Гос. комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1965. – 117 с.

8. Мягков, В. Д. Краткий справочник конструктора / В. Д. Мягков. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1975. – 816 с.

9. Анухин, В. И. Допуски и посадки : учебное пособие/ В. И. Анухин. – 5-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-496-00042-0.

10. Денисенко, А. Ф. Оценка влияния отклонений от плоскостности планшайбы стола координатно-расточного станка на точность базирования обрабатываемых деталей / А. Ф. Денисенко, Б. А. Царфин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 11. – С. 3-6.

11. Нефедова, А. Р. Исследование погрешности базирования, вызванной отклонениями формы базовой поверхности / А. Р. Нефедова, А. В. Глубоков // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ - 2021) : Материалы XIV всероссийской конференции с международным участием, Москва, 25 октября – 20 ноября 2021 года. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2021. – С. 236-242.

12. Гасюк, Д. П. Выбор средств измерения для линейных размеров / Д. П. Гасюк, Е. Г. Деева // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 440-443.

13. ГОСТ 31.0151.01-90. Приспособления универсальные наладочные и специализированные наладочные. Общие технические условия = Universalandspecializedadjustingdevices. *Generalspecifications*: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 25 апреля 1990 г. № 1001: взамен ГОСТ 22129-76: дата введения 1991-07-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 66 с.

О.Д. Григорьев^{1,2}, А.В. Петров^{1,2}, С.Н. Степанов^{1,2},
С.С. Степанов^{1,2}, С.Б. Тарасов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, grigoriev.od@edu.spbstu.ru

²ООО ИМЦ «Микро», Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДЕОКАМЕР НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОКАЗАНИЙ СТРЕЛОЧНЫХ ИНДИКАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация

В работе рассмотрены несколько камер с различными характеристиками, предназначенных для применения на автоматизированном приборе для поверки индикаторов АПИ-50. При использовании машинного зрения возникает необходимость выбора камеры, способной наиболее точно определить положение стрелки на индикаторе. В результате проделанной работы, был подобран оптимальный вариант камеры, которая подходит для установления положения стрелки индикатора.

Ключевые слова: поверка измерительные головки, машинное зрение, индикаторы часового типа, погрешность, распознавание, автоматизация, цифровизация.

Введение

В настоящее время системы автоматизации активно внедряются во все сферы машиностроительного производства [1-6]. В производственных цехах стали использовать различные методы цифровизации [7], например, индуктивные датчики, которые применяются в системе активного контроля на станках с ЧПУ, но при обработке деталей на обычных станках используют ручной инструмент и наиболее распространённые измерительные головки и индикаторы. Большие объёмы производства индикаторов часового типа поставили вопрос об их поверке.

Для этого в измерительных лабораториях используются разные приборы, в частности эталон 4 разряда – прибор для поверки индикаторов ППИ-50. Он послужил базой для создания автоматизированного прибора для поверки индикаторов АПИ-50 [8], который был разработан для повышения эффективности поверки индикаторов и головок, ключевой особенностью которого является полная или частичная автоматизация поверки.

Автоматизированный прибор для поверки индикаторов АПИ-50 предназначен для поверки индикаторов, головок, рычажно-зубчатых индикаторов бокового действия, индуктивных и растровых преобразователей, двухточечных нутромеров сценариями деления и дискретностью от 1 до 10 мкм, как отечественного, так и зарубежного производства в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

АПИ-50 представляет собой компьютеризированное место поверителя и состоит из компаратора с дискретным преобразователем и сервоприводом, матричной камеры, компьютера и оснастки для поверки (рис. 1). В автоматическом режиме в соответствии с компьютерной программой измерительный штوك перемещает и останавливает измерительный стержень индикатора в контрольных точках калибровки, изображение, полученное с камеры [9], обрабатывается модулем распознавания [10] и переводится в

числовое значение. Полученное значение сравнивается со значением, которое передаёт преобразователь (датчик). По результатам поверки выводится на печать протокол поверки и кривая погрешности поверяемого индикатора.

Погрешность машинного зрения определяется угловым положением стрелки, на точность которого влияет несколько факторов, одним из них является точность нахождения стрелки, которая напрямую зависит от камеры и ее характеристик.

Таким образом целью работы будет выбор камеры, которая подходит для определения положения стрелки индикатора.

В соответствии с целью были поставлены задачи исследования:

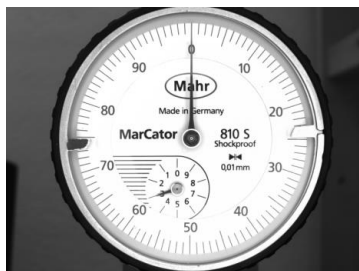
1. Сравнить видеокamеры отечественных и зарубежных производителей и выбрать оптимальный вариант.
2. Определить влияние разрешения камеры и освещения на считывание показаний.

Методика исследования

Исследование проводилось с использованием 3 камер с разными характеристиками (Таблица 1). Настройка камер происходила в ручном режиме (фокус, контрастность, экспозиция), освещение естественное. Стоит заметить, что на равномерность изображения индикатора при использовании камеры VAC-530-USB-UVC повлияло освещение (потолочные осветители), для равномерной картинки был выставлен защитный экран. При поверке использовали индикаторы часового типа 810s (Mahr) и ИЧ-10 (КРИН) с ценой деления 10 мкм, и индикатор многооборотный 1МИГ (Измерон) с ценой деления 1 мкм (рис. 2). Для оценки погрешности машинного зрения индикаторы проверили в ручном режиме с помощью прибора ППГ-4(эталон 2 разряда [11]), погрешность которого аналогична прибору АПИ-50. Эксперимент проводился на одном обороте. По результатам пяти измерений строилась средняя линия полученных значений. На графиках ниже представлено их сравнение.



Рисунок 1 –
Автоматизированный
прибор для поверки
индикаторов АПИ-50



а)



б)



в)

Рисунок 2 –Индикаторы часового типа: а)810s (Mahr);
б) ИЧ-10 (КРИН); в) Многооборотный 1МИГ

Таблица 1– Характеристики камер

Название	ООО «ЭВС» VAC-530-USB- UVC (Россия)	Logitech HD Pro C920 (Китай)	Basler aceacA2500- 20gm (Германия)
Тип матрицы	КМОП 1/4"	CMOS	CMOS
Выходное разрешение матрицы, мегапикселей	5	2	5
Разрешение максимальное, пикселей	2591x1944	1920 x 1080	2592x1944
Частота кадров, кад/сек	15	30	21
Интерфейс:	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0
Габариты ДхШхВ (мм):	50 x 58 x 32	94 x 43.3 x 71	42 x 29 x 29
Стоимость, руб.	25000	10000	50000

Результаты

На рисунке 3 представлены результаты для индикатора часового типа 810s (Mahr). По полученным значениям видно, что наибольшая разница показаний в одной точке составляет около 0,8 мкм, что не даёт возможности сделать выбор в пользу одной из камер.

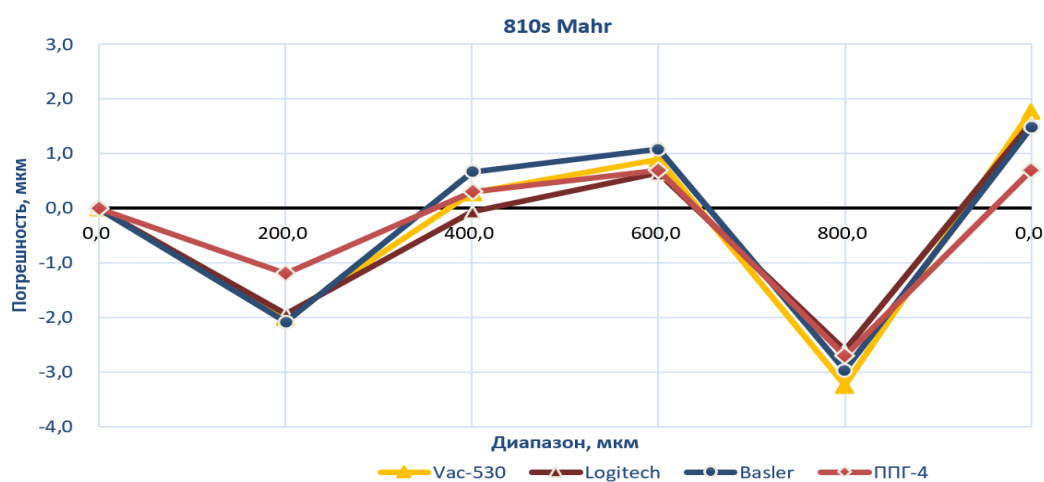


Рисунок 3 – Поверка 810s (Mahr)

На рисунке 4 представлены результаты для ИЧ-10, по которым видно, что наибольшая разница около 3,5 мкм для данных с камеры Vac-530 относительно значений, полученных на ППГ-4. Это объясняется тем, что в зоне 400-600 мкм качество изображения ухудшалось. Значения с камеры LogitechHDProC920 отличаются на 2,3 мкм. Лучше всего показала себя камера BasleraceacA2500-20gm, расхождению с эталоном на более 0,4 мкм.

На рисунке 5 представлены результаты для индикатора 1МИГ. Погрешность индикатора составляет не более 2,5 мкм на оборот. Так как цена деления составляет 1 мкм мы можем получить более точные данные. Из графика видно, что данные со всех камер имеют незначительные расхождения (0,5 мкм). При сравнении с эталоном значения могут отличаться до 0,8 мкм.

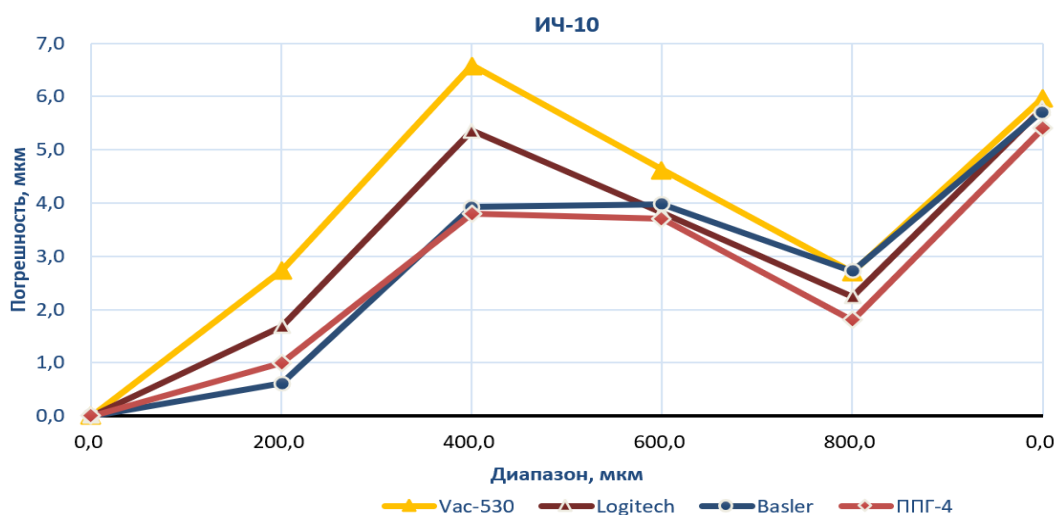


Рисунок 4 – Поверка ИЧ-10

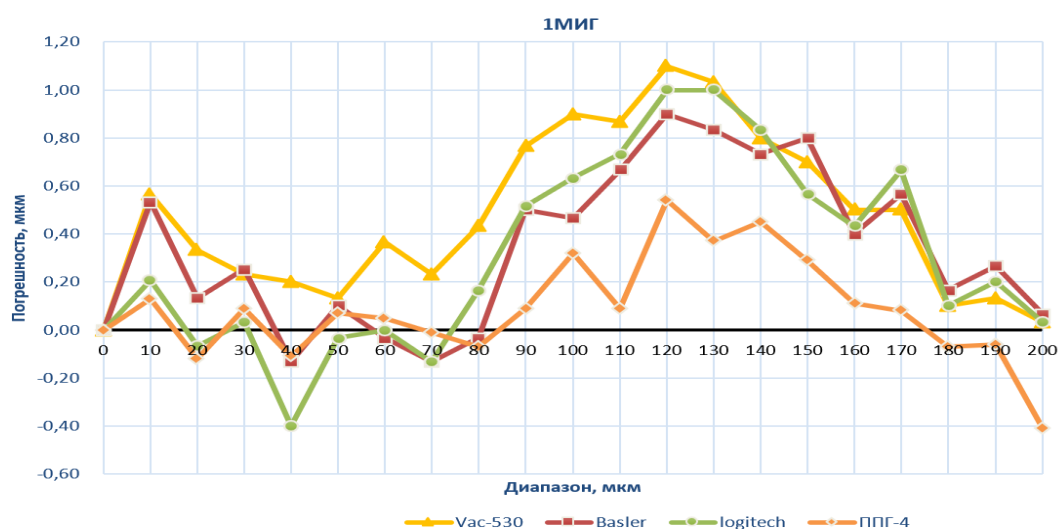


Рисунок 5 – Поверка 1МИГ

На основании данных, полученных в работе, можно сделать вывод что разрешение камеры не оказывает особого влияния на результат, ведь использовались камеры с различным разрешением. В ходе работы освещение оказывало влияние на некоторые камеры, как указано было выше использовался защитный экран, для работы камер в одинаковых условиях, без защитного экрана значения сильно отличались от эталонных (не показано в работе).

Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что нужно учитывать возможность влияния камер на результаты распознавания показаний. На данном этапе лучше себя показала камера BasleraceacA2500-20gm, так как для нее не требовался защитный экран. Худшей оказалась камера VAC-530-USB-UVC, из-за ухудшения изображения на определённых участках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация калибровки приборов для линейных измерений / С. С. Степанов, А. В. Петров, С. Б. Тарасов, С. Степанов // Наноиндустрия. – 2019. – Т. 12, № 2(88). – С. 122-127.

2. Гасюк, Д. П. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции / Д. П. Гасюк, И. Н. Филатов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2007. – Т. 1. – С. 15-18.
3. Mathematical modeling of Arc extinction process in devices with liquid-metal contact / K. V. Kireev, V. V. Ermakov, K. Kikkas [et al.]. // Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) : 6th International Conference ICRITO, Noida, India, September, 20–22, 2017. – Noida, India: Excellent publishing house, 2017. – P. 71-275.
4. Модель поддержки принятия решений при формировании товарной стратегии производственной программы предприятия / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, М. Р. Гапов, Т. Н. Сауренко // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2016. – № 2. – С. 62-73.
5. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования / И. Н. Хрусталева, Д. П. Гасюк, Л. Г. Черных [и др.]. // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 147-152.
6. Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / Ю. В. Ведерников, А. Ю. Гарькушев, В. Г. Анисимов [и др.]. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 5-6(71-72). – С. 61-72.
7. Цифровизация измерений в металлообработке / С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов, А.В. Петров, С.С. Степанов // Мир измерений. – 2020. – № 2. – С. 14-19.
8. Study of a device for calibrating of indicating gages using machine vision / A. Petrov, S. Tarasov, I. Kornilov [et al.]. // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 509. – P. 65–75.
9. Волегов, Д.Б. Считывание показаний стрелочного прибора при помощи web-камеры / Д.Б. Волегов, Д.В. Юрин, // Сборник: Труды 18-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон. – Москва, 2008. – С. 242–247.
10. Петров, А. В. Разработка модуля для распознавания положения стрелки индикаторов часового типа / А. В. Петров, С. Н. Степанов, С. С. Степанов // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 25-28.
11. Приказ от 29.12.2018 г. №2840 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм» [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://files.stroyinf.ru/> (дата обращения 10.08.2023).

Г.В. Цветкова, Э. Мохсени, Я. Нагхави, Г.В. Иванова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, tsvetkova_gv@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НАПЛАВОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация

Использование методов нанесения покрытий может существенно помочь в улучшении физико-механических свойств поверхностных и подповерхностных слоев материала. Представлены результаты исследования свойств материалов сплавов инконель и стеллит, на которые были нанесены покрытия с использованием методов лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов. В данной работе проведены металлографический анализ материалов наплавов, а также проведена оценка их микротвердости и триботехнических свойств.

Ключевые слова: наплавка, микроструктура, микротвёрдость, стеллит, инконель.

Введение

В настоящее время возросла необходимость создания и использования инновационных материалов с улучшенным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств на основе конструкционных и инструментальных материалов с функциональными покрытиями [1, 2]. Широко применяются покрытия для обеспечения повышения работоспособности ответственных изделий машиностроения (элементов авиационной техники, энергетических установок, турбокомпрессоров, металлообрабатывающего инструмента и других), работающих в сложных и переменных условиях, связанных с воздействием повышенных тепловых и силовых нагрузок, вызывающих высокую скорость изнашивания контактных поверхностей. Одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся научных подходов, направленных на решение указанной проблемы, является разработка и использование покрытий, характеризующихся определенным структурно-фазовым состоянием в объемных и поверхностных слоях [3-6]. В последнее время покрытия с базовым материалом сплавов инконель и стеллит вызывают интерес благодаря своим исключительным физико-механическим свойствам, отвечающим требованиям при специфических условиях работы, например, в медицинском оборудовании, для аэрокосмических деталей, в бытовой электронике и т. д. [7, 8].

Целью данной работы является исследование влияния микроструктуры и содержания химических элементов материалов наплавленных покрытий на их свойства.

Методы и материалы

Исследовались материалы сплавов инконель 625 и стеллит. На эти образцы наносили покрытие толщиной до 1 мм с использованием методов лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов.

Химический состав сплава инконель 625 в весовых % следующий: 58 % Ni, 21 % Cr, 9 % Mo, 5 % Fe, 4 % Ta, 1 % Co, остальное – другие элементы. Химический состав

сплава стеллит в весовых % следующий: 48 % Co, 30 % Cr, 13 % W, 2,5 % C, 2,5 % Fe, 1,5 % Ni, 1 % Co, 1 % Mn, остальное – другие элементы.

Микроструктурные и субмикроструктурные исследования проводились с помощью цифрового микроскопа Микровизор® μ Vizo®-MET, просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-200. Твердость и износостойкость исследовались с помощью автоматического микротвердомера FM-300 и машины трения СМЦ-2.

Результаты и обсуждение

Металлографические исследования материалов наплавки

На рис. 1(а) представлена микроструктура наплавки, нанесенной на сплав стеллит, состоящая из 3 областей. Покрытие на поверхности толщиной 0,900 мм – это первая область. Зона термического влияния толщиной 0,270 мм с микроструктурными изменениями – это вторая область. Микроструктура основного сплава стеллит – это третья область. На рис. 1(б) микроструктура наплавки, нанесенной на сплав инконель, состоит из 4 областей: 1 – покрытие на поверхности толщиной 0,256 мм; 2 – зона термического влияния толщиной 0,297 мм; 3 – переходный слой толщиной 0,122 мм; 4 – основной металл.

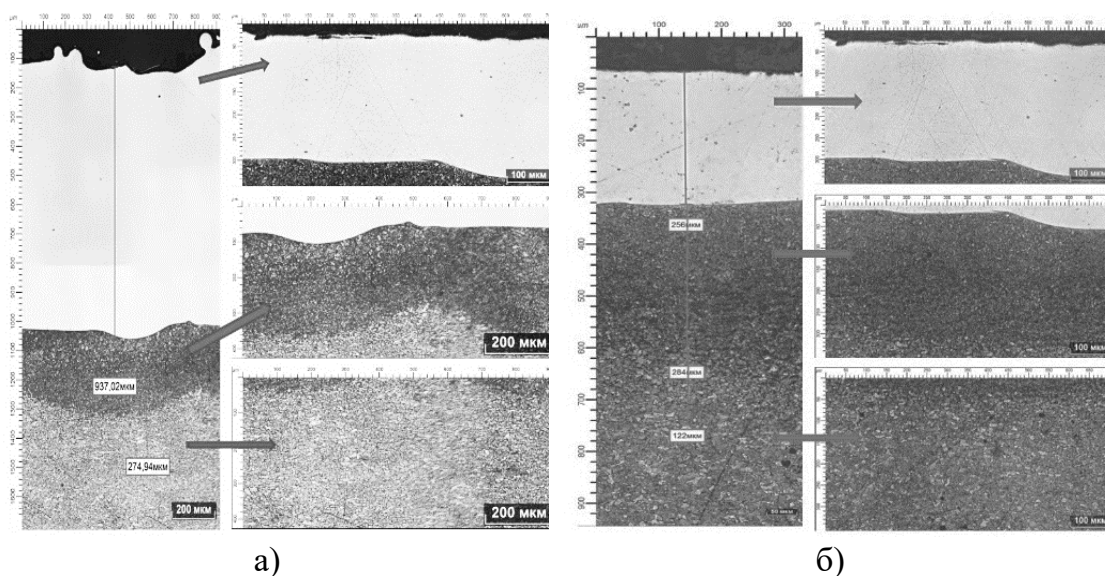


Рисунок 1 – Микроструктура сплавов: а) стеллит, б) инконель

Материал стеллит представляет собой пластичную матрицу кобальта с твёрдыми карбидами хрома и вольфрама в ней. При увеличении содержания углерода в сплаве увеличивается выделение свободных карбидов, твёрдость и хрупкость, а при уменьшении содержания углерода увеличивается прочность и вязкость. Детали, подверженные абразивному износу, наплавляют твёрдыми сплавами типа стеллитов на основе кобальта (35-55 %), содержащие углерод (1-4 %), хром (15-45 %), вольфрам (10-25 %) [1]. Стеллиты обладают значительной износостойкостью и прочностью, хорошим сопротивлением коррозии, эрозии и окалинообразованию при значительных температурах. Сплав инконель имел дендритные участки после исследования.

Среднее значение размера зерна в наплавке, нанесенной на сплав стеллит, было равно 2,48 мкм.

Среднее значение размера зерна в наплавке, нанесенной на сплав инконель, в околосшовной зоне было равно 1,37 мкм (см. рис. 2(а)). Среднее значение размера зерна в основном сплаве инконель было равно 13,95 мкм (см. рис. 2(б)).

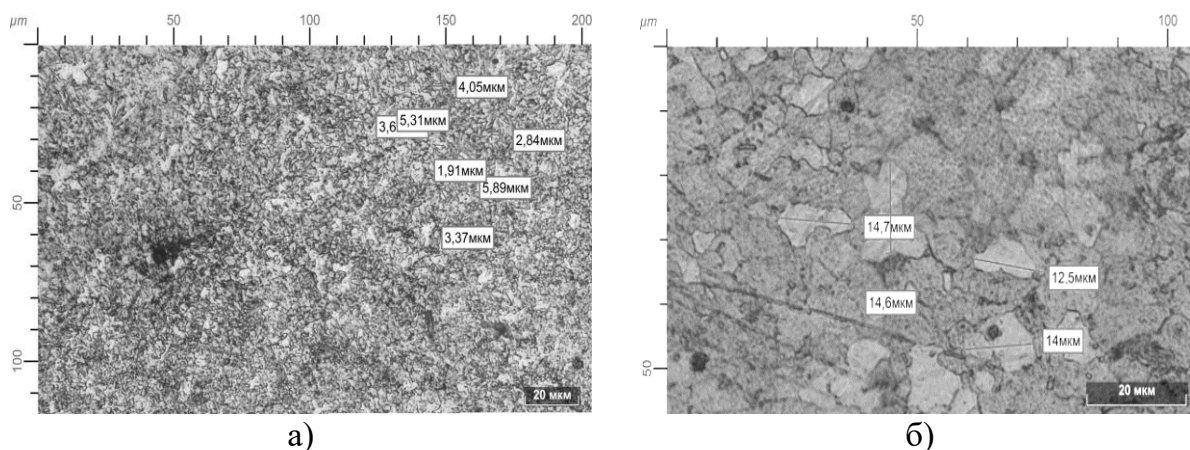


Рисунок 2 – Определение размера зерна наплавки на сплав инконель
а) в околошовной зоне, б) в основном металле

Исследование микротвердости структуры материала наплавки

На рис. 3(а) показан график изменения микротвёрдости наплавки, нанесенной на сплав стеллит. Как показано в предыдущих разделах, здесь было три области, для каждой из которых измерялось среднее значение микротвердости. По результатам, микротвердость наплавки равна 6310 МПа (на графике группа 1), микротвердость зоны термического влияния 3000 МПа (на графике группа 4) и микротвердость основы 2000 МПа (на графике группа 2) (см. рис. 3(а)). На рис. 3(б) показано график изменения микротвёрдости сплава инконель 625. Микротвердость наплавленного слоя 4340 МПа (группа 1), микротвердость зоны термического влияния 2390 МПа (группа 4) и микротвердость основы и смешанной зоны 2060 МПа (группа 2) (см. рис. 3(б)).

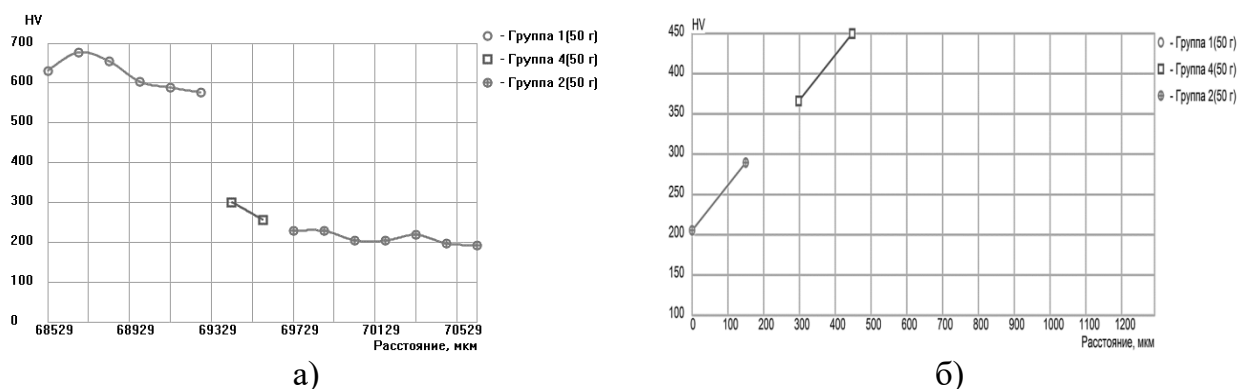


Рисунок 3 – Изменение микротвёрдости по толщине наплавки для сплавов:
а) стеллит, б) инконель

Результаты триботехнических испытаний

При сравнении результатов измерения твердости, микротвёрдости и износостойкости подтверждена корреляция между ними. (см. табл. 1). С увеличением твердости материалов наплавки увеличивается их износостойкость, а также наблюдается увеличение коэффициента трения в паре трения со сталью. Более твердый материал имеет коэффициент трения выше, чем более мягкий материал. Корреляция наблюдается при сравнении результатов измерения твердости, микротвёрдости и износостойкости.

При определении износостойкости наплавов, нанесенных на сплавы инконель и стеллит наблюдается их высокая относительной износостойкость ($\epsilon = 33$ и $\epsilon = 56$) по сравнению с эталоном – сталью 45. Эти наплавки используются при изготовлении и восстановлении важных деталей, например валов насосов, роторов, коленчатых валов. Нужно отметить их высокую стоимость, сложность в обработке и выплавке.

Таблица 1 – Результаты измерения микротвердости и износостойкости

Образец	Размер зерна, мкм	Твердость HRC	Микротвёрдость, HV (МПа)	Коэффициент трения, μ	Относительная износостойкость, ϵ ($\Delta m_{\text{эт.}} / \Delta m_{\text{обр.}}$)
стеллит-лазерная наплавка	2,48	48	6310 3000 2000	0,27	56
инконель - лазерная наплавка	1,37	42	4340 2390 2060	0,25	33
сталь 45-эталон	234	21	3210	0,28	1

Заключение

Проведенные исследования на микроскопическом и субмикроскопическом уровне слоев наплавленных материалов позволяют сделать выводы о тесной связи структурно-фазового состояния материала с его свойствами. На основании полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1) Проведено металлографическое исследование структуры и оценка размера зерна материала износостойких покрытий, нанесенных на сплавы стеллит и инконель. При сравнении размера зерна и результатов исследования износостойкости не наблюдается корреляция между ними. Для наплавки на сплав инконель (с меньшей износостойкостью) размер зерна составлял 1,37 мкм, а для наплавки стеллит (с большей износостойкостью) размер зерна составлял 2,48 мкм.

2) По результатам сравнения твердости и микротвердости, для наплавов, нанесенных на сплав инконель 625 и сплав стеллит, наблюдается корреляция между увеличением твердости и микротвердости и увеличением износостойкости. Это согласуется с основным положением зависимости износостойкости металлов от их твердости, т. е. с увеличением твердости чистых металлов увеличивается их износостойкость, что, однако, усложняется для сплавов.

3) При определении износостойкости наплавов, нанесенных на сплавы инконель и стеллит наблюдается их высокая относительная износостойкость ($\epsilon = 33$ и $\epsilon = 56$) по сравнению с эталоном – сталью 45. Это позволяет их использовать при изготовлении и восстановлении, а также для прототипирования деталей машин. Кроме того, для этих сплавов характерны сложность при выплавке и обработке, высокая стоимость, содержание дорогостоящих легирующих элементов - вольфрама, кобальта, никеля и др. Также нужно отметить, что получение наплавов с использованием лазерных технологий требует специального сложного оборудования. Поэтому применение таких наплавов должно быть целесообразным и экономически выгодным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин, Н.К., Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец – М: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
2. Зависимость триботехнических свойств материала наплавов от легирования / Г. В. Цветкова, М. А. Скотникова, Г. В. Иванова [и др.]. // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 106-110.
3. Структурное и фазовое состояния наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей / Г.В. Цветкова, М.А. Скотникова, Ю.М. Белов [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – № 4(110). – С. 129-136.
4. Ляшенко, Д.В. Исследование металлических покрытий на износ / Д.В. Ляшенко, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 111-118.
5. Особенности строения наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей. / М.А. Скотникова, Г.В. Цветкова, Ю.М. Белов [и др.]. // Металлообработка.–2011. – № 1(61). – С. 37-42.
6. Особенности применения наплавов для деталей машин / М. Аль-Наджар, Я. Нагхави, Г. В. Цветкова, Г. В. Иванова // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 360-364.
7. Исследование триботехнических свойств поверхностного слоя биметаллов / Е. А. Кулик, А. Д. Фернандо, Г. В. Иванова, Г. В. Цветкова // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 146-148.
8. Tsvetkova, G. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel / G. Tsvetkova, M. Skotnikova // Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTTTRIB 2017 – Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania : 9, Kaunas, November, 16–17, 2017. – Kaunas, 2017. – P. 166-171.

Тянь Шиюй, Хо Юйцзя, В.И. Слатин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, slatinv@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ВИБРАЦИОННОГО МЕТОДА УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ ПРИГОДНОЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ

Аннотация

Исследования показали, что вибрационные конвейеры работают по принципу механической вибрации, способность вибрационного конвейера нормально и эффективно работать зависит от правильности его кинематических параметров и выбора кинематических параметров, а также от разумности конструкции. Пропускная способность транспортируемой стружки является одним из важных факторов производительности конвейера. Скорость транспортировки стружки является важным фактором, влияющим на производительность транспортировки.

Ключевые слова: Вибрационный транспортёры, кинематика, параметры, matlab.

Введение

Вибрационные транспортёры в основном используются для транспортировки кусковой, гранулированной или порошкообразной стружки из рабочей зоны процесса резания.

В зависимости от формы привода вибрационные транспортёры можно разделить на три вида [1]:

Вибрационные транспортёры, приводимые в движение упругим шатуном.

Электромагнитные вибрационные транспортёры.

Инерционные вибрационные транспортёры.

Факторы транспортирования стружки

В настоящее время известны четыре осевые модели инерционного возбуждения в процессах механической обработки [2]. Из рисунка 1 видно, что ключевыми вопросами при конструировании механизма возбуждения является скорость движения стружки, направление каждой оси, а также распределение эксцентриковой массы по осям.

Как показано на рис. 1, механизм возбуждения состоит из двух наборов эксцентриковых валов, каждый из которых состоит из двух эксцентриковых валов с одинаковой скоростью вращения и противоположными направлениями, а ε – разность фаз между двумя наборами эксцентриковых валов при $t = 0$. Постоянно изменяя значение ε , анализируется его влияние на скорость перемещения стружки V [3].

На основе математической модели MATLAB, построенной в работе [2], мы можем проанализировать и обобщить соответствующие факторы, влияющие на скорость транспортировки материала.

Из рис. 2 видно, что, когда разность фаз двух наборов осей эксцентрика $\theta = 0$, V является положительной величиной, и по мере того, как θ постепенно увеличивается, V также постепенно увеличивается. V достигает максимального значения, когда θ близко к $\pi/2$, а затем постепенно уменьшается. Когда ε близко к π , V достигает 0, а

когда $\varepsilon = \pi$, V является отрицательным значением. При дальнейшем увеличении ε V постепенно снижается, а когда ε приближается к $3\pi/2$, V достигает минимального значения, а затем постепенно увеличивается. Когда ε близко к 2π , V достигает 0, а когда $\varepsilon = 2\pi$, V является положительным значением [4].

m_1 – вес вибрирующей рамы, m_2 – вес стружки, а m_2 принимает ряд значений от 0 до $m_1/3$. На рис. 3 видно, что по мере увеличения веса стружки скорость транспортировки немного снижается. Это снижение составляет порядка 12% от максимальной скорости транспортировки.

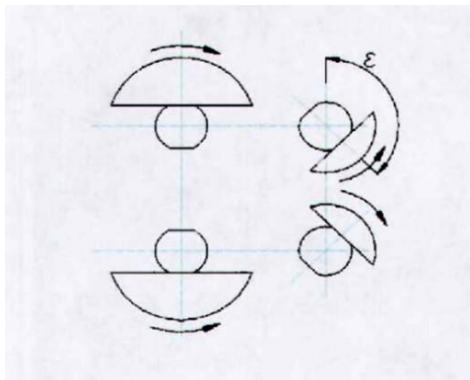


Рисунок 1 – Механизм вибрации

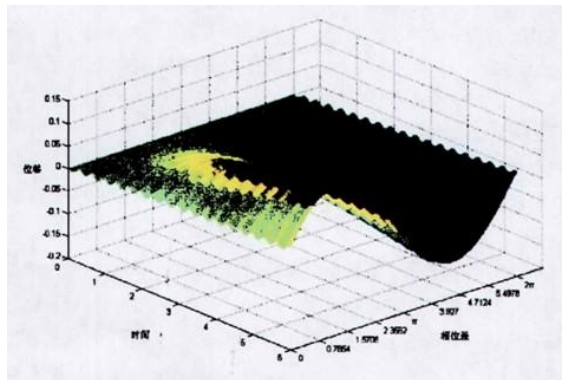


Рисунок 2 – Влияние ε на скорость транспортировки стружки

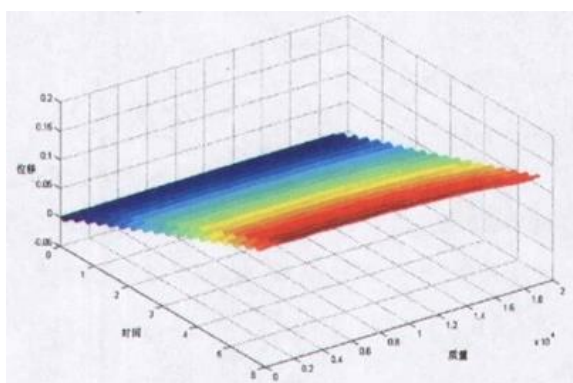


Рисунок 3 – Влияние объёма доставки стружки на скорость доставки

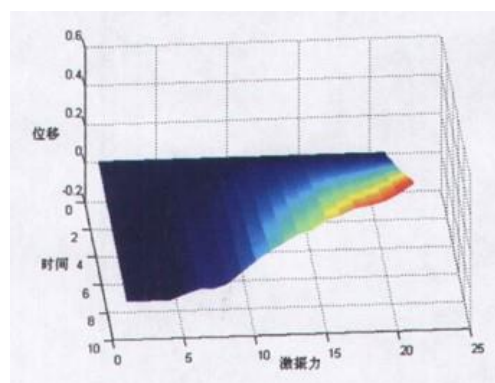


Рисунок 4 – Влияние изменения амплитуды возбуждающей силы на скорость транспортировки стружки

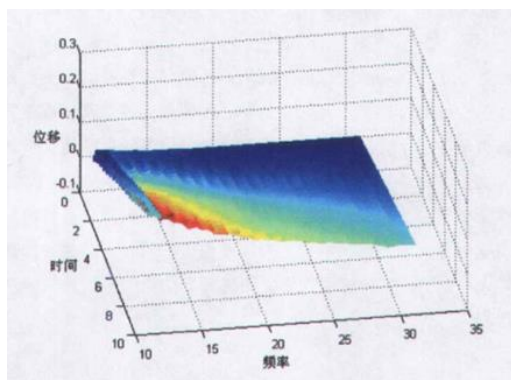


Рисунок 5 – Влияние изменения частоты на скорость транспортировки стружки

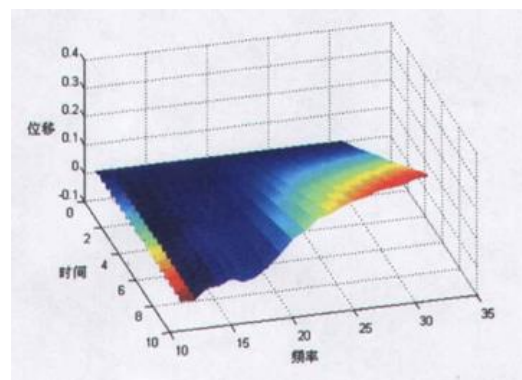


Рисунок 6 – Влияние изменения скорости эксцентрикового вала на скорость транспортировки стружки

Сохраняя другие параметры вибрации неизменными, можно изменять амплитуду возбуждающей силы.

Изменяя частоту возмущающей силы, то есть изменяя скорость вращения эксцентрикового вала, при сохранении неизменной массы эксцентрика и положения его центра масс, амплитуда действующей силы будет соответственно увеличиваться при изменении частоты возбуждающая сила увеличивается.

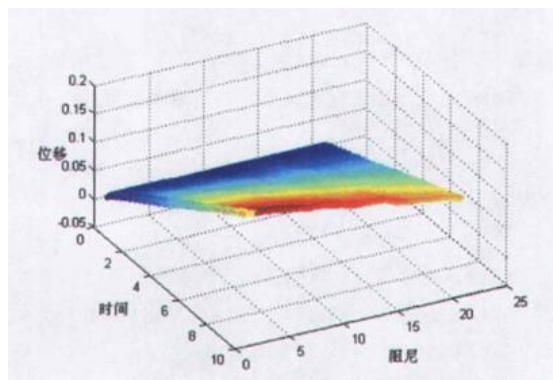


Рисунок 7 – Влияние демпфирования на скорость транспортировки стружки

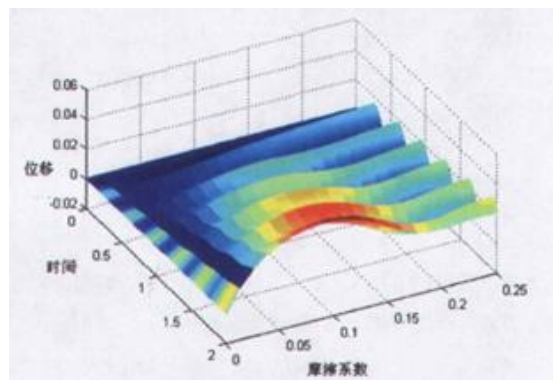


Рисунок 8 – Влияние коэффициента трения на скорость транспортировки стружки

Из рис. 7 видно, что конвейер работает в состоянии минимального демпфирования, при увеличении демпфирования скорость транспортировки стружки снижается, но влияние демпфирования на скорость относительно невелико.

Причина, по которой конвейер может перемещать стружку, заключается в трении между стружкой и жёлобом. В рис. 8 показано влияние коэффициента трения на скорость транспортирования стружки. Здесь совершенно очевидно, что коэффициент трения является важным фактором, влияющим на производительность процесса транспортировки стружки.

Результаты

В результат нашего анализа было установлено, что процесс транспортирования стружки является многофакторным. Различные факторы по-разному влияют на эффективность транспортировки материала. Изменение разности фаз A довольно периодически, а вес материала оказывает относительно постоянное влияние на скорость транспортировки в реальной жизни, в то время как увеличение силы возбуждения непосредственно влияет на скорость транспортировки. Влияние частоты на скорость транспортировки материала связано с объемом эксцентричной массы и положением центра масс. Демпфирование оказывает меньшее влияние на скорость транспортировки стружки. Изменение коэффициента трения непосредственно влияет на скорость транспортировки материала [5].

Обсуждение

Из рис. 3 видно, что в реальном процессе транспортировки $m_2 \ll m_1$, а скорость транспортировки конвейера имеет определённую стабильность.

Из рис. 4 видно, что по мере увеличения амплитуды возбуждающей силы скорость перемещения стружки постепенно увеличивается.

Из рис. 5 видно, что одновременное изменение массы эксцентрика и центра масс эксцентрикового вала, приводит к увеличению частоты скорости перемещения стружки.

Из рис. 6 видно, при сохранении неизменной массы эксцентрика и положения его центра масс амплитуда воздействующей силы будет соответственно увеличиваться, что с увеличением частоты скорость перемещения стружки также постепенно увеличивается.

Из рис. 8 видно, что, когда коэффициент трения μ равен нулю, скорость транспортировки V равна нулю, трения между стружкой и желобом нет, и движение желоба не может заставить стружку двигаться вперёд. По мере постепенного увеличения μ V также постепенно увеличивается. V постепенно достигает максимального значения, а затем постепенно снижается. После того, как μ постепенно увеличивается до определённого значения, V постепенно уменьшается до 0. Поскольку μ продолжает увеличиваться, скорость транспортировки V всегда равна нулю.

Заключение

В статье уделено внимание разности фаз, доставке материала, амплитуде и частоте возбуждающей силы. Влияние параметров вибрации, таких как демпфирование и коэффициент трения, на скорость транспортировки материала, а также выбор подходящих параметров в процессе проектирования конвейера. Частота выбирается в соответствии с работой конвейера в состоянии далеко за пределами резонанса и работой конвейера в состоянии малого демпфирования. Коэффициент трения между различными материалами и желобом должен быть рассчитан отдельно. При изменении количества транспортируемого материала скорость транспортировки изменяется незначительно, и конвейер обладает определенной стабильностью при изменении объема транспортируемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чэн Даксянь. Механическое проектирование. Справочник. В 3 т. Т 3 /Даксянь Чэн. –Пекин: Издательство химической промышленности, 1993.
2. Хэ Юймин. Исследование и проектирование горизонтального вибрационного конвейера / Юймин Хэ // Сианьский технологический университет. – 2004.
3. Теоретическая механика (нижний том): справочник / под ред. учебно-научной кафедры теоретической механики технического университета. – Харбин: Издательство Харбинского технологического института, 1982.
4. Вибрационная механика: учебное пособие / под ред. Ни Чжэньхуа. – Сиань: Издательство Сианьского университета Цзяотун, 1990.
5. Ян Цзяшен. Анализ статических, модальных и гармонических характеристик инерционных вибрационных питателей / Цзяшен Ян / Тяжелое машиностроение. – 1997. – № 5.

Хо Юйцзя, Тянь Шиюй, В.И. Слатин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, slatinv@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТРУЖКИ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИИ ДВУХМЕРНОГО СТРУЖКОЛОМА

Аннотация

В статье на основе теории стружколомания и её моделирования авторы используют эмпирическую модель для анализа классификации геометрии стружколома, ключевых параметров, а также проводят анализ геометрии распространённых типов стружколомов и оценки их эффективности. С помощью теоретических формул двухмерного стружколома соответствующие выводы используются для исследования влияния дозы резания на разрушение стружки и снижения стоимости проектирования стружколомающего инструмента.

Ключевые слова: дробление стружки, стружколом, теоретическая модель дробления стружки.

Введение

В настоящее время на машиностроительных заводах в Китае и России образование, очистка, транспортировка и переработка стружки остаются нерешёнными проблемами. Для решения проблемы получения стружки, удобной для транспортирования и повышения эффективности механической обработки известны два метода: непрерывный (кинематический) и прерывный (некинематический).

Некинематические методы включают предварительную обработку поверхностиматериала и проектирование стружколомов, которые имеют широкой спектр применения.

Методы

В настоящее время существует три основных типа теоретических моделей, предлагаемых различными исследователями: эмпирические, аналитические и численные имитационные модели.

Эмпирическая модель исследует влияние объёма резания на разрушение стружки, и многие учёные показали, что подача S и глубина резания a_p оказывают большее влияние на разрушение стружки, чем скорость резания v_c , т. е. разрушение стружки более вероятно при увеличении S и a_p [1]. Наиболее известна работа Фанг и других, в которой показана новая эмпирическую модель, в которой предложена теорию предельной глубины резания a_{p-cr} (critical cutting depth) и предельной скорости подачи S_{cr} (critical feed rate) [2], при этом стружка может быть эффективно разрушена в диапазоне $a_p > a_{p-cr}$ и $S > S_{cr}$. В их теории была установлена связь между радиусом закручивания стружки вверх и параметрами двумерного стружколома.

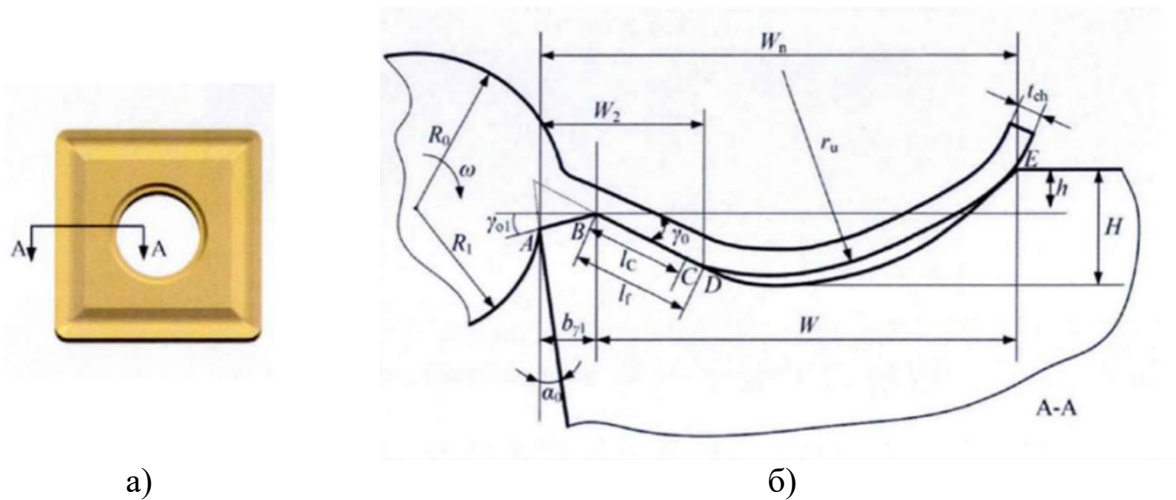
Учёный Кадзуо Чжуншань (Япония) предложил расчётную формулу, связанную с разрушением стружки (1) [3]. Автор считает, что основной причиной разрушения стружки является то обстоятельство, что напряжение на свободной поверхности стружки достигает деформации разрушения её материала.

$$\varepsilon = \frac{h_c}{2} \cdot \left(\frac{1}{r_{u1}} - \frac{1}{r_{u2}} \right) \geq \varepsilon_b \quad (1)$$

где: ε – деформация стружки, r_{u1} – начальный радиус скручивания стружки, r_{u2} – радиус скручивания при разрушении стружки, ε_b – деформация материала при разрушении.

Расчёт деформации стружки, как и в эмпирической модели, основан на геометрии стружколома. На рис.1 показано влияние линейного дугообразного стружколома на скручивание стружки вверх. Из формулы (2) видно, что радиус скручивания стружки связан только с геометрическими параметрами стружколома. Уравнение (1) и уравнение (2) могут быть объединены для получения расчёта предельной подачи по формуле (3).

В настоящее время, машиностроение Китая, получило наиболее широкое распространение типы стружколомов, показанные на рисунке 2.



а) б)
Рисунок 1 – а) Схематическая диаграмма двухмерного стружколома;
б) влияние стружколомающих канавок на стружку

$$r_u = \frac{W^2 + h^2 + l_c^2 + 2l_c(W \cos \gamma_0 - h \sin \gamma_0)}{2(W \cos \gamma_0 - h \sin \gamma_0)} \quad (2)$$

$$f_a = \frac{\varepsilon_b C_h K_r}{\alpha \sin k_r} \cdot r_u ;$$

$$C_h = t/t_{ch} < 1 ;$$

$$K_r = \frac{r_{u2}}{r_{u2} - r_{u1}}, r_{u1} < r_{u2} \quad (3)$$



Рисунок 2 – Доступные типы стружколомов

В процессах механической обработки тел вращения известны три типа стружколомов: линейный дуговой (рис.3а), прямолинейный (рис.3б) и полно дуговой (рис.3в).

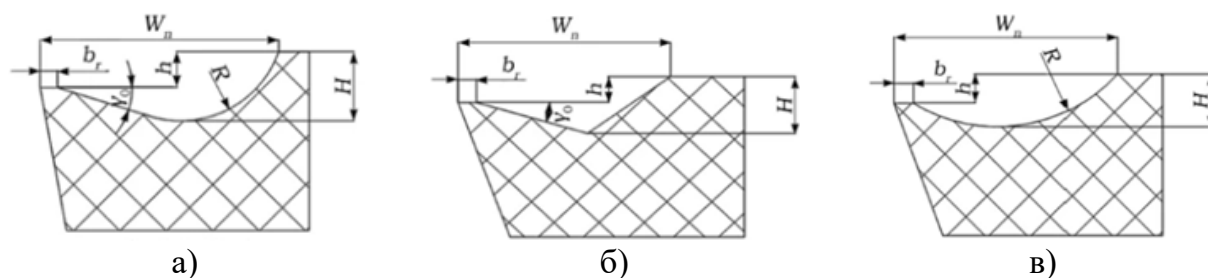


Рисунок 3 – Типы современных стружколомов

Линейный стружколом образован пересечением двух прямых, и его нижний угол составляет $180^\circ - \sigma$ (σ называется углом клина стружколома), а нижний угол канавки ($180^\circ - \sigma$) заменяет роль дуги R [4]. Если угол дна канавки мал, радиус закручивания стружки мал, а деформация стружки велика; если угол дна канавки большой, радиус закручивания стружки велик, а деформация стружки мала. При средней глубине резания угол клина стружколома обычно выбирают равным $60 \sim 70^\circ$.

Прямолинейный дуговой стружколом образуется путём соединения прямой линии и дуги. Прямая часть представляет собой переднюю поверхность инструмента, а радиус R нижней дуги канавки оказывает определённое влияние на скручивание и деформацию стружки [5]. Если R мало, радиус закручивания стружки мал, а деформация стружки велика; если R велико, радиус закручивания стружки велик, а деформация стружки мала. При средней глубине резания (глубина резания $a_r = 2 \sim 6$ мм) обычно выбирают $R = (0,4 \sim 0,7) W_n$, где W_n – ширина стружколома [6].

Основными параметрами полнодугового стружколома являются ширина канавки W_n , радиус нижней дуги канавки R и передний угол γ_0 . Отношения между ними таковы:

$$\sin \gamma_0 = \frac{W_n}{2R} \quad (4)$$

Результаты

Линейные дуговые и прямолинейные стружколомы больше подходят для обработки углеродистой стали и легированной конструкционной стали, а общий передний угол равен γ_0 . W_n диапазоне $5 \sim 15^\circ$.

При резке высоко пластичных материалов, таких как нержавеющая сталь, часто используется полно дуговые стружколомы. Поскольку при обработке высоко пластичных материалов передний угол инструмента выбирается относительно большим ($\gamma_0 = 25^\circ \sim 30^\circ$), при таком же большом переднем угле режущая кромка полно дугового стружколома относительно прочная, а канавка также неглубокая, что удобно для стока крошки, поэтому она более практична.

Ширина стружколома W_n связана со скоростью подачи S и глубиной резания a_r . Когда скорость подачи S увеличивается, толщина резания увеличивается, и ширина стружколома должна быть соответственно увеличена, глубина резания большая, а канавка должна также должным образом расширяться.

Обсуждение

Если ширина стружколома изначально выбирается по скорости подачи, то для резания среднеуглеродистой стали соотношение между шириной W_n и подачей S составляет примерно $W_n = 10S$; при резке легированной стали для увеличения деформации стружки необходимо желательнее взять $W_n = 7S$.

Ширина W_n стружколома также должна соответствовать глубине резания a_r . Как правило, ширина канавки W_n может быть приблизительно выбрана в соответствии с a_r . Когда a_r велико, W_n должно быть больше, когда a_r мало, W_n должно быть соответствующим образом уменьшено. В тех случаях, когда глубина резания большая и канавка слишком узкая, стружка широкая и не может легко закручиваться в канавке, поэтому стружка часто не стекает на дно канавки и образует полосообразную конфигурацию [6]. Когда глубина резания малая, а канавка слишком широка, стружка в этом случае узкая и легко перемещается. Данный вывод относительно свободного перемещения стружки указывает на её недостаточную деформацию, и на возможные проблемы с превращением в стружку, пригодную для транспортирования.

Заключение

Сравнение эмпирических формул, обобщённых предыдущими авторами, позволяет сделать вывод, что радиус скручивания стружки пропорционален ширине щели и обратно пропорционален переднему углу. Следовательно, можно оценить влияние параметра ширины щели и геометрии переднего угла, следующим образом: меньшая ширина щели и больший передний угол способствуют дроблению стружки. Полученный вывод может иметь несомненно практическое значение в процессах механической обработки тел вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыров, Р. Р. Выбор метода дробления стружки при механической обработке деталей / Р. Р. Кадыров // Электромеханотроника и управление: Пятнадцатая Всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2020": Материалы конференции. В 6 томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 4. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 94.
2. Кадзуо Чжуншань. Теория резания металлов / Чжуншань Кадзуо // Издательство машиностроительной промышленности. – 1985. – С. 245.
3. Патент № 2771284 С2 Российская Федерация, МПК В23В 51/04. Сверлильная вставка: № 2020112297: заявл. 24.08.2018; опубл. 29.04.2022 / Х. Карлберг, Ф. А. Иах; заявитель САНДВИК ИНТЕЛЛЕКЧУАЛ ПРОПЕРТИ АБ.
4. Пэн Юнь. Токарная технология и применение / Юнь Пэн // National Defense Industry Press. – 2020. – С. 236.
5. Ченг Дасянь. Справочник по механическому проектированию / Дасянь Ченг // Издательство химической промышленности. – 1993. – № 3. – С. 356.
6. Fang, N. A. Universal slip-line model with non-unique solutions for machining with curled chip formation and a restricted contact tool / N. Fang, I. S. Jawahir, P. L. B. Oxley // International Journal of Mechanical Sciences. – 2001. – V. 43(2). – P. 557–580.

А.Д. Шабалин, Д.Н. Шабалин, М.В. Яковицкая, Н.А.Солодилова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия , shadmit@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

В настоящей работе составлена управляющая программа (УП) для фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ), а также сделан расчёт необходимых параметров для ее написания. Основной целью работы является нахождение способа повышения эффективности фрезерной обработки. Для достижения поставленной цели предлагается использовать фрезерный станок с ЧПУ, для которого будет написана управляющая программа на примере детали «Опора». В результате работы будет представлен текст составленной программы для контурной обработки, обработки торцевой поверхности, а также сверления и цекования отверстий.

Ключевые слова: программирование станков с ЧПУ, технология машиностроения, цифровое оборудование.

Введение

В настоящее время от машиностроения требуется изготавливать продукцию с минимально затраченными ресурсами и временем, при этом качество выпускаемых изделий должно соответствовать необходимым требованиям. Эта закономерность определяется как эффективность производства [1].

Для повышения производительности на производстве используются нестандартная станочная оснастка, отработанные технологические процессы.

Кроме того, все больше предприятий стараются уйти от использования традиционного универсального оборудования и перейти на цифровое оборудование - станки с ЧПУ [2]. Эти станки позволяют повысить производительность обработки, что снижает себестоимость изготовления деталей.

В работах [3, 4] рассмотрены похожие вопросы, возникающие при проектировании токарных и токарно-фрезерных операций.

Методы исследования

В данной статье был спроектирован технологический процесс фрезерной операции и промоделирован в компьютерном классе лаборатории Технологии машиностроения на стойке FANUC-21iM.

Результаты и обсуждение

Повысить эффективность производства за счет использования станков с ЧПУ можно при условии грамотно рассчитанных режимов резания, назначенного режущего инструмента и составленной программы [4]. При этом надо принимать во внимание дефекты и изменение свойств материала при нагревании [5].

Для назначенной детали (рисунок 1) выберем технологические переходы: фрезерование торца, контура, сверление, фрезерование внутреннего контура.

Для каждого перехода задаём инструмент, скорость v (м/мин), подачу s , (мм/зуб), рассчитаем по формуле (1) частоту вращения шпинделя n (об/мин), и пересчитаем по формуле 2 подачи для определения минутной подачи F , (мм/мин). Полученные данные представлены в таблице 1.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \quad (1)$$

$$F = n S_z z \quad (2)$$

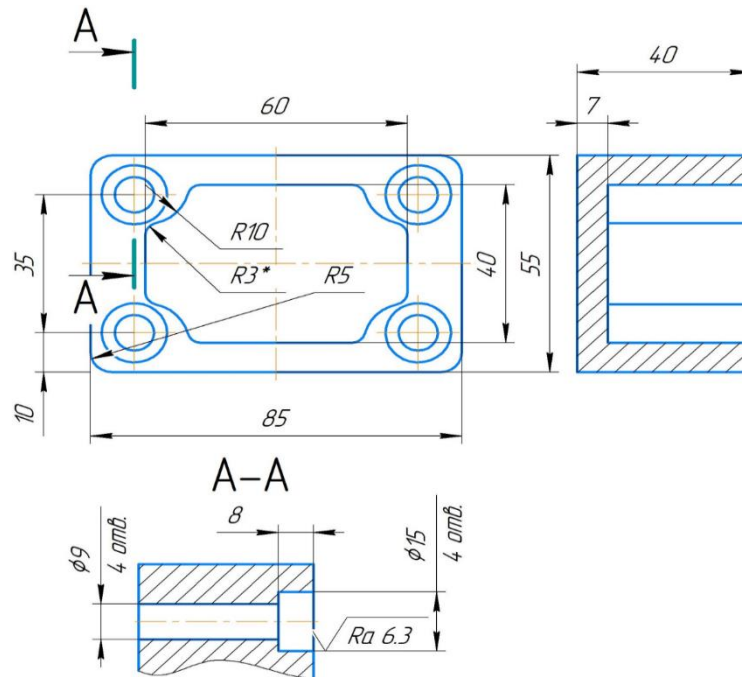


Рисунок 1 – Эскиз детали «Опора»

Таблица 1– Сводные данные по переходам

Номер режущего инструмента	Наименование	Параметры режима резания
1	Торцевая фреза Ø80 Z=6 (число зубьев)	Частота вращения 398 об/мин Скорость резания 100м/мин Подача 350 мм/мин
2	Концевая фреза Ø32 Z=4(число зубьев)	Частота вращения 497 об/мин Скорость резания 50 м/мин Подача 99 мм/мин
3	Сверло Ø9	Частота вращения 530 об/мин Скорость резания 15 м/мин Подача 106 мм/мин
4	Концевая фреза Ø6 Z=2	Частота вращения 1592 об/мин Скорость резания 50 м/мин Подача 150 мм/мин

По полученным данным, руководствуясь основными терминами и правилами задания циклов и кодов [6, 7], пишем УП для фрезерования заданной детали (таблица 2).

Таблица 2– Управляющая программа

1	2
O0667 N5G17G40G49G80; N10G54; N15M6T1; N20G43H1Z10; N30M3S398F350; N35G0X-121Y0; N40G0Z0; N45G1X121; N50G0Z10; N55T2M6; N56S497F99; N60G49; N65G43H1Z10; N70G0X-65; N75G0Z-40; N80G1X-58.5; N85G1Y22.5; N90G2X-37.5Y43.5J0I21; N95G1X37.5; N100G2X58.5Y22.5J-21I0; N105G1Y-22.5; N110G2X37.5Y-43.5J0I-21; N115G1X-37.5; N120G2X-58.5Y-22.5J21I0; N125G1Y0; N130G0X-60; N135G0Z10; N140G49; N145M6T3; N146S530F106; N150G43H1Z10; N155S200F10; N160G0X-32.5Y17.5; N165G0Z10; N170G98G81X-32.5Y17.5Z-41R1; N175X-32.5Y-17.5; N180X32.5Y-17.5; N185X32.5Y17.5; N190G80; N195G98G81X0Z-33Y0R1; N200G80; N205M6T4; N206S1592F150; N210G43H1Z10; N215S200F50; N220#1=-33; / глубина кармана N225#2=[33/4] ; /шаг N230#3=0; /переменная для ZN235#4=[6/2]; /радиус фрезы N240#5=10; /радиус в углах кармана N245#6=[60/2] ; /xmax N250#7=[40/2] ; /ymax N255#10=-1; /коэффициент N260#3=#3-#2; N265#8=#6; N270#9=#7;	N275#20=#9-#4; N280#21=#8-#4-#5; N285#22=#8-#4; N290#23=#9-#4-#5; N295#24=#4; N300#25=#4+#5; N305G1Z#3; N310G1Y#20; N315G1X#21; N320G3X#22Y#23J#24I#25; N325G1Y[#10*#23]; N330G3X#21Y[#10*#20]J[#10*#25]I#24; N335G1X[#10*#21] ; N340G3Y[#10*#23]X[#10*#22]I[#10*#25]J[#10*#24]; N345G1Y#23; N350G3X[#10*#21]Y#20J#25I[#10*#24] ; N360G1X0; N365#8=#8-#4; N370#9=#9-#4; N375IF[#9GT[#7-#5]]GOTO275; N380G0Z[#3+#2+1] ; N385G0X[#8+#4+1]Y[#9-#4] ; N390G1Z#3; N395G1X[#8*#10-#4-1] ; N400G0Z[#3+#2+1] ; N405#9=#9-#4; N410IF[#9GT[#10*#7+#5+#4]]GOTO385; N415X0Y0; N420IF[#3GT#1]GOTO260; N425G0Z10; N430G0X-32.5Y17.5; N435G1Z-8; N440G1X-37; N445G2X-28Y17.5I4.5J0; N450G2X-37Y17.5I-4.5J0; N455G0Z10; N460G0X-32.5Y-17.5; N470G1Z-8; N480G1X-37; N490G2X-28Y-17.5I4.5J0; N500G2X-37Y-17.5I-4.5J0; N510G0Z10 N520G0X32.5Y-17.5 N530G1Z-8 N540G1X37 N550G2X28Y-17.5I-4.5J0 N560G2X37Y-17.5I4.5J0 N570G0Z10 N580G0X32.5Y17.5 N590G1Z-8 N600G1X37 N610G2X28Y17.5I-4.5J0 N620G2X37Y17.5I4.5J0 N630G0Z10 N640M30 M2 – конец всей программы.

УП проверена на реальном симуляторе, вид детали представлен рисунке 2.

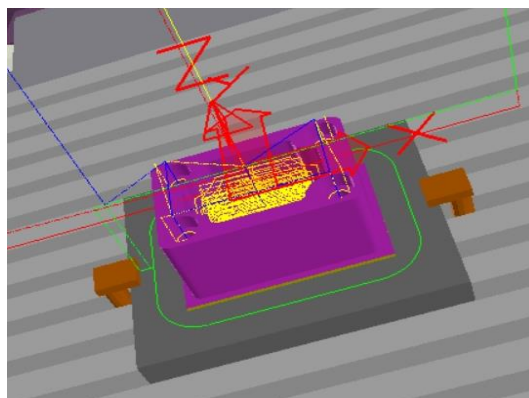


Рисунок 2 – Модель полученной детали

Заключение

Полученная УП дает возможность снизить основное время, упрощает работу оператора и наладчика станка. При этом повышается эффективность фрезерных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов, В. В. Аудит систем менеджмента качества / В. В. Глухов, Д. П. Гасюк. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 358 с.
2. Программирование станков с числовым программным управлением: учебное пособие / Д. Н. Шабалин, И. Н. Хрусталева, И. А. Четвериков, Я. Ю. Бровкина. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2021. – 100 с.
3. Применение современных подходов к проектированию токарных операций при наивысшей загрузке станков с повышенной производительностью / Д. Н. Шабалин, И.И. Козарь, Т.А. Ларионова [и др.] // Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 97-102.
4. Шабалин, Д. Н. Цифровизация токарно-технологической операции за счет использования оборудования с ЧПУ / Д. Н. Шабалин, И. И. Козарь, Д. И. Ашрапов // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России: Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 100-105.
5. Carbide formation in the niobium-microalloyed 15KH2Mfa steel during heat treatment / V. G. Teplukhin, A. S. Tsvetkov, A. I. Popov, D. N. Shabalin // AIP Conference Proceedings : 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2020, Ekaterinburg, November, 09–13, 2020. – Vol. 2315. – Ekaterinburg: American Institute of Physics Inc., 2020. – P. 040045.
6. ГОСТ 20523-80*. Устройства числового программного управления станками. – М.: Издательство стандартов, 1988.
7. ГОСТ 23597-79. Станки металлорежущие с числовым программным управлением. Обозначение осей координат и направлений движений. – Москва: Издательство стандартов, 1993.

Шао Гуансинь, М.М. Радкевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, shao.d@edu.spbstu.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

Аннотация

В статье приведена классификация, область применения и описывается технология изготовления барьерного дорожного ограждения. Рассмотрены возможные дефекты элементов барьерного дорожного ограждения и причины их возникновения. Предложен интенсивный путь модернизации по улучшению технологического процесса изготовления дорожного ограждения за счет внедрения новых технологий, изменения структуры предприятия.

Ключевые слова: барьерное ограждение, группа барьерного ограждения, структура технологического процесса производства.

Введение

С ростом количества автомобилей возрастает и число аварий, что вынуждает власти обеспечивать безопасность дорожного движения [1, 2]. Основное назначение дорожных ограждений заключается в предотвращении выезда автомобилей за пределы дорожного покрытия, разделении потока транспорта и пешеходов, ограждении аварийных участков дороги, мест ДТП и других чрезвычайных ситуаций, а также в обозначенные зоны проведения ремонта дорожного покрытия и ограждении строительных участков. Для этого на трассах, мостах, шоссе, возле тротуаров и опасных местах возводятся различного назначения барьерные ограждения. Чаще всего это металлические конструкции, способные выдержать наезд достаточно крупного автомобиля и предотвратить его падение в кювет или выезд на пешеходную зону. В некоторых случаях, опасные зоны могут ограждаться временными сооружениями из пластика [3].

Методы

По материалу, используемому для изготовления и функциональному назначению дорожных ограждений можно классифицировать как железобетонные; бетонные; металлические; пластиковые; разделительные; ограждающие и сдерживающие

Наиболее распространенными сооружениями являются металлические. Они устанавливаются вдоль большинства автодорог и на мостах. Металлическое барьерное ограждение способно остановить движущийся автомобиль, причинив ему меньше вреда, нежели бетонный аналог. Для его производства используется листовая металл толщиной 3–4 мм. На металл обычно наносится защитное покрытие в виде краски или оцинковки.

В зависимости от места расположения ограждения по ширине земляного полотна автомобильной дороги, улицы или мостового сооружения устанавливают односторонние и двухсторонние конструкции ограждений [4 - 8].

В данной статье рассматривается технология изготовления главной части барьерного ограждения – продольной балки, а также приводятся результаты исследования защитного покрытия, возможные дефекты и их устранение.

Результаты и обсуждение

Продольный элемент ограждения, которым является балка, предназначенный для восприятия, распределения и передачи нагрузки от вступившего в контакт с ограждением транспортного средства на другие элементы ограждения. На рисунке 1 приведены конструкции разных балок, отличающиеся расположением крепежных отверстий.

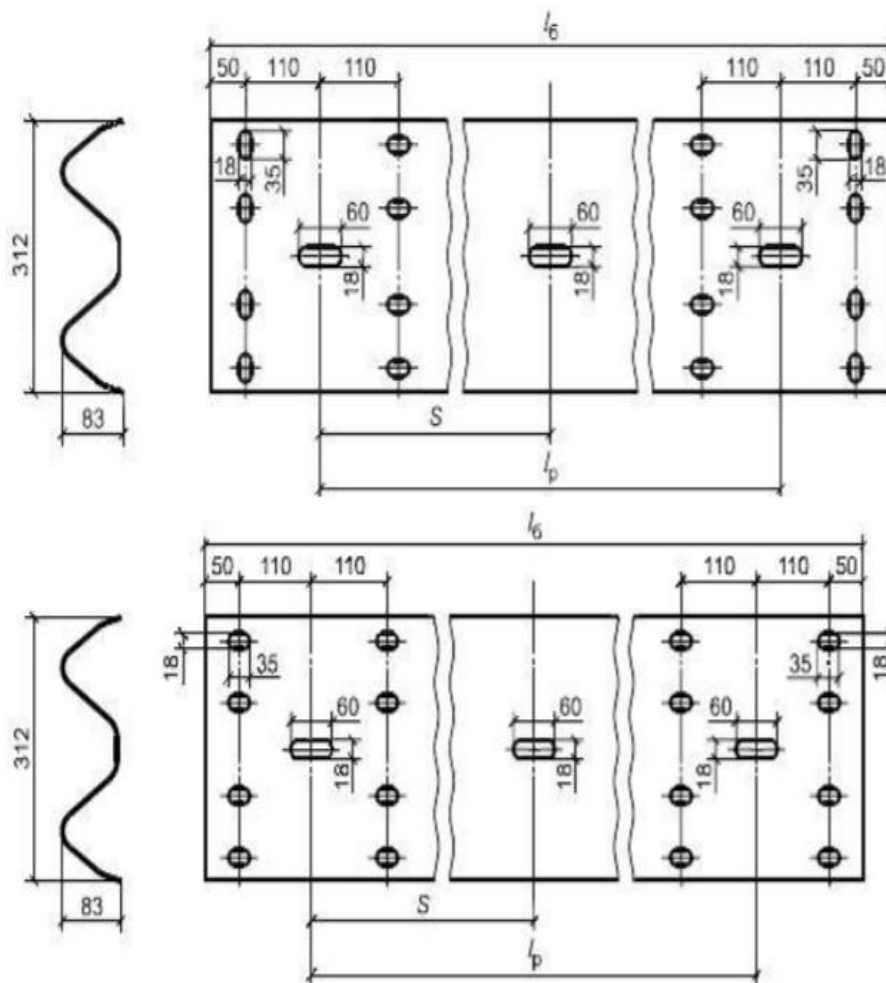


Рисунок 1 – Секции балок дорожного ограждения: l_6 – полная длина секции балки; l_p – расчетная длина секции балки; S – шаг осевых отверстий

Укрупненный технологический процесс изготовления продольной балки можно представить таким образом:

1. Заготовительная операция – отрезка полосы.
2. Пробивка отверстий.
3. Правка.
3. Формовка на прокатном стане и отрезка.
4. Травление и удаление ржавчины.
5. Обезжиривание.
6. Сушка.

7. Горячее цинкование.
8. Пассивация.
9. Промывка.
10. Напыление пластика.

Для производства качественных элементов барьерных дорожных ограждений прежде всего необходимо использовать хорошее оборудование. С этой целью выбран стан формовочный для барьерных ограждений. Основные характеристики стана, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Стан для прокатки профиля продольной балки ограждения

Характеристика	Значение
Высококачественные ролики, материал	9X1, 9XC, ХВГ, Х12, Х12Ф1, Х12МФ с финишной обработкой наклепом
Усиленные клетки, диаметр посадочных валов, мм	110
Редуктор на каждой клетки! Быстрая и удобная регулировка зазоров по направляющим	
Усиленная система безопасности (вывод дублирующих аварийных выключателей и пр.)	
Скорость прокатки, м/мин	12
Привод стана	электромеханический
Габаритные размеры, мм, не более	
Длина	15000
Ширина	700
Высота	1031
Масса, кг, не более	10000

Элементы барьерного защитного дорожного ограждения могут окрашиваться или оцинковываться с целью исключения коррозии металла. После длительной эксплуатации дорожного ограждения оно имеет дефекты, как защитного покрытия, так и самого металла.

В данной работе были проведены исследования по изучению наличия дефектов и структуры цинкового покрытия основного элемента барьерного ограждения – продольной балки. В качестве изучаемого объекта исследования использовались элементы дорожного покрытия после определенного времени эксплуатации на предмет состояния оцинкованного слоя. На рисунке 2 (а, б) показан внешний вид фрагментов балки и оцинкованного слоя.

После изучения дефектов и структуры цинкового покрытия основного элемента барьерного ограждения – продольной балки выяснили, что на продольной балке барьерного ограждения имеется защитное горячее цинковое покрытие толщиной 90–140 мкм (результаты измерения металлографическим методом). Защитное покрытие не имеет нарушений целостности на всей поверхности профиля защитного барьерного ограждения.

Отдельные частицы в составе налета содержат значительное количество железа – до 22 % масс., вероятно, в виде оксидов. Обнаружены отдельные частицы не окисленного железа.

На подготовленном шлифе на обеих сторонах изделия имеется покрытие толщиной 80-90 мкм. В приповерхностной области покрытия тонкий слой с

признаками коррозии цинкового покрытия. Коррозии основного металла обнаружено не было, защитное покрытие сохранилось. Образовавшийся слой покрытия с налетом и без налета, находится в диапазоне 100-131 мкм. В обоих случаях поверхность металла балки может включать и продукты окисления цинка.



а)



б)

Рисунок 2 – Дефекты цинкового покрытия на продольной балке:
а) лицевая поверхность балки защитного ограждения с налетом;
б) поверхность металла балки, очищенный от налета

Отмечено достаточно сильное пассивирующее действие имеющегося налета. Но применение моющих средств, содержащих ортофосфорную кислоту, улучшает декоративный вид только на короткий промежуток времени.

Структура защитного цинкового покрытия является характерной для покрытий большой толщины. Структуру покрытия изучали путем металлографического исследования двух микрошлифов, вырезанных из радиусов гнутого профиля, протравленными 3 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. На поверхности образца на протяжении всей поверхности не выявили нарушения целостности покрытия. Толщина покрытия составляла 90-140 мкм. На рисунке 3 приведена фотография микроструктуры защитного цинкового покрытия.

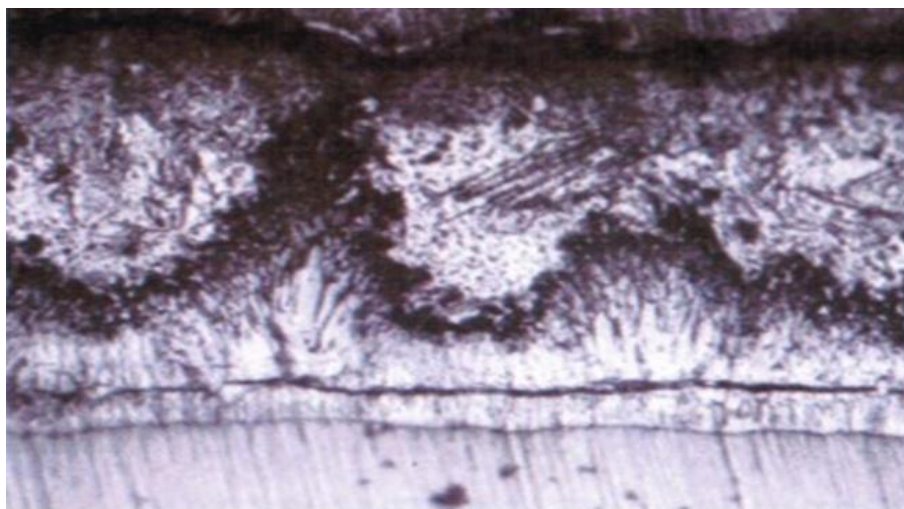


Рисунок 3 – Микроструктура покрытия (выпуклая поверхность) x250

Структура покрытия характеризуется наличием фаз, свойственных данному покрытию. Верхний слой покрытия с максимальным содержанием цинка, представляет собой твердый раствор железа в цинке и обладает защитной способностью. На вогнутых поверхностях толщина этого слоя составляет 30–50 % от общей толщины покрытия. На выпуклой поверхности такие участки покрытия чередуются с участками, имеющими значительное содержание железа.

На цинковом покрытии наружной поверхности продольной балки защитного барьера имеется окисный слой цинка толщиной до 10 мкм, образовавшийся в результате агрессивного действия внешней среды и включающий в себя минерализованные вещества, содержащиеся в дорожной грязи. Светло-коричневый цвет наружной поверхности покрытия можно объяснить, как наличием железа (в среднем около 5%) в цинковом покрытии, так и наличием железа в дорожной грязи. Технология нанесения горячего цинкового покрытия связана с увеличением толщины слоя с повышением содержания в нем железа. Железо в цинке несколько снижает коррозионную стойкость покрытия, однако определяющим параметром защитной способности покрытия является его толщина и прочность сцепления с основой.

Снижения толщины защитного покрытия ниже 100-130 мкм можно получить при применении технологии нанесения тонкослойного полимерного покрытия на основе композиции «полимаст». Технологию используют, когда необходимо получить слой цинка 15-25 мкм. Метод экологически безопасен. Покрытие беспористое, с высокой адгезией, защитная способность выше, чем у полученного гальваническим методом в 3-5 раз, и сопоставима со стойкостью горячецинкового покрытия. Эффект достигается благодаря тому, что атомы цинка при температурах свыше 2600 °С переходят в паровую фазу. Процесс проводят в замкнутом объеме муфелей или реторт, заполненных обрабатываемыми деталями и порошковой цинкосодержащей смесью.

Заключение

На продольной балке дорожного барьерного ограждения достижение защитного цинкового покрытия толщиной не менее 90-140 мкм в результате цинкования горячим методом обеспечивает надежную защиту основного металла, имеет гораздо большую прочность и успешно противостоит влиянию коррозии при длительной эксплуатации.

Нанесение тонкослойного полимерного покрытия элементов дорожного барьерного ограждения на основе композиции «полимаст». Сущность метода термодиффузионного цинкования состоит в образовании на поверхности металлоизделия за счёт проникновения атомов цинка в железную основу интерметаллида определённого фазового состава с высоким содержанием цинка.

Данный метод нанесения покрытий мостовых и дорожных ограждений увеличивает срок их службы более 50 лет, делает прочными и заметными для всех участников дорожного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы создания систем поддержки принятия решений в интересах комплексной транспортной безопасности / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, А. В. Губенко, А. М. Сазыкин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2015. – № 3(88). – С. 10-15.

2. Проблема инновационного развития систем обеспечения информационной безопасности в сфере транспорта / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, П. Д. Зегжда,

А. Ф. Супрун // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2017. – № 4. – С. 27-32.

3. Росдорзнак-Сервис: [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://rosdorznakservis.ru/stati/dorozhnye-ograzhdeniya-vidy-naznachenie-pravila-ustanovki/> (дата обращения 12.07.2023).

4. ГОСТ 26804–2012. Ограждения дорожные металлические барьерного типа. Технические условия: дата введения 2013-11-01. М.: Общероссийский классификатор стандартов, 2022.– 37 с.

5. Захарова, М.Н. Методические рекомендации по применению дорожных ограждений различного типа на автомобильных дорогах федерального значения: учебное пособие / М.Н. Захарова. – Москва: РОСАВТОДОР, 2018. – 34 с.

6. Линия для производства балок барьерного ограждения ProfileSteel [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://profilesteel.ru/catalog/oborudovanie-dlya-proizvodstva-balok-barernogo-ograzhdeniya/liniya-dlya-proizvodstva-balok-barernogo-ograzhdeniya/> (дата обращения 12.07.2023).

7. Производство дорожных ограждений: последовательность и особенности этого процесса [Электронный ресурс]. – ДорТехнологии. – 2023. – URL: <https://www.dortec.ru/statji/proizvodstvo-dorozhnyh-ograzhdeniy.html> (дата обращения 12.07.2023).

8. Производитель волнового ограждения: подробное объяснение процесса производства волнового ограждения [Электронный ресурс]. – China. – 2023. – URL: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/274506935> (дата обращения 12.07.2023).

Ши Шуаньюань, Д.Н. Шабалин, Юань Чжэньюэ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия, bravoshi@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Аннотация

В статье приведены исследования режимов резания и вычисления для определения оптимизация эффективности при токарной обработке на станках с ЧПУ. Построена необходимая функция, сделаны выводы.

Ключевые слова: режимы резания, оптимизация, эффективность.

Введение

При токарной обработке, как правило, технологический процесс изготовления деталей проектируется исходя из типа материала, режущего инструмента, опыта технолога. Поэтому не всегда возможно определить режимы резания. Таким образом, увеличивается стоимость и уменьшается эффективность. В настоящее время оптимизация режимов резания для сложных деталей является актуальной задачей. Необходимо снижать стоимость производства и повышать эффективность, в том числе при токарной обработке [1, 2].

Метод исследования

Для достижения оптимального результата необходимо построить функцию с определяющими коэффициентами. При этом вспомогательные параметры не сильно влияют, их можно пропустить при построении функции.

Таким образом, главными параметрами являются подача, скорость и глубина резания.

Как правило, при черновой обработке только один параметр оптимизирован. Например, подача или скорость резания. При чистовой обработке для повышения эффективности обычно одновременно оптимизируют 2 или 3 параметра вместе.

Необходимо построить функцию зависимости времени обработки от режимов резания. Тогда получается формула

$$T = G(v, f, a)$$

где v – скорость резания, f – подача, a – глубина резания.

Время обработки является параметром оптимизации. Режимы резания являются независимыми переменными. Таким образом, время обработки одной детали T_z будет следующим [3]:

$$T_z = T_p + T_l + T_c \frac{T_p}{T} + T_a \quad (1)$$

где T_p – время обработки резанием, T_l – время замена режущих инструментов, T_c – срок службы инструмента, T_a – вспомогательное время.

При известных параметрах заготовки при токарной обработке длина резания $L - L_0$ является длиной между начальной и конечной точкой. Внешний диаметр D и размер детали после обработки d также является подтверждающим параметром. Тогда

подача f , быстрая скорость подачи f_0 , средняя глубина резания a_p , скорость резания v являются целью оптимизации. С использованием этих параметров время резания одной детали получается по формуле:

$$T_p = [(L + L_0)D \pi d] / 1000 f \cdot v \cdot a_p \quad (2)$$

Время замена инструмента без резания определяется по формуле:

$$T_i = L_0 D / f_0 \cdot a_p \quad (3)$$

По теории инструментального резания срок службы режущих инструментов определяется по формуле:

$$T = C_0 / X_0 \sqrt[3]{v} \cdot Y_0 \sqrt[3]{f} \cdot Z_0 \sqrt[3]{a_p} \quad (4)$$

X_0 , Y_0 , Z_0 , C_0 являются постоянными. Они зависят от типа материала, и условиями резания, и т. д.

Используя формулы (2), (3), (4) в формуле (1), получаем общее время обработки одной детали.

$$T_z = \frac{C_0(L + L_0)D \pi d + 1000L_0 D \cdot v \cdot c + T_c(L + L_0)D \pi d \cdot X_0 \sqrt[3]{v} \cdot Y_0 \sqrt[3]{f} \cdot Z_0 \sqrt[3]{a_p}}{1000 f \cdot v \cdot a_p \cdot c_0} \quad (5)$$

Таким образом, T_z зависит от подачи, глубины резания и скорости резания в конкретной ситуации. При этом характеристики оборудования, шероховатость поверхности детали и другие факторы также влияют. Чтобы получить наименьшее время обработки, в формуле (1) надо найти производные для скорости резания, подачи и глубины резания. Используя теорему Лагранжа о среднем значении, можно получить результат с наименьшим временем обработки резанием.

Выбрано 2 типа станков.

1. Станок с ЧПУ Siemens, ось X мощность 2 КВт, ось Z мощность 3 КВт, мощность основного шпинделя 12 КВт, частота вращения шпинделя до 6000 об/мин.

2. Китайский станок с ЧПУ, тип: НМ-077, ось X мощность 1,6 КВт, ось Z мощность 3 КВт, мощность основного шпинделя 7,5 КВт, частота вращения шпинделя до 4000 об/мин.

В опытах материалами заготовок являются нержавеющая сталь, титановые сплавы, Сталь 45, медные и алюминиевые сплавы. Внешний диаметр заготовки 30 мм [4, 5].

Результаты и обсуждение

Результаты опытов, режимы резания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опытов

Материал	Станок	Черновая обработка			Чистовая обработка		
		Вращение шпинделя, об/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Вращение шпинделя, об/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм
Нержавеющая сталь	Siemens	600	0,2	0,75	800	0,1	0,1
	НМ-077	500	0,2	0,75	600	0,1	0,1
Титановый сплав	Siemens	500	0,2	0,5	600	0,12	0,1
	НМ-077	400	0,15	0,5	600	0,1	0,1
Сталь 45	Siemens	2000	0,25	1,2	2500	0,1	0,2
	НМ-077	1500	0,2	1	2000	0,1	0,1
Медь, алюминий	Siemens	2200	0,25	1,5	2500	0,15	0,1
	НМ-077	2000	0,25	1,5	2000	0,1	0,1

Оптимизированные режимы резания приведены в таблице 2. Видно, что здесь параметры обработки увеличиваются на 20-50 %. Это позволяет повысить производительность обработки. Данные результаты не являются идеальными, и в дальнейшем процесс нахождения более производительных режимов можно будет продолжить.

Таблица 2 – Режимы резания после оптимизации

Материал	Станок	Черновая обработка			Чистовая обработка		
		Вращение шпинделя, об/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Вращение шпинделя, об/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм
Нержавеющая сталь	Siemens	1000	0,25	0,75	1500	0,12	0,1
	НМ-077	800	0,2	0,75	1000	0,12	0,1
Титановый сплав	Siemens	600	0,2	0,6	1000	0,1	0,1
	НМ-077	500	0,15	0,8	700	0,15	0,15
Сталь 45	Siemens	2600	0,3	1,5	3000	0,1	0,2

Чтобы производство шло непрерывно и безопасно диапазон подач должен быть в пределах 0,2-0,5 мм/об. Таким образом стружка образуется равномерно и без переменной силы на инструмент. При этом стоимость снижается.

Заключение

В статье построена взаимосвязь между временем обработки и режимами резания. Проведена оптимизация. Для снижения стоимости одной детали оптимизация параметров является необходимой.

Такой способ является общей оптимизацией, но в реальном производстве нужно рассматривать реальные условия обработки, чтобы получить оптимальные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк, Д. П. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях / Д. П. Гасюк, В. А. Косова // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2022. – № 11. – С. 341-354.
2. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. А. Веселко, А. Ю. Пак // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 30-35.
3. Huran, L. Computer aided simulation machining programming in 5-axis nc milling of impeller leaf / L. Huran // Physics Procedia. – 2012.– Vol. 25 – P. 1457-1462. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.262
4. A novel approach to CNC machining center processing parameters optimization considering energy-saving and low-cost / Y. Xiao, Z. Jiang, Q. Gu, W. Yan, R. Wang. // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 59. – P. 535-548. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612521000789>
5. Сюпин Чжао. Исследование режимов резания на станках с ЧПУ. / Чжао Сюпин. – Шэньян: НИИХ Шэньянский технологический университет, 2006 – URL: https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=390f130954727615c72938bbf3be3a2a&site=xueshu_se.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 681.515.6

П.А. Барулин, В.А. Терешин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, Barulin.pa@mail.ru

УПРАВЛЯЕМАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ ПОСАДКА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ

Аннотация

Составлена математическая модель процесса торможения первой ступени ракеты, позволяющая в плоском варианте проследить ее траекторию и тяги двигателей до момента остановки. Сформирована система управления главным двигателем и двигателем холодного газа. Предложен метод расчета коэффициентов обратных связей при различных начальных условиях.

Ключевые слова: первая ступень ракеты, вертикальная посадка, система управления, тяга двигателей.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является изучение и использование космического пространства. Технология выведения спутника на орбиту предполагает последовательную отстыковку разгонных блоков, являющихся сложным, дорогостоящим оборудованием. В связи с этим все большую популярность приобретают многоразовые первые ступени ракет-носителей, которые после отстыковки самостоятельно возвращаются к месту старта или продолжают движение к точке посадки в соответствии с полетным заданием [1]. В обоих случаях должна решаться задача мягкого приземления первой ступени для ее сохранения и очередного использования без значительных затрат на ремонт.

Методы

Расчеты проводились в программной среде MATHCAD. Характеристики первой ступени и ее начальное положение приближены к реальным значениям Falcon 9 v1.0 [2]. Составленная расчетная схема представлена рисунке 1.

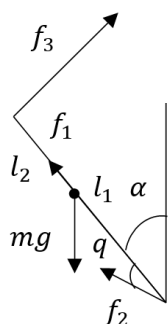


Рисунок 1– Плоская система сил, действующих на первую ступень

На рисунке 1 α – угол отклонения ступени от вертикали. Сила f_1 направлена вдоль тела и создается двигателями с постоянным направлением вектора тяги. Сила f_2 создается главным двигателем, сопло которого имеет возможность поворачиваться относительно ступени на угол q . Сила f_3 создается двигателями холодного газа, которые необходимы для корректировки наклона тела. В расчетах были приняты следующие значения параметров первой ступени: длина $l = l_1 + l_2 = 45$ м, где l_1 – расстояние от главного двигателя до центра тяжести; l_2 – расстояние от центра тяжести до двигателей холодного газа; $m = 3 \cdot 10^3$ кг, $J = 5 \cdot 10^6$ кг · м² – масса и момент инерции ступени соответственно. Для создания системы автоматического управления двигателями предложено применить ПД-регуляторы в цепях обратной связи по двум линейным и одной угловой координатам для формирования главного вектора с проекциями F_x , F_y и главного момента M_z движущих сил. Система уравнений (1) описывает основную идею, исследованную в данной статье. В уравнениях g – ускорение свободного падения.

$$\begin{cases} F_x = -m(k_{dx}\dot{x} + k_{px}x) \\ F_y = -m(k_{dy}\dot{y} + k_{py}y) + mg \\ M_z = -J(k_{d\alpha}\dot{\alpha} + k_{p\alpha}\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

Представление сил f_1 , f_2 , f_3 через F_x , F_y и M_z с учетом (1) по существу является формированием системы управления двигателями. Сформированная обратная связь будет приближать значения движущих сил к таким, при которых тело перейдет в необходимое положение [3]. Шесть коэффициентов обратных связей удобно определять по начальным условиям, исходя из требования отсутствия не только колебательных режимов, но и перерегулирования. Подставив (1) в уравнения движения, можно получить систему трех дифференциальных уравнений для определения функций $x(t)$, $y(t)$ и $\alpha(t)$, определяющих закон торможения первой ступени с выходом в заданную точку с требуемым наклоном. Далее несложно с учетом (1) получить зависимости сил тяги всех двигателей от времени. При известных ограничениях на развиваемые силы и продолжительность их работы удастся определить область начальных условий, при которых мягкая посадка возможна.

Чтобы добиться улучшения результатов необходимо получить более корректные коэффициенты обратных связей. Для получения коэффициентов аналитически, требуется разработать алгоритм их нахождения отталкиваясь от начальных условий.

Чтобы избежать перерегулирования коэффициенты обратных связей были определены из начальных условий.

$$\begin{cases} k_d = -\frac{2\delta}{1 + \sqrt{1 - \nu}} \cdot \frac{\dot{x}_0}{x_0} \\ k_p = \nu \frac{k_d^2}{4} \end{cases} \quad (2)$$

С учетом дополнительных условий (2), которые были учтены при выборе коэффициентов, управление является достаточно оптимальным.

Результаты и обсуждение

Значения проекций главного вектора движущих сил, указанных в тоннах и главного момента - в тонно-метрах, показаны на рисунке 2.

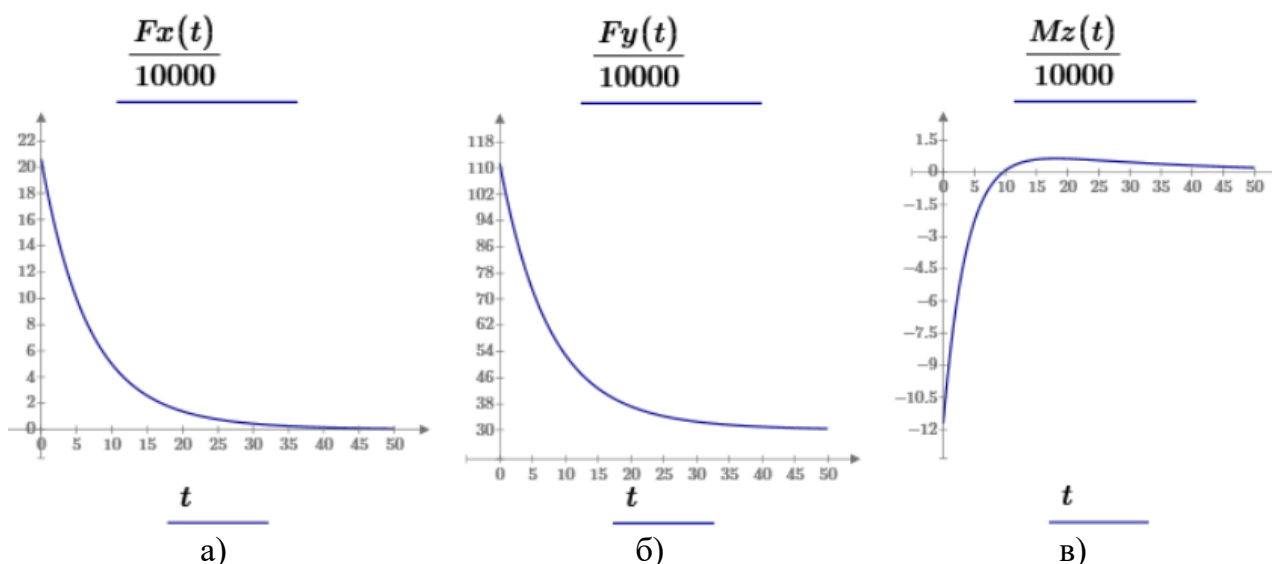


Рисунок 2 – Графики проекций главных векторов сил и главного момента:
а) проекция главного вектора сил на горизонтальную ось; б) проекция главного вектора сил на вертикальную ось; в) главный момент

Далее удобно ввести в рассмотрение проекции сил двигателей нижнего основания на направления вдоль тела f_l и перпендикулярно ему f_τ . На рисунке 3 проиллюстрированы зависимости приведенных движущих сил нижнего основания и двигателей холодного газа от времени.

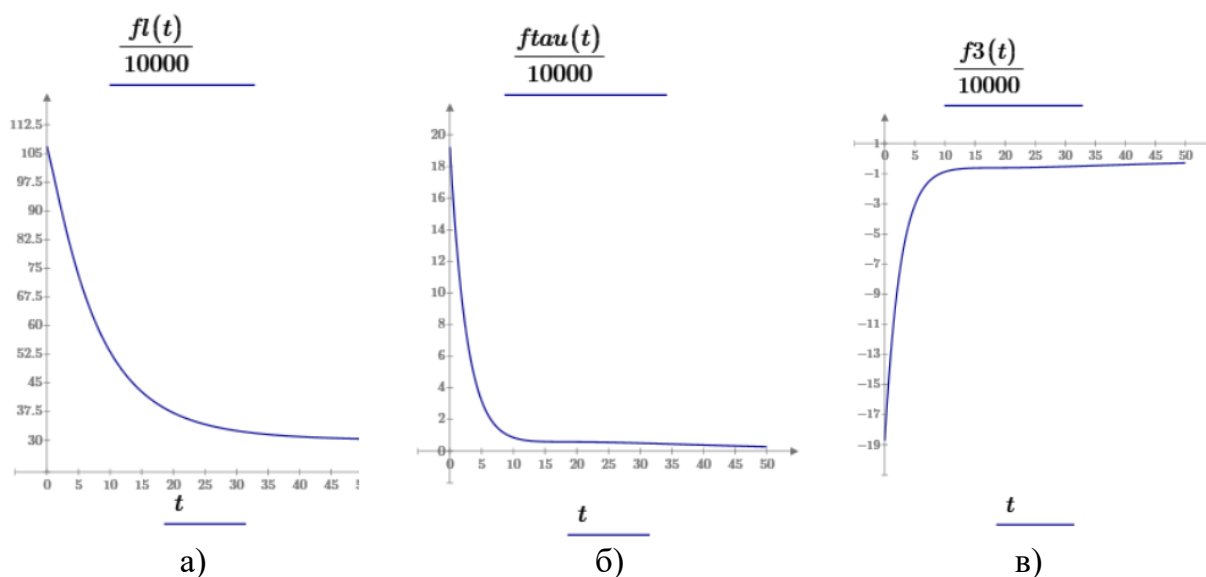


Рисунок 3– Графики изменения приведенных движущих сил:
а) сила, направленная вдоль тела; б) сила, направленная по нормали к телу; в) сила двигателей холодного газа

На рисунке 4 показаны графики изменения $f_2(t)$ и $q(t)$.

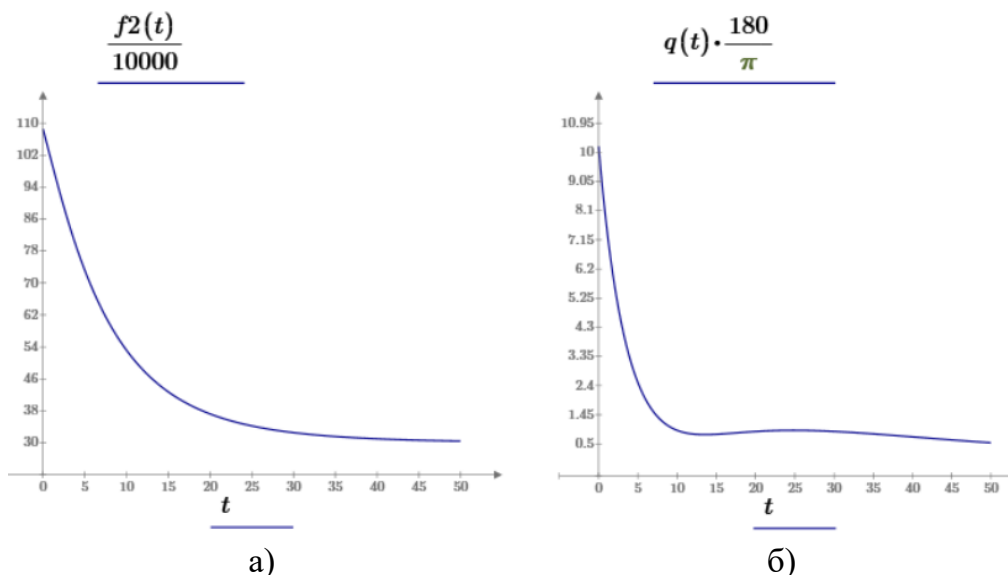


Рисунок 4— Графики изменения характеристик главного двигателя:
а) изменение тяги; б) изменение угла поворота

Заключение

В ходе работы была построена математическая модель, необходимая для формирования системы управления двигателями. Исследованы возможности управления двигателями по каналам обратной связи на основе ПД-регуляторов. Правильность выбора значений коэффициентов обратных связей достигалась разработанной методикой. Главным результатом работы является создание метода формирования законов управления двигателями на основе отрицательных обратных связей с предварительным расчетом главного вектора и главного момента движущих сил, которые обеспечивают плавную вертикальную посадку первой ступени ракеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель и метод оптимизации плана подготовки космических систем / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. Ю. Гарькушев, Д. С. Проценко // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2015. – № 4(89). – С. 34-39.
2. Falconuser'sguide [Электронный ресурс]. – 2021 – URL: <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf> (дата обращения 5.05.2023).
3. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие для вузов / А. А. Первозванский. – М.: Наука, 1986. – 613 с.

М.В. Дикун, К.В. Елисеев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, dikun.mv@edu.spbstu.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ ПОДЪЕМОВ ГРУЗОВ ПО ЛЕСТНИЦЕ

Аннотация

Для ручного транспортирования небольших грузов используются различные виды тележек, ориентированных в основном на перемещение по горизонтальной поверхности. Одновременно достаточно часто возникают задачи перемещения грузов по необорудованным лестницам. Существующие варианты конструкции обладают различными недостатками, которые желательно исключить. В работе представлена разработка ручной гибридной тележки для подъема грузов по лестнице: предложен вариант конструкции, проведены проверочные прочностные расчеты.

Ключевые слова: лестничная тележка, гусеничная тележка, проектирование, перемещение грузов, конструкции.

Введение

Классические колесные тележки помогают человеку перемещать грузы по горизонтальной поверхности или под наклоном, но при наличии бордюров или ступеней не совсем подходят для подобной транспортировки. Использование обычной тележки приводит к рывковому движению, когда колеса наезжают на очередную ступень. Удары передаются на груз, такое движение доставляет существенные неудобства оператору и требует дополнительных усилий.

Можно отметить два основных направления развития конструкций. Первое – добавление колес или рычагов с роликами с целью повышения плавности перемещения. Рывки полностью не исключаются. Второе – использование элементов, распределяющих взаимодействие с лестницей на несколько соседних ступеней за счет полозьев или гусениц. Конструкция усложняется, но движение становится плавным.

Отдельно существуют конструкции с встроенными электрическими двигателями.

Методы исследования

Проведенный анализ доступных конструкций позволил предложить вариант гибридной тележки. При движении по горизонтальной поверхности тележка перемещается на колесах, гусеничный механизм сложен. При движении по лестнице опирание происходит на гусеницы.

Для создания цифровой модели прототипа использовалась современная САПР программа «Creo Parametric» [1], проверка напряженного состояния отдельных частей проводилась в расчётной системе «ANSYSWorkbench» [2].

Сборка лестничной тележки с гусеничным механизмом включает несколько составных частей. Основная часть тележки состоит из основания (рамы), грузовой платформы, ручки, колес и гусеничного механизма. Последний состоит из “рельсов”, гусениц, основания гусениц, демпферов и раскладывающегося механизма. Сборка тележки с гусеничным механизмом представлена на рисунке 1.

Для проверки работоспособности спроектированной конструкции предлагается провести расчеты напряженно-деформированного состояния отдельных узлов с одновременным выбором подходящего материала.

Для финального варианта платформы выбран дюралюминий Д16. Основные характеристики сплава Д16: временное сопротивление $\sigma_b = 390$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 255$ МПа, относительное удлинение $\delta = 12\%$, модуль Юнга – 70,5 ГПа [3].

На рисунке 2 представлена геометрия и конечно-элементная сетка оптимизированной платформы. Размер элементов для платформы 5 мм, по толщине платформы 2 элемента.

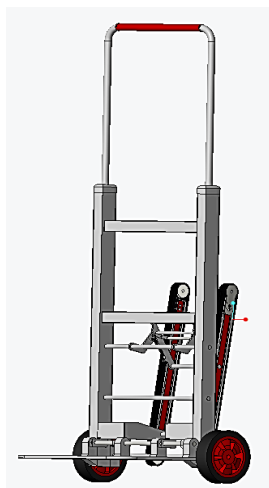
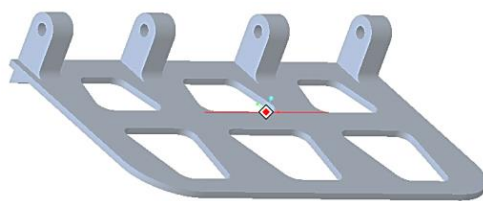
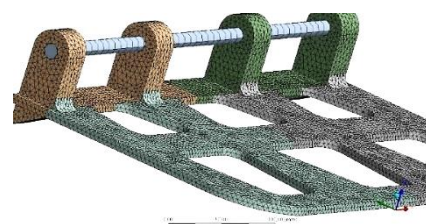


Рисунок 1 – Сборка лестничной тележки с гусеничным механизмом



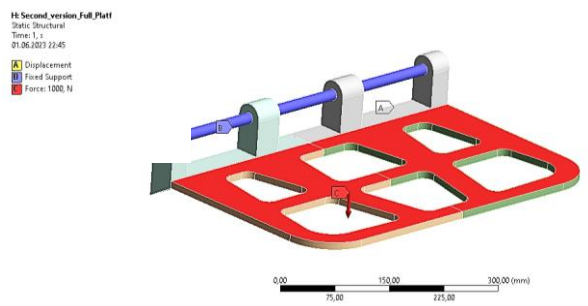
а)



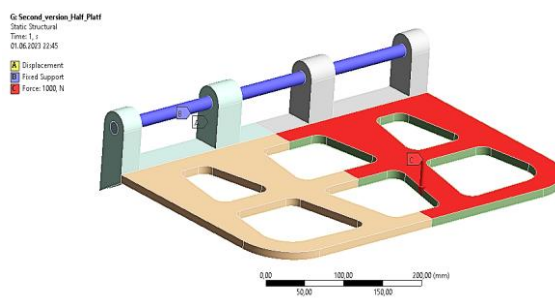
б)

Рисунок 2 – а) Геометрия платформы, б) конечно-элементная сетка

На рисунке 3 представлены варианты нагружения, когда груз 100 кг располагается на всей рабочей поверхности и на половине платформы.



а)



б)

Рисунок 3 – а) Варианты расположения груза на всей поверхности платформы, б) вариант расположения груза на половине платформы

Предполагается изготовить раму из алюминия АД35. Характеристики сплава АД35: временное сопротивление $\sigma_b=200$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}=100$ МПа, относительное удлинение $\delta=14\%$, модуль Юнга – 70 ГПа [4].

Для анализа принят угол наклона лестницы в 30° согласно ГОСТу [5], добавлена соответствующая локальная система координат. Тележка опирается гусеницами на ступени, человек удерживает конструкцию от скатывания. Для имитации опирания на

лестницу ограничены перемещения в месте крепления гусеничного механизма, в рукоятках запрещены перемещения вдоль пролета. Груз в 100 кг располагается по всей рабочей поверхности рамы, рисунок 4. Размер элемента верхней части рамы 10 мм, для нижних частей – 5 мм.

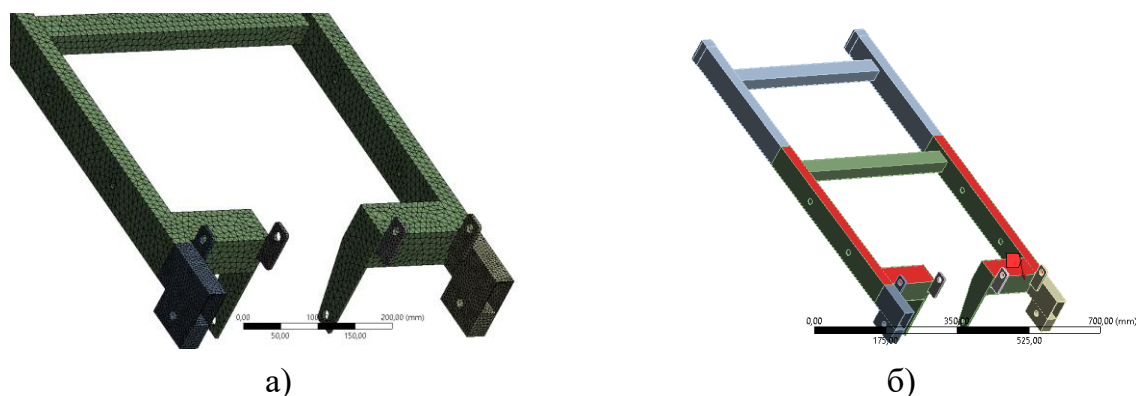


Рисунок 4 – а) Задание сетки методом Automatic, б) вариант нагружения для рамы

Для дальнейших расчетов добавлена модель (только геометрия) лестницы как абсолютно твердого тела. Высота и ширина ступенек — 150 и 300 мм соответственно. Ширина лестницы 720 мм. Сами резиновые гусеницы не будут учитываться в расчетах.

Были заданы граничные условия, ограничивающие перемещения параллельно плоскости лестницы в местах крепления рукояти к тележке. Также были заданы контактные пары для направляющих тележки с лестницей, а также направляющих с основной частью гусениц. Связи в шарнирных соединениях были заданы в самом механизме и штифтах, соединяющих механизм и платформу с рамой.

На рисунке 5 представлена модель тележки, расположенная на лестнице для дальнейших расчетов с вариантом приложения нагрузки в 100 кг.

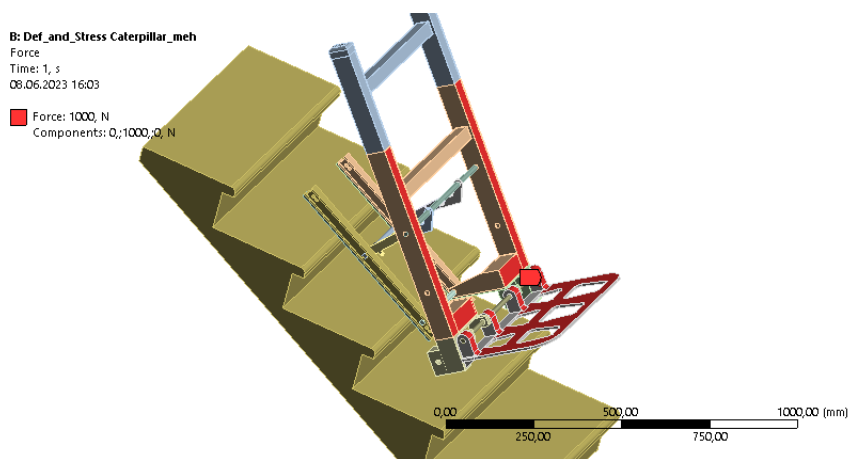


Рисунок 5 – Расчетная модель и вариант приложения нагрузки

Для механизма и направляющих были найдены деформации и напряжения, а также произведён статический расчет для груза в 100 кг.

Используемый материал — сталь 35Х. Характеристики сплава стали 35Х: временное сопротивление $\sigma_B=735$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}=910$ МПа, относительное удлинение $\delta=11\%$, модуль Юнга — 214 ГПа [6].

Конечно-элементная сетка, заданная методом MultiZone, представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – а) Конечно-элементная сетка для механизма, б) конечно-элементная сетка для направляющих

Результаты и обсуждение

Прогибы платформы невелики, максимальное значение 4 мм. На рисунке 7 представлены эквивалентные напряжения Мизеса, МПа в платформе для рассмотренных вариантов нагружения.

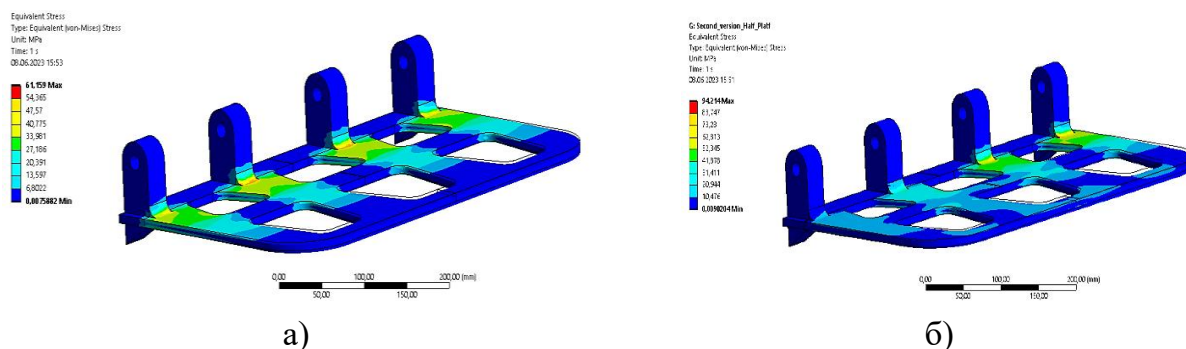


Рисунок 7 – а) Эквивалентные напряжения Мизеса (МПа), когда нагрузка распределена по всей рабочей поверхности, б) эквивалентные напряжения Мизеса (МПа) при нагрузке, заданной на половину платформы

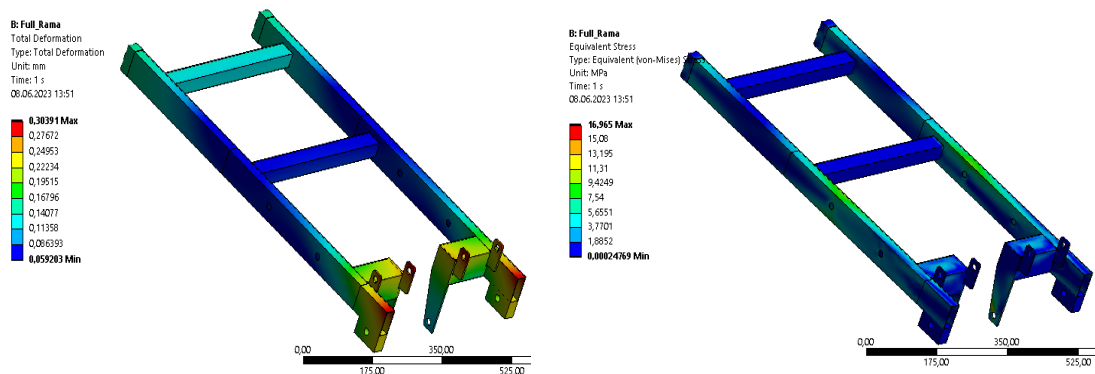
Наибольшее значение напряжения в платформе равно 94 МПа, что не превышает допустимого значения.

На рисунке 8 представлены перемещения и эквивалентные напряжения Мизеса, возникающие в раме.

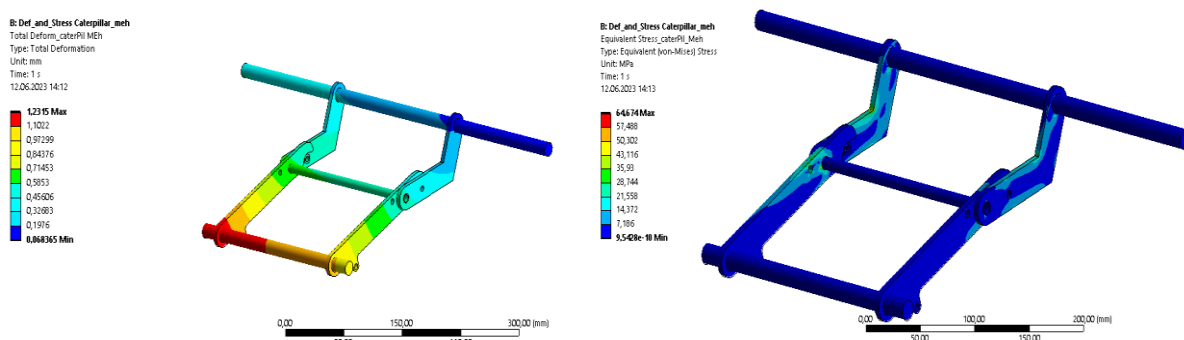
Наибольшее значение перемещений составило 0,304 мм. Наибольшие значения напряжений равно 16,96 МПа. Полученные напряжения не превышают допустимых.

Перемещения и эквивалентные напряжения Мизеса, возникающие в механизме представлены на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что наибольшие перемещения возникают в местах крепления механизма к основной части гусениц и составляет 1,23 мм. Наибольшие общие напряжения возникают в части механизма, расположенного ближе к раме, и составляют 64,67 МПа. Полученные напряжения не превышают допустимых значений.

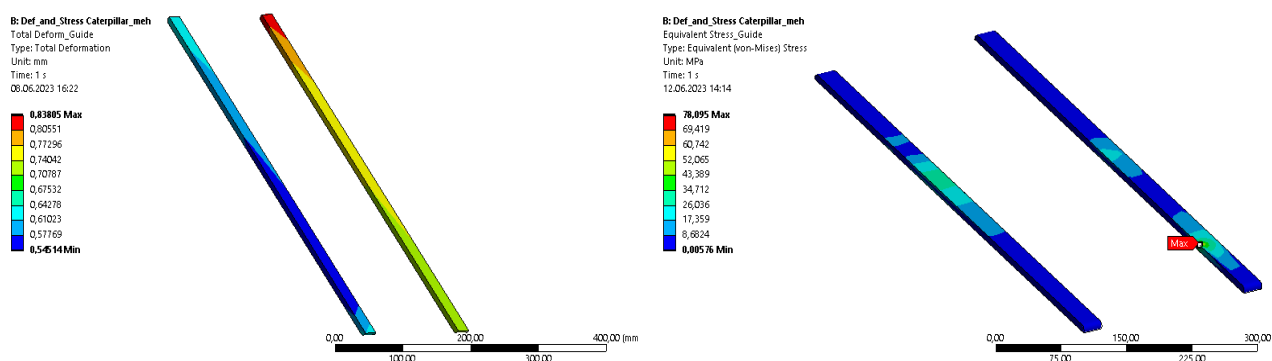


а)
Рисунок 8 – а) Перемещения (мм) рамы,
б) напряжения Мизеса (МПа), возникающие в раме



а)
Рисунок 9 – а) Перемещения (мм) в механизме,
б) напряжения Мизеса (МПа) в механизме

Полученные результаты перемещений и эквивалентные напряжения Мизеса, возникающие в направляющих представлены на рисунке 10.



а)
Рисунок 10 – а) Перемещения (мм) в направляющих,
б) напряжения Мизеса (МПа), возникающие в направляющих

Из рисунка 10 видно, что наибольшие перемещения составляют 0,8 мм. Наибольшие напряжения, возникающие в направляющих равны 78 МПа. Полученные напряжения не превышают допустимых.

Для оценки удобства использования тележки был выбран средний рост мужчины — 177 см. Из рисунка 11 видно, что при таком росте для перемещения тележки не

приходится сильно наклоняться, поэтому спина не будет быстро уставать. Так как передвижение тележки благодаря гусеницам по лестнице достаточно плавное, при подъёме не будет возникать рывковых движений, что значительно уменьшает риск получения травмы. Также для более безопасного спуска, предполагается установить тормоз по типу ободных тормозов, какие используются на велосипедных колесах.

Усилие, которое необходимо приложить для подъема тележки по лестнице, когда на тележке находится груз массой 100 кг, составляет 500Н. Этот результат получен исходя из условия равновесия тележки и был также получен как сила реакции в расчетной программе.

Исходя из вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что использование спроектированной гибридной гусеничной тележки при подъёме груза по лестнице достаточно удобно.



Рисунок 11 – Схематичное представление работы тележки на лестнице

Заключение

Спроектированная и представленная в данной работе конструкция гибридной тележки является удачной по результатам расчетов и оценке удобства использования. Наибольшие напряжения, возникающие в самых нагружаемых частях тележки, не превышают допустимые. Пользоваться спроектированной гусеничной тележкой при подъёме груза по лестнице, по предварительной оценке эксплуатации, достаточно удобно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CreoParametric [Электронный ресурс] – 2023 –URL: <https://www.ptc.com/en/products/creo/parametric>–(дата обращения 20.08.2023)
2. Елисеев К. В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах: учеб, пособие / К. В. Елисеев, Т. В. Зиновьева. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 112 с.
3. Шеметев Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение / Г. Ф. Шеметев. – СПб.: Изд-во «СПбПУ, 2012. – 155 с.
4. ГОСТ 4784–2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – М.: Стандартинформ, 2019. – 31 с.
5. ГОСТ 8717–2016 Ступени бетонные и железобетонные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 81 с.
6. Каталог резиновых гусениц Rubber-track [Электронный ресурс] – 2023 –URL: <https://rubber-track.ru/> — (дата обращения 02.06.2023).

М.В. Карташов, Н.Ю. Саввин
Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова,
Белгород, Россия, kartashov4321@mail.ru

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА АППАРАТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO UNO

Аннотация

В статье рассматривается создание системы регулирования скорости движения ленты конвейера, которая будет в зависимости от показаний на ультразвуковом датчике увеличивать или уменьшать напряжение на входе ПИД-регулятора, а также выводить показания напряжения на дисплей с помощью аппаратно-вычислительной платформы Arduino UNO, которая представляет ряд преимуществ [1]: кроссплатформенность – программное обеспечение для Arduino поможет работать с любыми операционными системами; низкая стоимость по сравнению с аналогами; простая в освоении среда программирования; расширяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом.

Ключевые слова: система управления, ленточный конвейер, физическая модель, регулирование скорости движения ленты, автоматизированный электропривод.

Введение

Измерение напряжения производится при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с разрешением 12 бит, что соответствует коду от 0 до 4096, полученное значение преобразуется в скорость при помощи коэффициента. Опорным напряжением в данном случае будет напряжение питания платы Arduino, главное, чтобы напряжение непосредственно на входе ЦАП не превышало напряжение питания +5 В.

Достоинства использования контроллера данного вида состоят в том, что на его базе можно создавать небольшие системы управления, предназначенные для лабораторного использования, либо для построения на его базе тренажера для какого-либо участка большого и сложного технологического процесса с минимальными финансовыми и временными затратами.

Методы

Разрабатываемая система управления электропроводом ленточного конвейера предназначена для учебных целей, выполнена в виде лабораторного стенда и реализует одноконтурную систему автоматического регулирования уровня насыпи на ленту с использованием программируемого контроллера Arduino UNO, Цифро-аналоговый преобразователь MCP4725, ультразвукового датчика уровня HC-SR04, ПЧ Optimus Drive серии 8000m [2], дисплей 16x2 и персонального компьютера (ПК), Асинхронный двигатель (АД) АИР 6А2 У2.

Структурная схема приведена на рисунке 1.

Основной задачей системы является регулирование с учетом возмущающего воздействия, которое вносится увеличением или уменьшением насыпи (шахтные конвейеры) на конвейерной ленте [3]. На микроконтроллере осуществляется алгоритм измерения уровня насыпи. Алгоритм обработки и выдачи управляющих сигналов с

цифрового датчика осуществляет цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Поскольку данная система не содержит начальных данных для выбора оптимального алгоритма для регулирования уровня, необходимо провести ряд экспериментов для оценки переходных процессов протекающих в системе для настройки ПИД-регулятора.

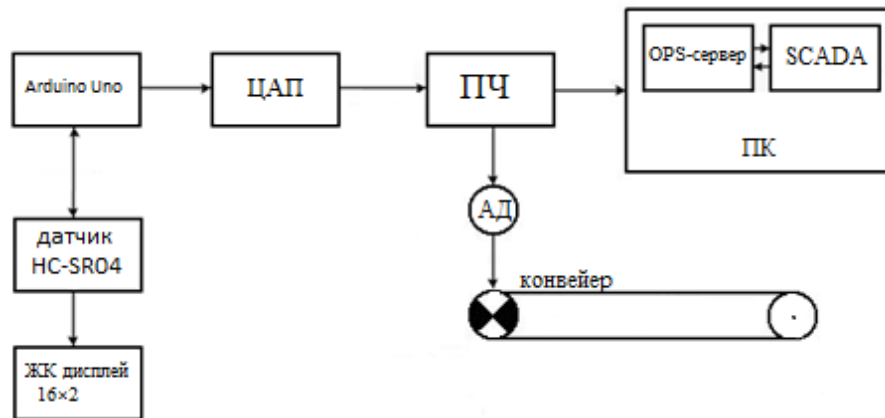


Рисунок1 – Структурная схема системы управления

Описаниеультразвуковогодатчика.

Для измерения расстояния до объекта использовался ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04 [4], изображенный на рисунке 2:

Принцип работы заключается в том, что сенсор излучает ультразвуковой импульс (в момент времени 0), который отражается от объекта и принимается сенсором. Расстояние рассчитывается исходя из времени до получения эха и скорости звука в воздухе. Сенсор получает сигнал эха и выдает расстояние, которое кодируется длительностью электрического сигнала на выходе датчика (Echo), следующий импульс может быть излучен, только после исчезновения эха от предыдущего. Это время называется периодом цикла и должно быть не менее 50 мс. Измеренное расстояние до объекта пропорционально ширине эха и может быть рассчитано по формуле:

$$dist = \frac{PulseWidth}{58}, \quad (1)$$

где *PulseWidth*– ширина эха.

Описаниецифро-аналогового преобразователя.

Цифровые значения, хранящиеся в микроконтроллерах, необходимо конвертировать в аналоговую форму, используется ЦАП, изображенный на рисунке 3.

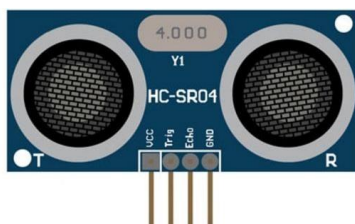


Рисунок 2 – Ультразвуковой дальномер. Рисунок 3 — Внешний вид ЦАП

Микросхема (IC) MCP4725 представляет собой 12-битный ЦАП [5] и используется для формирования аналогового сигнала в диапазоне от 0 до 5V. Взаимодействие с MCP4725 осуществляется по протоколу I2C.

Также микросхема MCP4725 имеет в своем составе энергонезависимую память EEPROM.

ЦАП MCP4725 имеет разрешение 12 бит, то есть он может оперировать со значениями от 0 до 4096. С помощью этих значений на его выходе можно формировать аналоговое напряжение по отношению к опорному напряжению. Максимальное опорное напряжение для него составляет 5V.

Формула для расчета напряжения на его выходе выглядит следующим образом:

$$Voltage = \frac{ReferenceVoltage}{Resolution} \cdot DigitalValue, \quad (2)$$

где Reference Voltage – опорное напряжение, Resolution – разрешающая способность ЦАП, Digital Value – цифровое значение.

Результаты и обсуждение

Ниже приведен код программы, написанной на языке программирования платформы «Arduino», который в свою очередь основан на C++, реализован элемент управления конвейером, позволяющий осуществлять регулирование конвейера. Схема внешних соединений изображена на рисунке 4. Алгоритм программы изображен на рисунке 5.

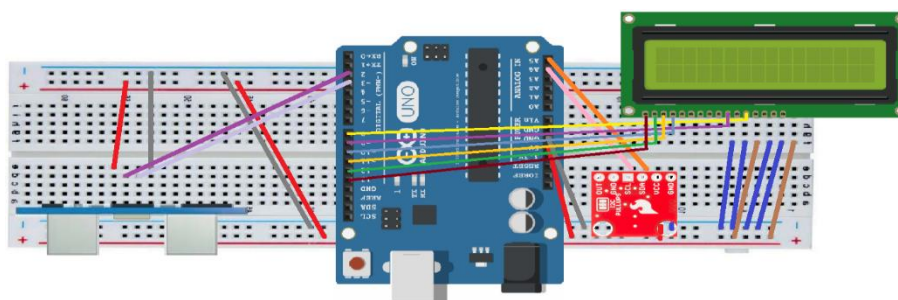


Рисунок 4 — Схема внешних соединений системы автоматического управления.

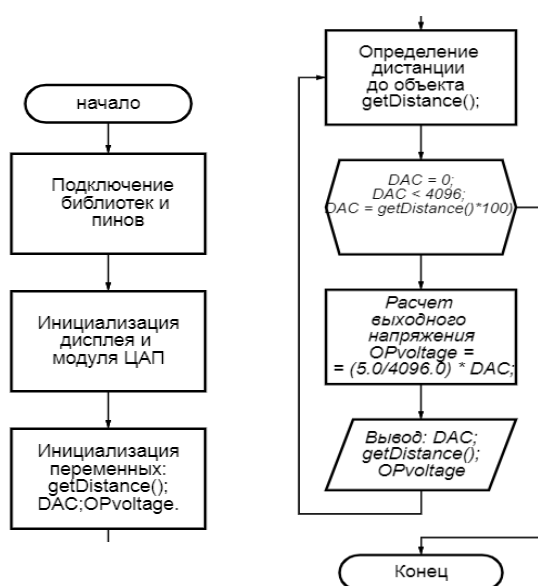


Рисунок 5 –
Алгоритм
работы
программы

Листинг программы

```
#include<LiquidCrystal.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
constexpr uint8_t PIN_RS = 8;
constexpr uint8_t PIN_EN = 9;
constexpr uint8_t PIN_DB4 = 10;
constexpr uint8_t PIN_DB5 = 11;
constexpr uint8_t PIN_DB6 = 12;
constexpr uint8_t PIN_DB7 = 13;
Adafruit_MCP4725 MCP4725;
const int trigPin = 2;
const int echoPin = 3;
LiquidCrystal lcd(PIN_RS, PIN_EN,
PIN_DB4, PIN_DB5, PIN_DB6,
PIN_DB7);
void setup()
{
  Wire.begin();
  lcd.begin(16, 2);
  MCP4725.begin(0x60);
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  uint32_t DAC;
  float OPvoltage;
  for (DAC = 0; DAC < 4096; DAC =
getDistance()*100)
  {
    delay(200);
    OPvoltage = (5.0/4096.0) * DAC;
    MCP4725.setVoltage(DAC, false);
    /* Send data to serial port */
    Serial.print("V:");
    Serial.print(OPvoltage);

    Serial.print("Distance: ");
    Serial.print(getDistance());
    Serial.print("\t");
    Serial.print("DAC: ");
    Serial.println(DAC);
    /* Write data in display */
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Distance:");
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print("V:");
    lcd.print(OPvoltage);
    lcd.setCursor(10, 1);
    lcd.print(getDistance());
    lcd.print("cm");
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("DAC: ");
    lcd.print(DAC);
    lcd.print(" ");
    delay(200);
  }
}
uint32_t getDistance()
{
  return getEchoTiming() * 1.71 * 0.01;
}
longgetEchoTiming()
{
  {
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    long duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    returnduration;
    delay(100);
  }
}
```

Заключение

Разработана физическая модель системы управления ленточного конвейера, предназначена для учебных целей, выполнена в виде лабораторного стенда. Выявлены преимущества модернизированного ленточного конвейера с применением перспективных технических средств по сравнению с традиционными ленточными конвейерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт компании Arduino: Arduino Uno [Электронный ресурс]. – URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>. (дата обращения: 26.03.23).
2. OptimusDrive: Преобразователи частоты серии 8000M [Электронный ресурс]. – URL: <https://optimusdrive.ru/catalog/preobrazovateli-chastoty/saj/seriya-8000m/>. (дата обращения: 26.03.23).
3. Терехов, В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Учебник для вузов. / В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980.
4. Датчики и модули Arduino: Ультразвуковой датчик расстояния Ардуино HC-SR04 [Электронный ресурс]. – URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04/>. (дата обращения: 26.03.23).
5. Конверторы сигналов: MCP4725 Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) [Электронный ресурс]. URL: https://avrobot.ru/product_info.php?products_id=2965. (дата обращения: 26.03.23).

РЕГИСТРАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ФАЗ В ПЛАВЯЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

Аннотация

В статье описываются результаты комплексных исследований, направленных на измерение и моделирование температурных полей на границах фаз в сложных плавящихся и термореагирующих порошковых смесях. Приведены результаты решения нестационарной задачи теплопроводности в выбранной модели композиционных контактных материалов. Разработанные методы комплексной регистрации температуры позволяют определять температуры плавления наплавочной шихты и ее отдельных компонентов, а также температуры поверхности детали.

Ключевые слова: температурные поля, порошковые смеси, упрочнение деталей.

Введение

Современные исследования многокомпонентных порошковых смесей, при нагревании которых происходит плавление отдельных компонентов, образование сплавов и покрытий, химические реакции и синтез новых веществ, невозможны без знания величин температуры и ее распределения на границах фаз. Такая информация необходима для управления процессами индукционной наплавки (ИН), сварки, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и многими другими технологиями [1].

Среди различных методов обработки поверхности и нанесения покрытий можно выделить процесс борирования. Данный процесс может обеспечить защиту различных поверхностей для деталей, изготовленных из различных сплавов черных металлов [2]. В качестве перспективного материала для защитно-упрочняющих покрытий предлагаются матричные композиты на основе тройной системы Fe-B-Fe₃B.

Упрочненные таким образом стальные детали имеют хорошие трибологические свойства, включая устойчивость к абразивному, адгезионному, усталостному и коррозионному износу.

Одним из основных преимуществ такого типа упрочнения является то, что упрочненные боридными покрытиями стали имеют чрезвычайно высокие значения твердости (между 1600 и 2000 HV) [3].

Борирование в классическом понимании представляет собой процесс химико-термической обработки, диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов бором при нагреве и выдержке в химически активной среде. Это достаточно распространенный способ обработки стали и производных материалов. Зачастую поверхность, подвергнутая насыщению, получается двухфазной: область смеси боридов FeB, Fe₂B и переходная область, состоящая из твердого раствора бора в сочетании с другими элементами, содержащимися в стали в α -Fe. При детальном анализе выявлено, что внутренняя структура слоя подобных покрытий представляет собой иглы боридов, сросшиеся у основания. При этом подобная структура покрытия

имеет существенные внутренние напряжения, которые значительно снижают их прочностные характеристики настолько, что относительно небольшие ударные, изгибающие или сжимающие нагрузки способны привести к отслаиванию или скалыванию данных покрытий. Знакопеременные нагрузки и вибрации усугубляют данные разрушающие покрытие процессы. Ввиду указанных обстоятельств, метод изотермического процесса нанесения упрочняющих составов на основе бора на стальные детали, имеет существенные ограничения в применении для массового использования на производстве и в машиностроении.

В противовес классическому подходу, проведение борирования с применением индукционного (ТВЧ) нагрева, несет в себе ряд преимуществ, которые необходимо отметить. В частности, за счёт роста скорости нагрева в десятки раз увеличивается скорость протекания процесса образования покрытий. Также, сокращение времени борирования вкупе с применением специализированных флюсов нивелирует необходимость создания защитной газовой среды. Малые временные затраты при индукционном нагреве приводят к сокращению воздействия на материал высоких температур, а также открывает перспективы для совмещения процесса борирования с последующей термической обработкой. Указанная совокупность обстоятельств позволяет рассматривать методику борирования с использованием индукционного нагрева в качестве перспективного подхода к созданию упрочняющих покрытий в рамках конвейерных технологических линий в массовом производстве, а также при больших объемах создания деталей за рабочую смену.

Важной составляющей процесса упрочнения деталей методом индукционной наплавки является нагрев частиц твердого сплава и флюса в наплавочной шихте. В то же время регистрация с приемлемой точностью температуры в процессе ИН имеет определенные технические и методические трудности. Во-первых, толщина покрытий, формируемых методом ИН, колеблется в пределах 1-3 мм, поэтому использование для этого обыкновенных промышленных и исследовательских термопар становится невозможным. Во-вторых, в процессе индукционного нагрева поверхность основного металла излучает большее количество энергии (как в виде теплоты, так и лучистым способом) чем формируемое покрытие, поэтому пирометрический метод регистрации температуры также неэффективен и отражает только тепловое состояние поверхности металлической основы. В-третьих, из-за исходной и постоянно изменяющейся в процессе ИН пористости наплавляемого материала, представляющего собой многокомпонентную гетерогенную смесь, все известные контактные термометрические методы дают заведомо невоспроизводимые результаты.

Еще более трудной задачей является экспериментальное исследование нестационарного поля температур при получении методом СВС композиционных контактных материалов (ККМ), когда размеры исследуемого объекта также много меньше размеров стандартных датчиков температуры.

Решение обозначенных проблем может быть достигнуто несколькими независимыми путями:

- минимизацией первичного датчика, чувствительного к температуре покрытия, металлической основы, шихты и ее отдельных компонентов;
- использованием термозависимых процессов в материалах (как уже имеющих в системе, так и вносимых извне) для однозначной, достоверной и воспроизводимой регистрации достигнутой в системе температуры;
- применением методов численного моделирования для определения возможных механизмов СВС-предреакционного характера в месте поверхностей раздела фаз.

Целью настоящей работы являлась разработка комплексных методов регистрации и моделирования температуры на фазовых границах в нагреваемой смеси порошков металлов при ее плавлении и химическом взаимодействии между компонентами.

Методы

В целях повышения эффективности средств производства при осуществлении процессов диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов бором, нами, на основе анализа опубликованных исследований, был предложен комплекс мер, включающий в себя нагрев стали подвергаемой упрочнению борированием и насыщающей среды высокочастотными токами (ТВЧ), сочетание технологических этапов диффузионного борирования жидкой и твердой сред, а также перевод диффузионного процесса борирования в химическое взаимодействие между элементами Fe и В, осуществляемое на поверхности исследуемых материалов.

Основой для данной линии рассуждений при изучении нового подхода к диффузионному насыщению поверхности металлов и сплавов бором при осуществлении контролируемой топохимической реакции $Fe + B$, послужило исследование, в котором был предложен метод дифференциального термического анализа (ДТА). Авторы работы [4] показали, как химическое взаимодействие в инертной, разреженной атмосфере между железом (его оксидами, присутствующими на поверхности стали) и бором, которое приводит к возникновению боридов железа, начинается при температурах около 500-700 °С и заканчивается образованием боридов d-металлов.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы шихты для ИН следующего состава, мас. %: твердый сплав – 85, плавный флюс – 15. Материал твердого сплава – порошки ПГ-УС27 и ПС-14-60 (0,5-1,5 мм), флюсы – промышленные составы марок АСМ (г. Рубцовск), ЦСМ (г. Астана), ЗОР (г. Одесса).

Для изготовления микротермопар использовали хромелевую и алюмелевую проволоку 0,2 мм (ГОСТ 1790-77 [5]), помещенную в стекловолоконную изоляцию. Спаи изготавливали сплавлением проволок конденсаторной сваркой на постоянном токе угольным электродом.

Для изготовления термоиндикаторных составов были использованы порошки никеля марки ПНЭ, алюминия марки АСД-1 и титана марки ПТК.

Для моделирования тепловых полей в СВС-реагирующей системе ККМ осуществляли решение нестационарного уравнения теплопроводности численными методами.

Результаты и обсуждение

Температура отдельных компонентов наплавочной шихты, поверхности основного металла и поверхности расплава на границе твердый сплав-воздух может быть измерена с приемлемой точностью (до 3-5 %) с помощью микротермопар, при условии, что размер их спаи будет составлять от 0,1 до 0,3 характеристического размера исследуемого структурного элемента. Для этого были подготовлены и откалиброваны хромель-алюмелевые микротермопары (МТП).

В первой части исследования - для измерения температуры порошковых материалов, в том числе и твердого сплава для ИН, рабочий спай термопары приваривался под микроскопом (МБС-10) к отдельной частице порошка, в которой измеряли температуру нагрева.

На рисунке 1 показаны фотографии частиц твердого сплава с прикрепленными к ним термоэлектродами, приваренными к одной и двум плоскостям частицы

Предлагаемый метод обеспечивает измерение температуры нагрева твердого сплава с учетом основных требований, предъявляемых контактными датчиками температуры.

Были измерены температуры нагрева твердого сплава на границах шихта-основной металл и шихта-воздух. Полученные результаты достаточно достоверны, так как форма и химический состав рабочего слоя не отличаются от формы и химического состава отдельных частиц нагреваемого порошкового материала.

На рисунке 2 приведены, зафиксированные самопишущим прибором, характерные кривые нагрева поверхности расплава (1) и наплавочной шихты (2).

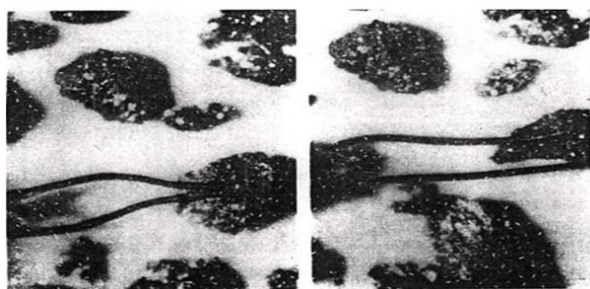


Рисунок 1 – Схема крепления термоэлектродов к одной (слева) и двум (справа) плоскостям частицы (x20)

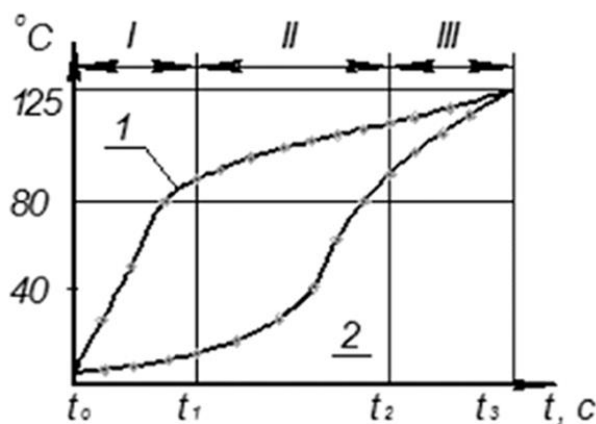


Рисунок 2 – Обобщенные графики нагрева наплавочной шихты на границах: основной металл-шихта (1) и шихта-воздух (2)

Проведенные эксперименты показали, что по мере увеличения размеров частиц твердого сплава уменьшается глубина проплавления основного металла при неизменных режимах наплавки. При наплавке шихты с размером частиц твердого сплава 0,5-1,2 мм глубина проплавления была 0,40-0,50 мм. При наплавке частиц 2,0-3,0 мм проплавление основного металла составило 0,30-0,35 мм, объясняется это тем, что в больших частицах индуцируется ток и нагревает их. Поэтому особенно при увеличении толщины наплавленного слоя целесообразно увеличивать гранулы твердого сплава

Также было установлено, что интенсивность нагрева твердого сплава в наплавочной шихте снижается по мере уменьшения его фракции. Посредством МТП температуру нагрева наплавочной шихты удастся измерить по высоте ее насыпки практически в любой точке, в том числе на её поверхности (граница шихта-воздух и при контакте с деталью, граница шихта-деталь).

Однако на практике также необходимо контролировать и температуру нагрева поверхности детали в процессе ИН. Традиционные способы регистрации температуры (термопара, пирометр) не нашли применения в производстве по причине сложного аппаратного оформления в первом случае, а во втором - большой погрешности при измерениях.

В ходе исследования были проведены измерения температуры нагреваемой токами высокой частоты поверхности детали с использованием двух типов

термоиндикаторов (ТИ): термитных смесей, а также смесей порошков титана, никеля и алюминия, которые реагируют между собой по реакции СВС.

СВС-процесс в исследованных смесях металлов хорошо заметен визуально (рисунок 3), так как наблюдается мгновенный разогрев и возгорание всего образца ТИ.

Для тарирования исследованных Ni-Al и Ni-Ti ТИ была использована вольфрам-рениевая МТП диаметром 0,2 мм, которая с помощью конденсаторной сварки приваривалась к металлической пластине, а в непосредственной близости с МТП устанавливалась таблетка ТИ и затем образец нагревался в индукторе. На температурной кривой нагрева ТИ хорошо виден характерный температурный всплеск, при воспламенении порошковой смеси, отвечающий протеканию в ней СВС в режиме теплового взрыва. Общая погрешность измерения температуры при таком аппаратном оформлении метода с использованием программно-аппаратного комплекса не превышала 3,5-4,5 %.

Таким образом, разработанные методы комплексной регистрации температуры в процессе индукционной наплавки позволяют определять температуры плавления наплавочной шихты и ее отдельных компонентов, поверхности детали, исследовать особенности тепловых процессов при ИН и позволяют, в процессе перемещения детали в ВЧ- индукторе, определять температурные поля на упрочняемой поверхности, а также оперативно корректировать режимы работы ВЧ- генератора.

Для второй части исследования – численного моделирования и решения нестационарной задачи теплопроводности в выбранной модели ККМ (рис. 4) принимались некоторые допущения:

- процессы при спекании в каждой ячейке развиваются подобно; -объемная электрическая мощность не меняется за время синтеза ККМ;
- температура изменяется в интервале 20-1500°C;
- боковые потери реализуются за счет конвективного обмена.



Рисунок 3 – Воспламенение Ni-Al термоиндикатора

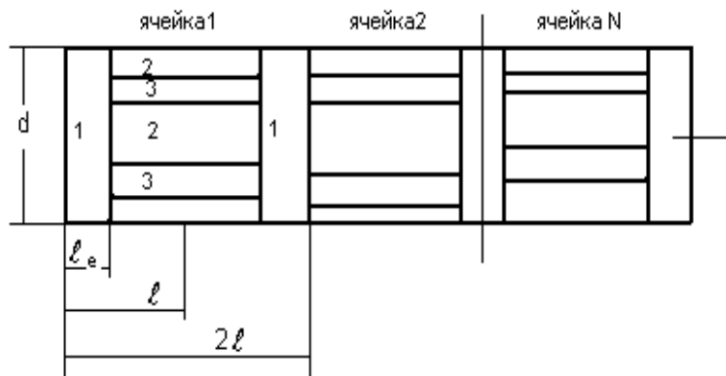


Рисунок 4 – Схема расчетного участка структуры ККМ: 1 – волокна меди, 2 – порошковая смесь Ni+Al, 3 – нагреватель (частицы порошка Al)

С учетом этих допущений постановка задачи сводится к решению известного нестационарного уравнения теплопроводности:

$$\frac{d}{dx} \left(K_{xx} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_{yy} \cdot \frac{d\varphi}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_{zz} \cdot \frac{d\varphi}{dz} \right) = \lambda \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

со следующими граничными условиями:

$$\varphi = \varphi_b \text{ на } S_1$$

$$K_{xx} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \cdot l_x + K_{yy} \cdot \frac{d\varphi}{dy} \cdot l_y + K_{zz} \cdot \frac{d\varphi}{dz} \cdot l_z + q + h(\varphi_1 - \varphi_\infty) = 0 \quad (2)$$

на S_2 , где K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты теплопроводности, λ – некоторый параметр материала или комбинация таких параметров, φ – интерполяционный полином, описывающий распространение тепла в решении задачи численного моделирования, S_2 – боковая поверхность ячейки ККМ.

На рисунке 5 представлены профили температуры по оси ячейки ККМ, видно, что температурный профиль имеет максимум в месте стыка медное волокно-порошковая смесь, плато в порошковой смеси до момента $t=6,0$ с и второй максимум, расположенный в центре порошковой заготовки ~ через 8,0 с нагрева.

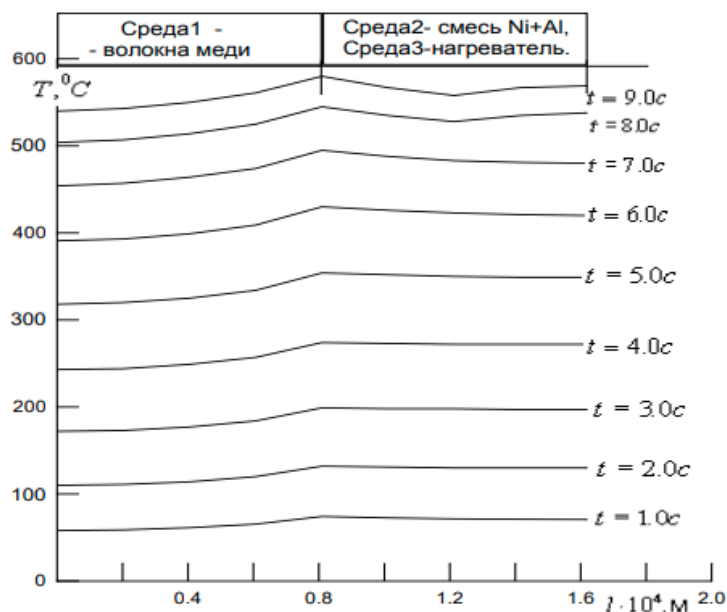


Рисунок 5 – Профиль температуры по оси ячейки ККМ (через 1 секунду СВС)

Заключение

1. Разработаны комплексные методы регистрации температуры в процессе индукционной наплавки, основанные на использовании микротермопар и СВС термоиндикаторов.

2. При регистрации температуры микротермопарным методом, удастся зафиксировать температуры плавления отдельных компонентов шихты и температуру на границах раздела фаз.

3. При регистрации температуры термоиндикаторным методом погрешности не превысили 4,5 %.

4. Проведен расчет температурного поля в предреакционный период при электросинтезе ККМ с учетом контактных явлений.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития Алтайского государственного университета на 2021-2030 годы в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», проект «Аппаратно-программный комплекс для исследования металлических изделий и деталей вихретоковым и лазерно-акустическим методом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Medvedovski, E. Boride-based coatings for protection of cast iron against wear / E. Medvedovski, J. Jiang // *Adv. Appl. Ceram.* – 2016. – V. 115 (8). – P. 483–489.
2. Sen, U. Tribological properties of oxidised boride coatings grown on AISI 4140 steel / U. Sen, C. Bindal // *Mater Lett.* – 2006. – V. 60. – P. 3481-3492.
3. Cárdenas, E E. Characterization and wear performance of boride phases over tool steel substrates / E. E. Cárdenas, R. Lewis // *Adv. Mech. Eng.* – 2016. – V. 8. – P. 1-12.
4. Исследование процессов упрочнения стальных деталей методом индукционной наплавки / В. Н. Маликов, А. В. Ишков, С. А. Войнаш [и др.] // *Металлург.* – 2021. – № 11. – С. 69-75.
5. ГОСТ 1790-77. Государственный стандарт Союза ССР. Проволока из сплавов хромель т, алюмель, копель и константан для термоэлектродов термоэлектрических преобразователей (утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 13.01.77 № 101) // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.* 2023.

В.А. Максимов, А.Ю. Скрыбнев, Д.С. Ситкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, maksimov5.va@edu.spbstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КРОНШТЕЙНА КРЕПЛЕНИЕ ПРИВОДА

Аннотация

В работе рассмотрено применение современных компьютерных технологий при проектировании кронштейна крепления привода к двигателю и несущей конструкции. В результате проделанной работы, разработан прототип кронштейна крепления болида класса «Формула Студент».

Ключевые слова: прочностной расчет, AnsysWorkbench, метод конечных элементов.

Введение

В настоящее время научный прогресс не стоит на месте и постоянно происходит развитие в различных отраслях промышленности. Машиностроение не стало исключением [1-3]. Все передовые разработки в данной области возникают в исключительно конкурентной среде. Для автомобилестроения такой средой является инженерный автоспорт и вершиной этой среды является «Формула 1». Также для студентов есть свой аналог, который не уступает главной гоночной авто серии – «Формула Студент».

При разработке болида крайне важно уделить внимание не только разработке силовой установки (при наличии ее оптимизации), но и разработке привода. Ведь именно благодаря силовой передаче происходит перенос крутящего момента двигателя на колеса, что в свою очередь уже напрямую влияет на возможность болида двигаться даже с минимальной скоростью. Эффективность передачи крутящего момента определяется качественной разработкой с использованием современных программных пакетов, которые позволяют упростить множество расчетов и предоставляют реалистичные данные.

Для объективной оценки важности грамотного проектирования достаточно осознавать смысл следующей фразы: «Ошибка на этапе проектировки не стоит ничего, ошибка на этапе производства стоит всего».

На текущий момент команды класса «Формула Студент» используют следующие программные пакеты для реализации расчетов и создания моделей/прототипов: Autodesk Inventor, Solidworks, Ansys, MathCad, Optimum Kinematics, Altair Inspire, Matlab/Simulink.

По завершении сезона у болида класса «Формула Студент» была выявлена проблема недостаточной прочности силовой передачи, следствием которой явилась внутренняя поломка последней (трипоид внутреннего шарнира равных угловых скоростей). В связи с этим возникла следующая задача: спроектировать кронштейн крепления дифференциала к двигателю и несущей конструкции с учетом расчета оптимального межосевого расстояния.

Методы

Для решения поставленной задачи использовались следующие программы: Mathcad; Autodesk Inventor; AnsysWorkbench. Помимо вышеперечисленных программ использовалась учебно – методическая литература [4-6], были использованы формулы для вычисления следующих величин: межосевого расстояния между ведущей и ведомой звездой с учетом провисания цепи; силы, действующей в ведущей ветви цепи в процессе стационарной работы; приближенной нагрузки на вал:

$$a = 0,997 \frac{P}{4} \left[L - \frac{Z_1 + Z_2}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right)^2 - 8 \left(\frac{Z_2 - Z_1}{2\pi} \right)^2} \right] \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{2000T}{d} + k_f m g a + m v^2 \quad (2)$$

$$F_B = k_B \frac{2000T}{d}, \quad (3)$$

где a – межосевое расстояние между ведущей и ведомой звездой с учетом провисания цепи (мм); P – шаг цепи (мм); L – число звеньев в цепи; Z_1 и Z_2 – число зубьев ведущей и ведомой звезды; F_1 – сила, действующая в ведущей ветви цепи в процессе стационарной работы (Н); T – крутящий момент с двигателя приходящий на ведущую звезду (Н·м); d – делительный диаметр ведущей звезды (мм); m – масса одного метра цепи (кг); g – ускорение свободного падения (м/с²); v – скорость движения цепи (м/с); k_f – коэффициент, зависящий от стрелы провисания и расположения передачи; F_B – приближенная нагрузка на вал (Н); k_B – коэффициент нагрузки вала.

Результаты и обсуждение

В процессе проектирования были выполнены расчеты геометрии изделия. Расчеты производились с использованием математического пакета Mathcad. Далее была разработана трехмерная модель кронштейна с назначением материала.

На следующем шаге в процессе разработки кронштейна крепления модель была загружена в AnsysWorkbench модуль StaticStructural для симуляции нагружения в процессе эксплуатации [7, 8]. На первом этапе симуляции была импортирована геометрия модели с указанием материала и построена, конечно-элементная, сетка. Результат построения продемонстрирован на рисунке 1.

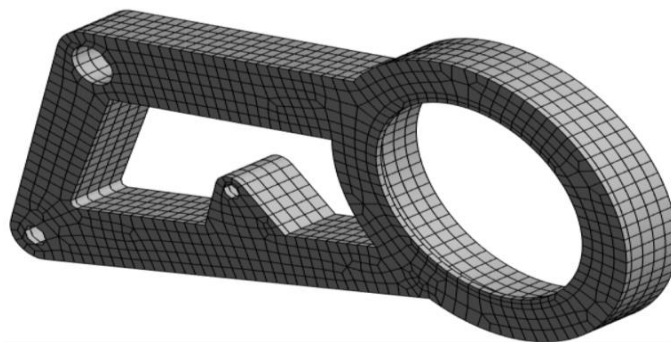


Рисунок 1 – Конечно-элементная сетка модели

В ходе реализации расчетов в Ansys Workbench модуле Static Structural нагрузка была приложена к большему диаметру (с местом под установку подшипника), сама модель закреплена жестко по отверстиям в левой части рисунка 1. После проведения

расчетов получены следующие результаты: максимальное эквивалентное напряжение составило 111,48 МПа; максимальные суммарные перемещения на участках наиболее подверженных нагрузкам составили 0,36 мм; минимальный коэффициент запаса модели составил 1,13. Полученные показатели не соответствуют допустимым.

На основе полученных результатов были сделаны следующие выводы относительно текущей конструкции изделия. Толщина участка с местом под установку подшипника оказалось недостаточной. Для устранения этого недостатка была увеличена толщина стенки ответственного участка с 5 мм до 13,5 мм.

При повторной симуляции нагружения в AnsysWorkbench модуле StaticStructural были проведены аналогичные действия, что и на более ранней стадии. В ходе повторного расчета вновь были определены следующие результаты: максимальное эквивалентное напряжение составило 39,89 МПа; максимальные суммарные перемещения на участках наиболее подверженных нагрузкам составили 0,15 мм; минимальный коэффициент запаса модели составил 3,16. Полученные данные соответствуют необходимым требованиям. Расчеты были реализованы с применением сетки конечных элементов –размер элемента равный 4,5 мм. Реалистичность расчетов была проверена анализом сходимости сетки, график представлен ниже на рисунке 2.

Также при реализации вычислений на различных участках были получены распределения напряжений и деформации в модели. Результаты расчетов представлены ниже на рисунках 3 и 4 соответственно.

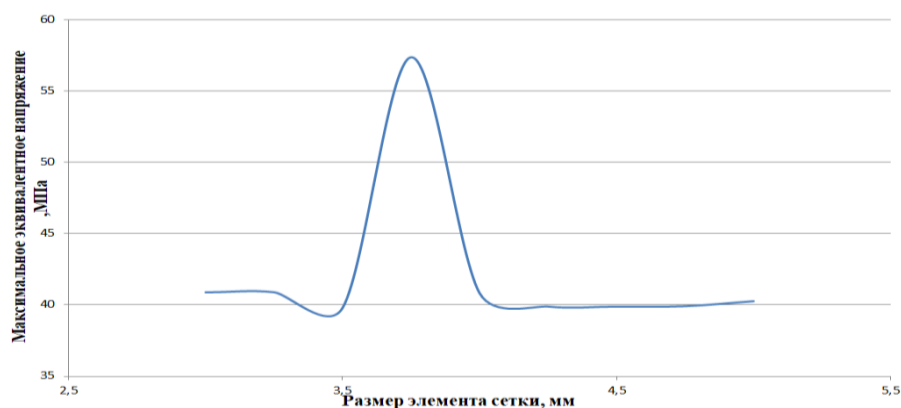


Рисунок 2 – График сходимости сетки

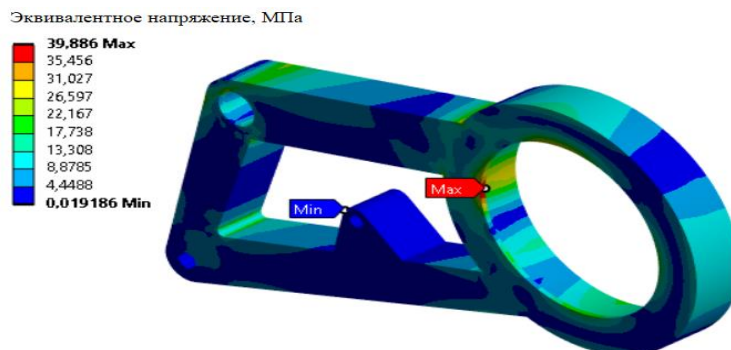


Рисунок 3 – Распределение напряжения в модели на участках

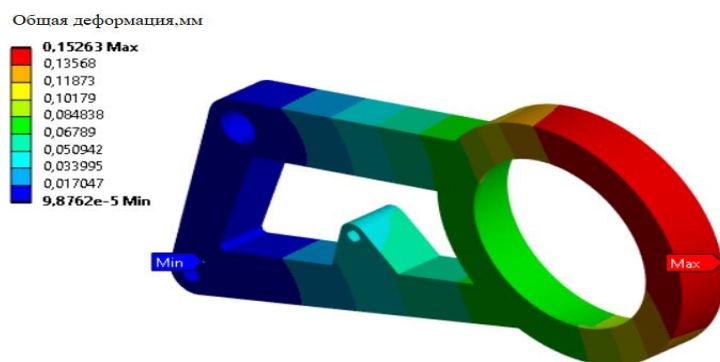


Рисунок 4 – Распределение деформации в модели на участках

Заключение

В результате проделанной работы был разработан прототип будущего крепления привода болида класса «Формула Студент». В дальнейшем предполагается выполнить усталостный расчет кронштейна и провести оптимизацию в Ansys Workbench, в модуле Static Optimization.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экономическая политика в системе национальной безопасности Российской Федерации / Е. Г. Анисимов, В. Г. Анисимов, Т. Н. Сауренко, С. В. Чварков // Национальные приоритеты России. – 2016. – № 3(21). – С. 22-32.
2. Гасюк, Д. П. Инновационные технологии как основа развития отечественного машиностроения в условиях импортозамещения / Д. П. Гасюк // Перспективные машиностроительные технологии : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 5-12.
3. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Г. А. Ботвин [и др.] ; Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; В. Г. Анисимов. – Москва : Военная академия Генерального штаба Вооружённых сил Российской Федерации, 2006. – 288 с.
4. Аввакумов, М.В. Расчет цепных передач: методические указания / М.В. Аввакумов, А.Б. Коновалов. – Санкт-Петербург: СПб ГТУРП, 2013. – 31 с.
5. Теоретические основы современных способов повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Оборудование для повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Цепные передачи. Практические занятия: методические указания / сост. Е.А. Тарасенко. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018.
6. Егоров, И.М. Детали машин и основы проектирования. Проектирование цепных передач: Пособие по курсовому проектированию. / И.М.Егоров, А.П. Тюрин. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2014. – 38 с.
7. Елисеев, К. В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах: учеб, пособие / К. В. Елисеев, Т. В. Зиновьева. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 112 с.
8. Елисеев, К.В. Вычислительная механика. Вычислительный практикум в системе ANSYS: Учеб, пособие / К.В.Елисеев, А.К. Кузин, С.Г. Орлов / Под ред. проф. Н. Н. Шаброва. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2004. – 91 с.

В.А. Попутникова, М.Д. Фан, В.П. Третьяков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Санкт-Петербург, Россия, poputnikova.va@edu.spbstu.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНУЮ ФОРМУ

Аннотация

В работе проведено проектирование деталей «станина» и «кронштейн», показано влияние температуры расплава на образование дефектов при литье в песчаную форму. Выявление возможных дефектов и количественная оценка образующейся пористости в теле отливки осуществлялось на этапе проектирования технологии с помощью программного комплекса ProCAST и проведенных симуляций процесса получения заготовки. В результате выполненной работы выявлены локальные области образования дефектов в заготовках, дана их количественная оценка при различной температуре расплава и предложены рекомендации для повышения качества получаемых отливок.

Ключевые слова: технологичность отливок, программа ProCAST, симуляция изготовления отливок, температура расплава, пористость.

Введение

Литье в песчаные формы широко используется в машиностроительном производстве и является универсальным способом получения заготовок из различных сплавов, практически любой конструктивной сложности и массы [1-4]. Для повышения качества отливок и снижения затрат на производство продукции применяют современные компьютерные программы [5-8] для моделирования литейных процессов. Симуляции изготовления отливки позволяют получить количественные характеристики при изменении технологических параметров процесса. Анализ полученных результатов, корректировка конструкции отливки и технологии литья дает уменьшение вероятности возникновения литейных дефектов (пористости, усадочных раковин, недоливов и т. д.).

Целью данной работы является проектирование деталей «станина» и «кронштейн», оценка влияния материала и температуры расплава на качество отливок различной формы путем симуляции процесса получения заготовок при литье в песчаную форму.

Методы

На первом этапе работы с учетом рекомендаций по проектированию технологичных отливок [1, 9] проведена разработка конструкций двух деталей различной формы «станина» и «кронштейн», основной особенностью которых является наличие пересечения четырех стенок. Такое сопряжение стенок зачастую приводит к скоплениям металла, наличию тепловых узлов и к образованию усадочных раковин.

При проектировании технологии литья были определены положение отливки в форме, разъемы формы и модели, припуски на механическую обработку, литейные уклоны, конфигурация стержня и элементы литниковой системы с указанием

необходимых размеров. Припуски назначены для метода получения отливок в разовых песчаных формах из низко-влажных (до 2,8 %) высокопрочных смесей (свыше 16 кПа) с высоким и однородным уплотнением до твердости не ниже 90 единиц [10]. 3D-модели отливок с элементами литниковой системы представлены на рисунке 1.

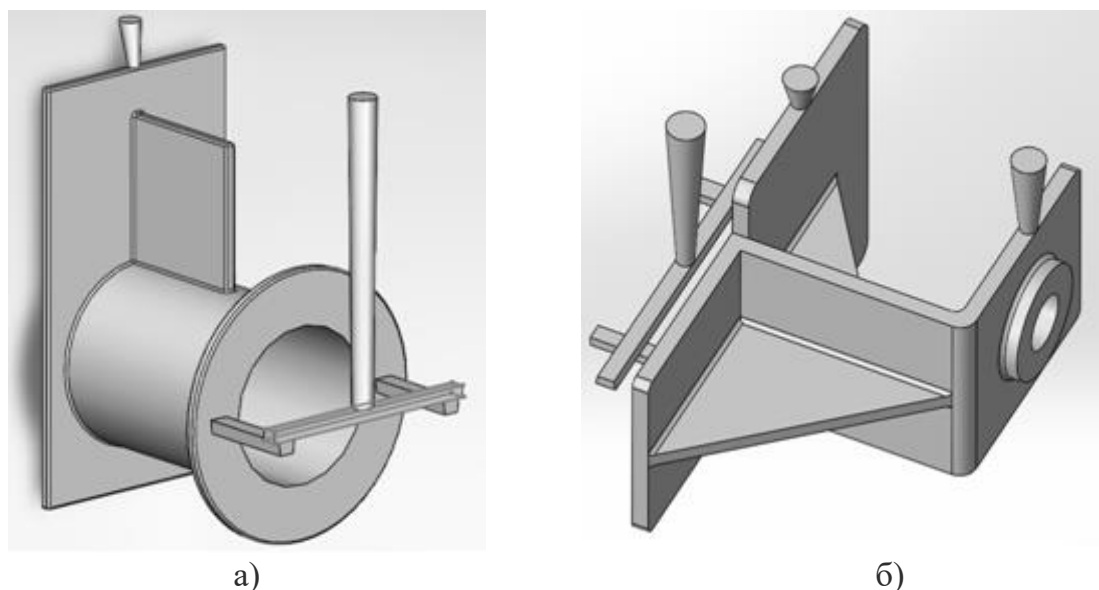


Рисунок 1 – 3D-модель отливки для деталей «станина» (а) и «кронштейн» (б)

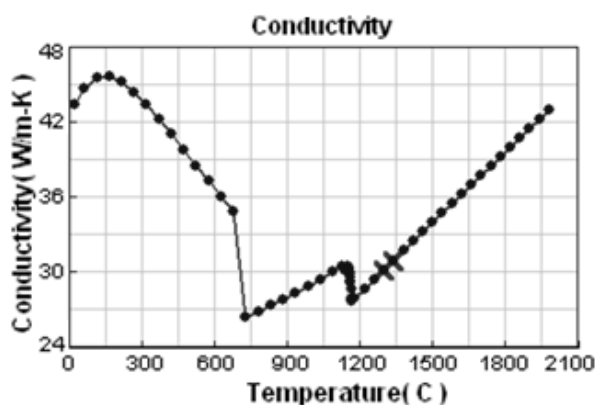
На втором этапе работы была проведена подготовка к моделированию и симуляции литейных процессов в программном комплексе ProCAST [11]. Данная программа позволяет на этапе проектирования технологии выявлять дефекты в теле отливки, а также создает условия для выбора путей их устранения. Для анализа причин появления дефектов и их количественной оценки учитывалось различие в материалах и габаритных размерах отливок. При этом разница в толщине стенок не превышала 50 %.

После импорта 3D-моделей отливок «станина» и «кронштейн» в программу создания объёмной сетки виртуальной оболочки из базы данных были выбраны материалы для формы и отливок. Для отливки «кронштейн» в качестве материала был принят серый чугун, а для «станины» – сталь 18CrNiMo7-6 (аналог стали 12ДХН1МФЛ). Химический состав материала отливок представлен в таблице 1, а на рисунке 2 – зависимость теплопроводности λ от температуры расплава и отливки.

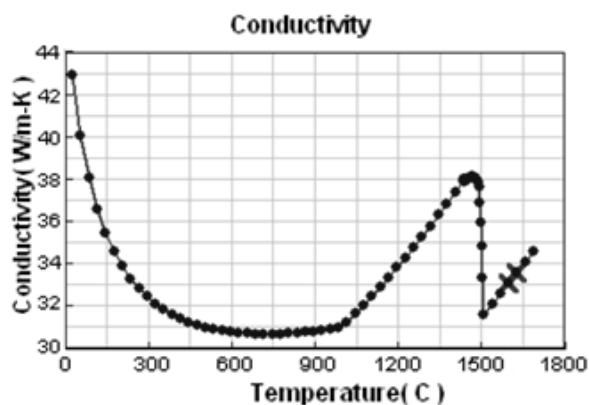
Таблица 1 – Химический состав материала отливок

Материал	Химический состав, %										
	C	Cr	Cu	Mg	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V
Серый чугун	3,54	-	0,29	0,05	0,14	-	-	0,019	0,007	2,46	-
Сталь 18CrNiMo7-6	0,18	1,67	-	-	0,54	0,28	1,62	$\leq 0,04$		0,29	0,01

После назначения коэффициентов теплопередачи для контактов двух тел и граничных условий процесса (для песчаной формы – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) заданы вектор силы тяжести и начальные температуры расплавов. Расчётная температура заливки принималась выше температуры плавления материала на 100, 150, 200 и 250 $^{\circ}\text{C}$. После завершения необходимой подготовки проведено моделирование литейных процессов.



а)

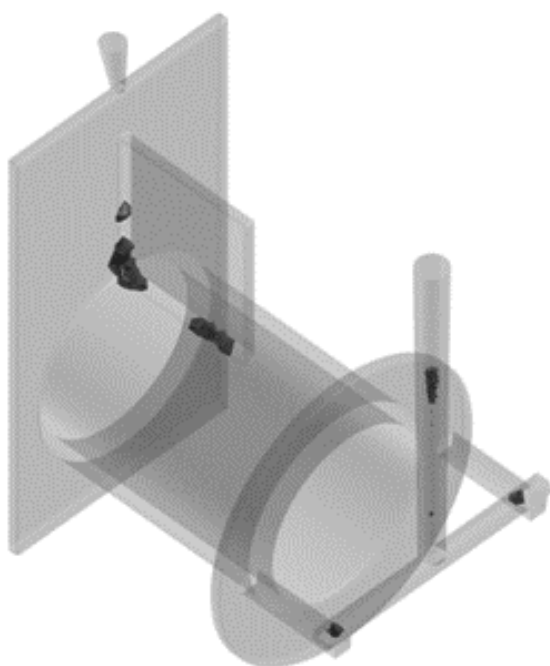


б)

Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности λ от температуры расплава и отливки для серого чугуна (а) и стали (б)

Результаты и обсуждение

В результате моделирования было выявлено наличие в отливках тепловых узлов и зон возникновения усадочной пористости. При этом наибольшая пористость наблюдается в зонах сопряжения четырех стенок, что соответствует реальным процессам литья. На рисунке 3 показаны зоны максимальной усадочной пористости в отливках «станина» и «кронштейн» при температуре расплава $T_{\text{расп}}$ выше температуры плавления материала на 100 °С.



а)



б)

Рисунок 3 – Зоны максимальной усадочной пористости в отливках «станина» (а) и «кронштейн» (б)

На рисунке 4 представлены графики формирования пористости в отливках при различной температуре расплава, которую в расчетах задавали выше температуры плавления материала на 100, 150, 200 и 250 °С.

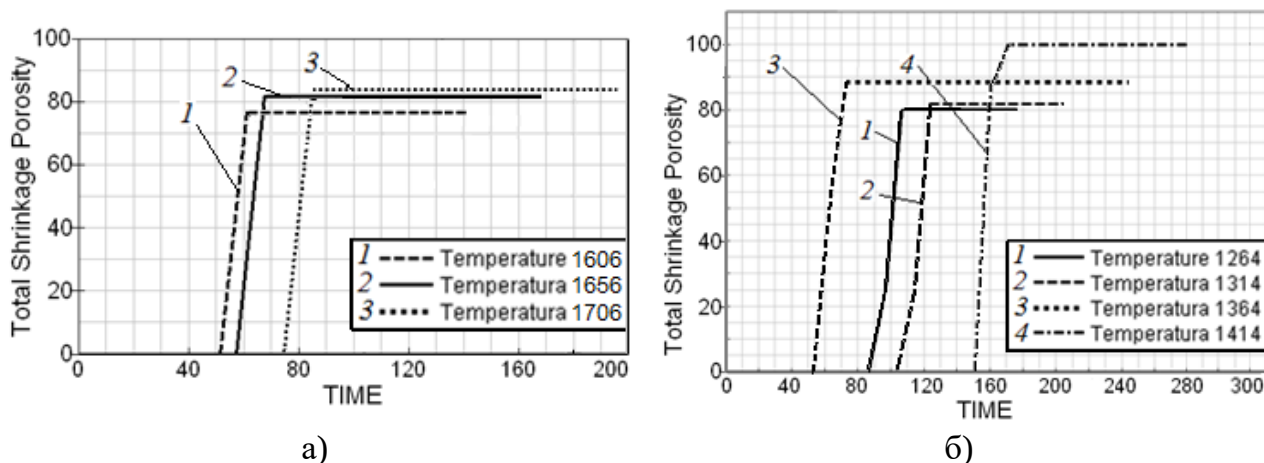


Рисунок 4 – Графики формирования пористости в отливках «станина» (а) и «кронштейн» (б)

Максимальная пористость в зоне сопряжения четырех стенок для данных отливок, различающихся по материалам и габаритным размерам, составляет 75...80 % при номинальной температуре расплава $T_{расп}$, которая выше температуры плавления материала на 100 °С. При температуре жидкого металла ниже этого уровня происходит неполное заполнение формы для отливки «станина», поэтому при отработке технологии необходимо учитывать высоту подъема металла и проводить натурные испытания.

Расчетные данные показывают, что применение стали не оказывает существенного повышения пористости в теле отливки с увеличением температуры расплава. Для серого чугуна увеличение температуры на 250 °С приводит уже к образованию усадочной раковины, что недопустимо для изделий ответственного назначения и потребует дополнительных методов контроля и выбраковки заготовок.

Для уменьшения пористости до приемлемого уровня для данных отливок необходимо проводить корректировку толщины стенок, радиусов сопряжений и размеров прибыли. Установка холодильников напротив зон с высокой пористостью обеспечивает одновременное затвердевание отливки и позволяет получить заготовки с уменьшением пористости до значений 20...30 %. Данный уровень пористости не окажет существенного влияния на эксплуатационные характеристики изделий, так как объем пор незначителен. Применение программы ProCAST при моделировании процесса литья с холодильниками показывает также координаты их расположения в форме для достижения наибольшего эффекта.

Заключение

Проведенные в данной работе симуляции в программе ProCAST процессов изготовления отливок «станина» и «кронштейн» в песчаных формах позволили подтвердить образование крупных литейных дефектов в зонах сопряжения четырех стенок. При этом, как показали исследования, значения пористости для выбранных материалов (серого чугуна и стали) при номинальной расчетной температуре являются сопоставимым. Пористость и вероятность возникновения усадочной раковины возрастает с увеличением температуры расплава более интенсивно у серого чугуна. В качестве вариантов по уменьшению пористости в таких отливках предлагается корректировка толщины стенок, размеров прибыли и установка холодильников.

Применение моделирования литейных процессов позволяет на этапе проектирования технологии оценить технологичность деталей и влияние различных

факторов на качество отливки. Анализ результатов проведенных исследований подтверждает необходимость использования компьютерных программ для выбора рационального варианта получения качественных отливок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство и механическая обработка заготовок. Литые заготовки : учебно-методическое пособие / сост. С. И. Фоминых. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 88 с.
2. Технология литейного производства: литье в песчаные формы : учебник для студ. высш. учеб. заведений / А. П. Трухов [и др.]; под ред. А. П. Трухова. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 528 с.
3. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов по направлениям подготовки бакалавров и специальностям в области техники и технологий / [А. Г. Алексеев [и др.]; под ред. Ю. М. Барона. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.
4. Технология конструкционных материалов: учебник / А. М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А. М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
5. Вольнов, И.Н. Моделирование литейных процессов – современные вычислительные технологии / И.Н. Вольнов // Литейщик России. – 2007. – № 11. – С. 27-30.
6. Вдовин, Р.А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Mesh программного продукта ProCast: учеб. пособие. / Р.А. Вдовин. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 108с.
7. Девятков, С.А. ProCAST виртуальное моделирование литейных технологий / С.А. Девятков // CADmaster. – 2006. – № 5. – С. 36-43.
8. Монастырский, А.В. PoligonSoft для литейного производства / А.В. Монастырский, Ю.Б. Власов // Литейное производство. – 2022. – № 8. – С. 31-37.
9. Медко В.С. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок : учеб. пособие / В.С. Медко, М.М. Радкевич, В.П. Третьяков. – СПб. : Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 218 с.
10. ГОСТ Р 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. – М. : Стандартинформ, 2010. – 62 с.
11. ProCAST. Моделирование литейных процессов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.esi-russia.ru/> (дата обращения 14.06.2023).

К.А. Тукачев, С.Н. Кункин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, tukachevkir@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОГРАММАХ SOLIDWORKS И МОДУЛЯ КОМПАС-3D/PMFEM

Аннотация

В данной работе рассмотрены результаты топологической оптимизации детали в САПР SolidWorks и Компас-3D, с одинаковыми условиями построения задачи (максимизация коэффициента запаса прочности, при снижении массы на одинаковый процент). При исследовании функциональных возможностей программ возникла идея сравнить результаты оптимизации и сделать вывод, какая из новых полученных геометрий будет иметь больший коэффициент минимального запаса прочности при равной массе. В результате работы программ, были получены эпюры распределения массы, на основе которых были построены новые геометрические конфигурации деталей.

Ключевые слова: SolidWorks, Компас-3D, топология, САПР, оптимизация.

Введение

Топологическая оптимизация – это технология, которая позволяет проектировать различные конструкции, изменяя их технологию, для оптимизации определённой характеристики (массы, размера, прочности и т. д.) [1-3]. Сегодня на рынке представлено множество программных продуктов, реализующих технологию топологической оптимизации, в CAD-системах, таких как SolidWorks, Компас-3D, а также в CAE-системах (ANSYS) [4-6]. Она позволяет значительно ускорить и упростить разработку сложных конструкций, сократить расходы на их испытания, а также достичь высоких показателей эффективности в экономии материалов [7-12].

Цель работы: сравнить результаты топологической оптимизации, полученные в программах Компас-3D и SolidWorks и выяснить, у какой из новых предложенных конфигураций коэффициент запаса прочности будет выше.

Методы исследования

В качестве задачи служила оптимизация массы металлической балки. Оптимизация массы производилась за счёт изменения геометрии детали, материал не изменялся.

Для достижения поставленной цели были использованы современные САПР Компас-3D и SolidWorks.

В работе производились оптимизации геометрии детали с последующими сравнениями показателей массы и прочности.

Основные характеристики детали и параметры нагрузок одинаковы: сталь 20 (ГОСТ 1050–2013); сила, приложенная к отверстиям в верхней части кронштейна равна 500 Н, кронштейн жёстко зафиксирован через отверстия у основания. [13, 14]. В Компас-3D материал выбран согласно ГОСТу, в SolidWorks был выбран ближайший аналог AISI-1020. При топологической оптимизации размер КЭ сетки в обоих

программах задавался идентичный: максимальный размер элемента 4 мм, минимальный размер элемента 0,4 мм.

Результаты и обсуждение

В качестве детали для испытаний была выбран кронштейн (рисунок 1). Масса исходной детали 0,66 кг.

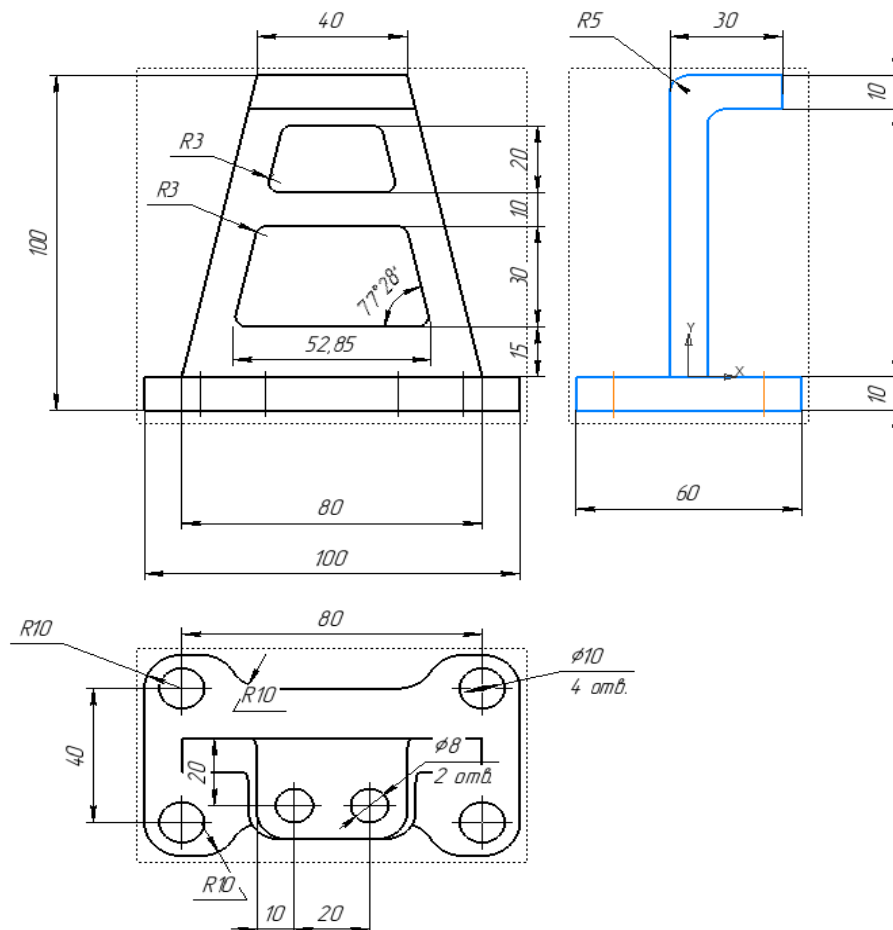


Рисунок 1– Эскиз детали с указанием размеров

В программе SolidWorksc помощью функции «Исследование топологии» была проведена топологическая оптимизация детали по уменьшению массы на 31 %. На основе полученной модели (рисунок 2) была построена новая модель и определён коэффициент запаса прочности (рисунок 3).

В результате расчётов деталь обладала следующими характеристиками:

- Масса детали 0,46 кг
- Минимальный коэффициент запаса прочности 2,7

Далее в программе Компас-3D, с помощью модуля АРМFЕМи идентичной функции топологической оптимизации была получена следующая модель (рисунок 4). На основе данной модели была построена новая и определён коэффициент запаса прочности (рисунок 5).

В результате расчётов деталь обладала следующими характеристиками:

- Масса детали 0,46 кг
- Минимальный коэффициент запаса прочности 2,0

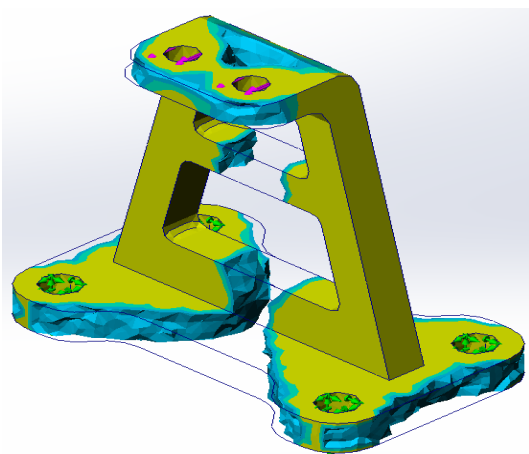


Рисунок 2– Грубая модель, полученная при использовании функции топологической оптимизации в SolidWorks (эпюра распределения массы)

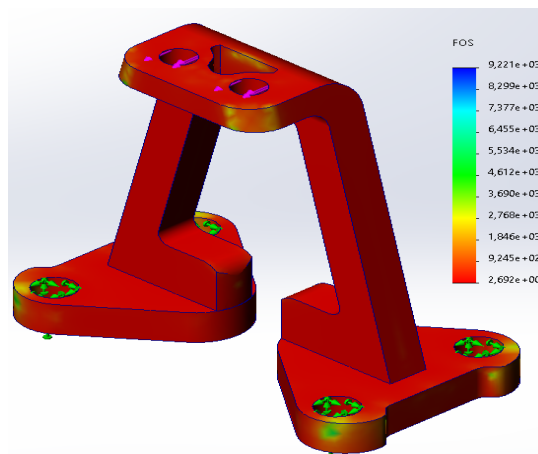


Рисунок 3– Статический расчёт полученной конфигурации детали в SolidWorks (эпюра распределения запаса прочности, с использованием напряжения Мизеса в качестве критерия)

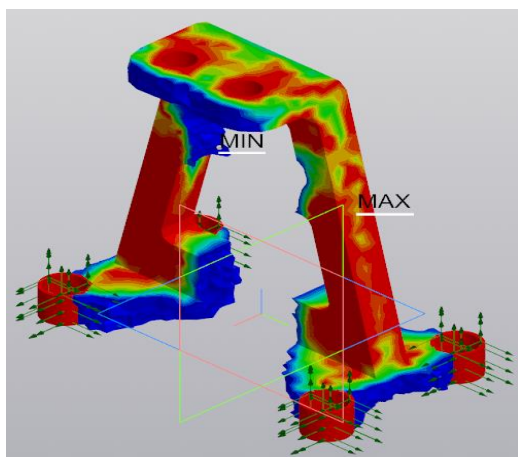


Рисунок 4 — Грубая модель, полученная при использовании функции топологической оптимизации модуля ARMFEM (эпюра распределения массы)

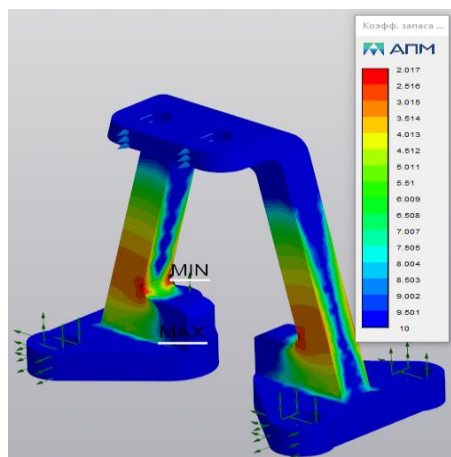


Рисунок 5 — Статический расчёт полученной конфигурации детали в Компас-3D (эпюра распределения запаса прочности, с использованием напряжения Мизеса в качестве критерия)

Заключение

В результате сравнения работы программ можно сделать вывод о том, что SolidWorks более успешно оптимизировал деталь, так как полученные конфигурации при одинаковой массе 0,46 кг, имеют разный минимальный коэффициент запаса прочности, 2,0 в Компас-3D и 2,7 в SolidWorks.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация топологии [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.qaz.wiki/wiki/Topology_optimization (Дата обращения 15.05.2023)
2. Bendsoe, M.P. Topology Optimization: Theory, Methods and Application / M.P. Bendsoe, O. Sigmund. –Springer, 2003. – 271 p.

3. Christensen, P.W. An introduction to structural optimization. / P.W. Christensen, A. Klarbring. – Springer, 2009. – 214 p.

4. Царицынский, А.А. Обзор существующих программных продуктов многокритериальной оптимизации объектов аэрокосмической техники / А.А. Царицынский. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2015. – № 4. – С. 112-123.

5. Газизов, И. И. Топологическая оптимизация геометрии поковки рычага робота / И. И. Газизов, Л. Б. Аксенов // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 419-424.

6. Обзор софта для топологической оптимизации и бионического дизайна [Электронный ресурс]. – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/obzor-softa-dlya-topologicheskoy-optimizatsii-i-bionicheskogo-dizayna> (дата обращения 4.05.2023)

7. Козиков, А. М. Современные тенденции в вопросе оптимизации металлических конструкций / А. М. Козиков, Т. С. Гуж, В. А. Ильичев // Молодежный научный форум: технические и математические науки. – 2017. – № 2(42). – С. 51-57.

8. Кузьменко, А. А. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке / А. А. Кузьменко, Д. П. Гасюк // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 434-439.

9. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А. В. Тебекин, Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4, № 11. – С. 30-38.

10. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования / И. Н. Хрусталева, Д. П. Гасюк, Л. Г. Черных [и др.]. // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 147-152.

11. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. А. Веселко, А. Ю. Пак // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 30-35.

12. Гасюк, Д. П. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно - артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа / Д. П. Гасюк, И. Д. Казенов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды III Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16 февраля 2018 года. Том 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного" Министерства обороны Российской Федерации, 2018. – С. 268-272.

13. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка / Под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2010. – 732 с.: ил.

14. ГОСТ 1050–2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей». Общие технические условия. Москва, Стандартинформ, 2014.

И.В. Фролов, И.А. Нестеров

Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (АО «Силовые машины»), Санкт-Петербург, Россия,
Frolov_iv@power-m.ru, Nesterov_IA@power-m.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАЖИМНЫХ КОЛЕЦ СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ЗАВОДА «ЭЛЕКТРОСИЛА»

Аннотация

В работе рассмотрены новые конструкции нажимных колец турбогенераторов серии ТВВ, ТВФ, ТЗФ, ТЗВ мощностью от 63 до 1200 МВт завода «Электросила». В современных экономических условиях, когда предприятия отказываются от услуг подрядных организаций в пользу развития собственных производственных мощностей, возникает необходимость в оптимизации конструкции изделий под технологические возможности предприятия. Исторически, нажимные кольца турбогенераторов завода «Электросила» изготавливались методом литья, однако новые экономические вызовы поставили перед предприятием задачу внедрения изготовления колец с помощью сварки. В результате проделанной работы, разработана новая сварная конструкция данных нажимных колец в турбогенераторах, которая позволит снизить их себестоимость, унифицировать закупаемые материалы и изготавливаемые детали, а также уменьшить сроки изготовления. Проведен анализ напряжённо-деформированного состояния нажимных колец с помощью численного метода расчёта, реализованного в программном комплексе ANSYSWorkbench, позволяющий детально оценить усталостную долговечность выбранных сварных швов на примере сварного нажимного кольца турбогенератора серии ТВВ-350.

Ключевые слова: литое нажимное кольцо, сварное нажимное кольцо, статор турбогенератора, технология изготовления сварного кольца, усталостная долговечность.

Введение

В настоящее время на турбогенераторах серии ТВВ, ТВФ, ТЗФ, ТЗВ мощностью от 63 до 1200 МВт для предотвращения распушевки спинки активной стали сердечника статора с торцевых частей устанавливаются специальные литые нажимные кольца. Кольца изготавливаются из немагнитной стали. Конструкции колец весьма разнообразны по форме и исполнению. Варианты конструкции литых колец приведены на рис.1.

Монолитность сердечника статора, собранного из сегментов электротехнической, стали обеспечивается его прессовкой. Практика показала, что удельное давление прессовки (полное усилие пресса, деленное на площадь поперечного сечения сердечника) для турбогенераторов должно составлять 14-17 кГ/см². Возникающие при прессовке сердечника остаточные деформации из-за волнистости и разнотолщинности сегментов приводит к тому, что отпор сердечника меньше усилия прессовки и составляет 10-12 кГ/см² [1-2].

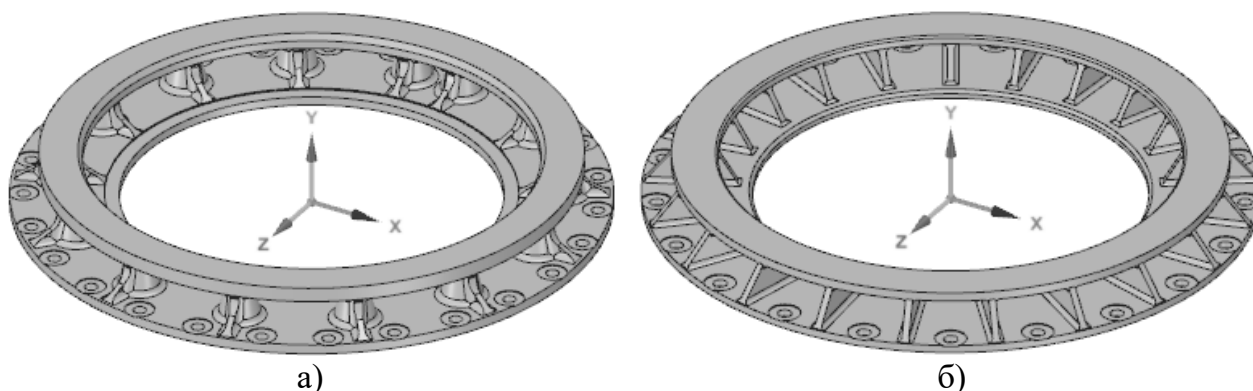


Рисунок 1 – Нажимное кольцо турбогенератора: а) ТВВ; б) ТЗВ или ТВФ

Указанное значение отпора сердечника является статической составляющей нагрузки, воспринимаемой нажимным кольцом со стороны экрана. Однако, в процессе работы электрической машины существует и динамическая составляющая, вызванная вибрацией сердечника, значение виброперемещения которого определяется по результатам замеров находящихся в эксплуатации машинах. Известно, что вибрация в осевом направлении совпадает с четырёх-узловой формой собственных колебаний сердечника в узком диапазоне частот в окрестности двойной частоты тока сети 2ω [3].

Поскольку, как было указано, материалом нажимных колец служит немагнитная сталь, например 12X18H10T, которая обладает посредственными механическими свойствами, то в отличие от расчёта литых колец, ограничиться расчётом на статическую нагрузку нельзя и необходимо провести дополнительные изыскания.

Методы

При разработке новой сварной конструкции нажимных колец для достижения поставленной цели использовался инструментарий программы конечноэлементного анализа ANSYSWorkbench, позволяющий детально оценить усталостную долговечность выбранных сварных швов.

Результаты и обсуждение

Эквивалентные напряжения, вызванные действием статических нагрузок показаны на рисунке 2.

При численном анализе собственных частот сердечника необходимо иметь в виду, что расчётные значения как правило выше реальных на 15-20% [3], поэтому для расчёта гармонического отклика на виброперемещения кольца, необходимо рассчитывать соответствующий диапазон собственных частот. Значения виброперемещения при четырёх узловой форме колебаний показаны на рисунке 3, им соответствующие эквивалентные напряжения показаны на рисунке 4.

Определение напряжений в сварных швах, необходимых для определения суммарных действующих напряжений, производится с помощью снятия мембранных напряжений в области действия наибольших напряжений в сварных швах. Направление снятия мембранных напряжений с помощью инструмента «path» показано на рисунке 5.

К: Кольцо сварное ТВВ-350_T1k20_T9

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 2

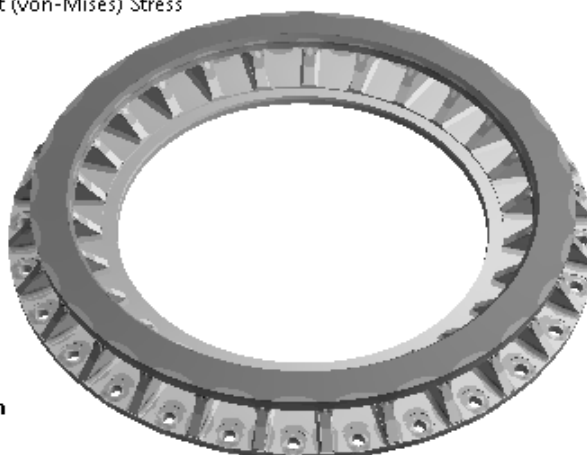
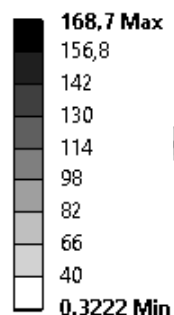


Рисунок 2 – эквивалентные напряжения в конструкции при статическом нагружении

C: Harmonic Response

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(X Axis)

Frequency: 110, Hz

Sweeping Phase: 69,262 °

Unit: mm

Cylindrical

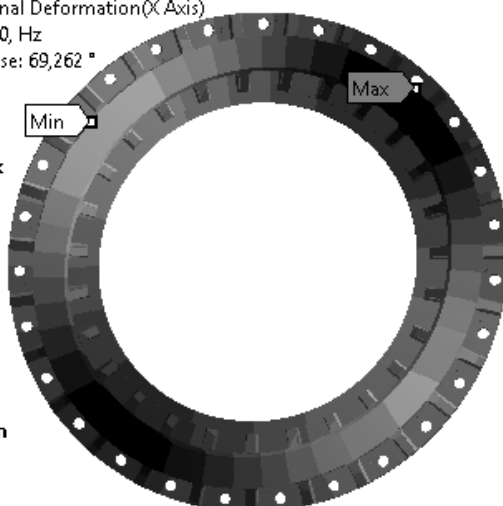
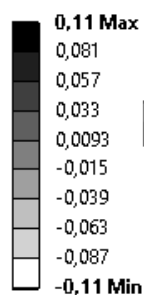


Рисунок 3 – виброперемещения в кольце при 4-х узловой форме колебаний

C: Harmonic Response

Equivalent Stress 2

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Frequency: 110, Hz

Sweeping Phase: 69,262 °

Unit: MPa

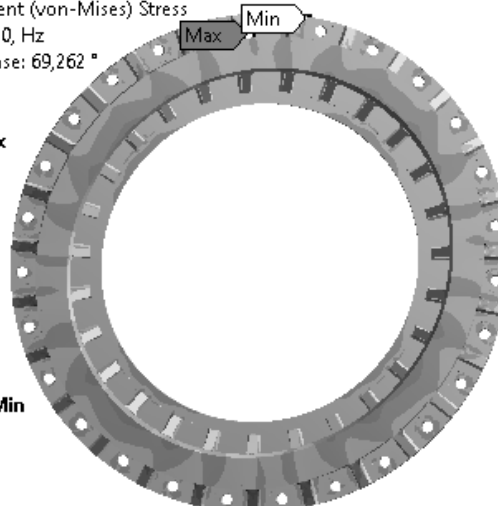
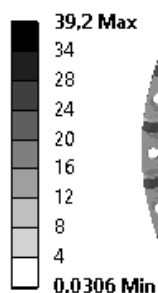
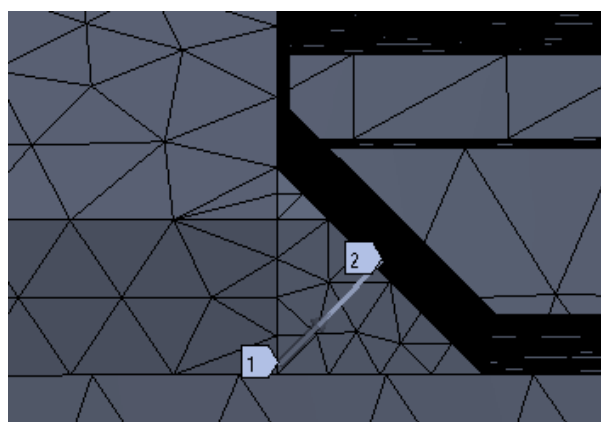
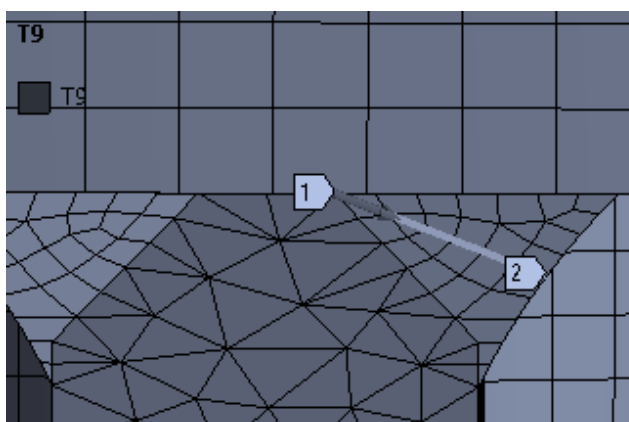


Рисунок 4 – эквивалентные напряжения в кольце при 4-х узловой форме колебаний



а)



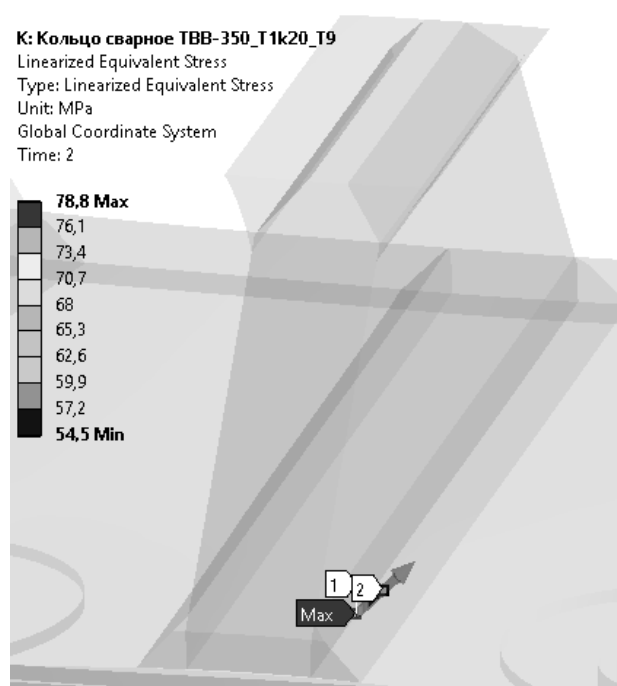
б)

Рисунок 5 – path для снятия линейаризованных напряжений по середине высоты шва: а) шва Т1; б) шва Т9

На рисунке 6 показано определение мембранных напряжений в сварном шве при статическом нагружении на примере шва типа Т1. На рисунке 7 показано определение мембранных напряжений при динамическом (вибрационном) нагружении на примере того же типа сварного шва.

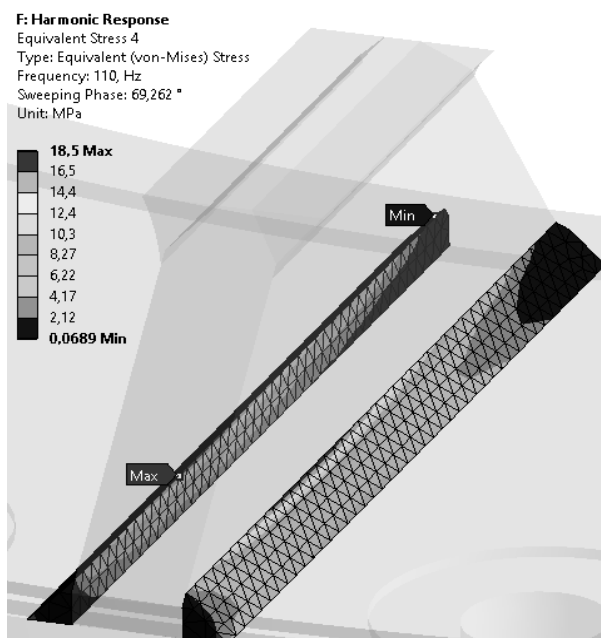


а)

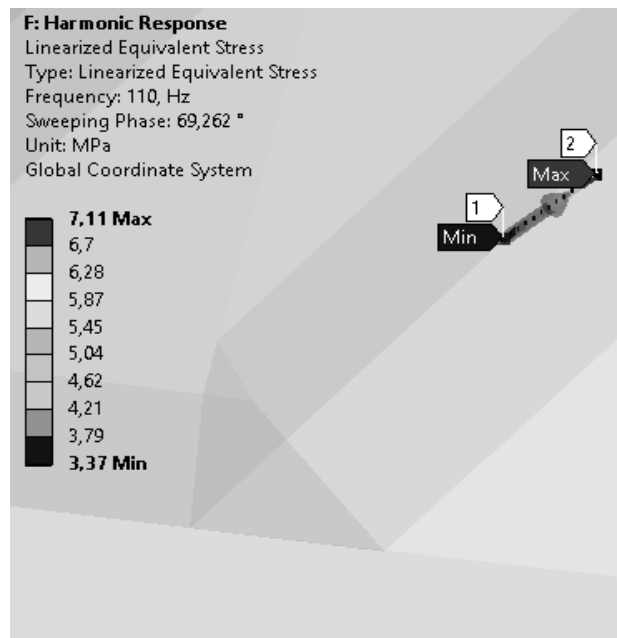


б)

Рисунок 6 – определение напряжений в сварном шве типа Т1 при статическом нагружении: а) Эквивалентные по Мизесу б) Эквивалентные по Мизесу, линеаризованные в плоскости действия наибольших напряжений



а)



б)

Рисунок 7 – определение напряжений в сварном шве типа Т1 при динамическом нагружении: а) Эквивалентные по Мизесу б) Эквивалентные по Мизесу линеаризованные в плоскости действия наибольших напряжений

Напряжения в сварных швах с учётом концентрации определяются как [4]:

$$\sigma = \sigma_m + \alpha_\sigma \cdot \sigma_a$$

где σ_m – среднее напряжение цикла, как напряжения от статических сил; σ_a – амплитуда цикла при действии виброперемещения; α_σ – коэффициент концентрации напряжения в зависимости от типа сварного шва.

Заключение

Разработанная и представленная в данной работе новая конструкция сварных нажимных колец может быть использована для серии турбогенераторов типа ТВВ, ТВФ, ТЗВ, ТЗФ мощностью от 63 до 1200 МВт. Ввиду того, что нажимные кольца конструктивно на всех перечисленных типах турбогенераторов аналогичны, за исключением габаритов и площади контакта с экраном сердечника статора, то расчётное обоснование прочности сварных швов будет также идентичным с приведённой в работе методологией на примере расчёта ТВВ-350. Плановый экономический эффект снижения себестоимости изготовления по сравнению с литым нажимным кольцом составляет от 15 до 30 % в зависимости от типа турбогенератора. Ориентировочный срок изготовления снижается на 30-40% с учётом поставки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детинко, Ф.М. Прочность и колебания электрических машин / Ф.М. Детинко, Г.А. Загородная, В.М. Фастовский. – Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1969. – 440 с.
2. Турбогенераторы. Расчёт и конструкция / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная [и др.]. – Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1967. – 895 с.
3. Шубов, И.Г. Шум и вибрация электрических машин / И.Г. Шубов. – Ленинград: Энергия. Ленинградское отделение, 1974. – 197 с.
4. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность : Руководство и справ. пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович ; Под ред. С. В. Серенсена. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1975. – 488 с.

К.С. Хитушкин, В.П. Третьяков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, hitushkin.ks@edu.spbstu.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ ДЛЯ ДЕТАЛИ «ОПОРА» НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ

Аннотация

В данной работе рассмотрены вопросы количественной оценки образующихся дефектов в заготовке, получаемой литьём в песчаную форму, для детали «Опора». Для решения этой задачи с помощью программы ProCAST, позволяющей выявить возможные дефекты отливок на этапе проектирования технологии, проведены симуляции процесса получения заготовки для двух различных положений отливки в форме. В результате проведенного моделирования литейных процессов выявлены локальные области образования дефектов в заготовке, дана их количественная оценка, предложены рекомендации для повышения качества получаемых изделий.

Ключевые слова: литьё в песчаные формы, моделирование процессов литья, анализ технологичности отливок, программа ProCAST.

Введение

Литьё в песчаные формы является одним из самых распространённых методов получения фасонных заготовок в машиностроительном производстве и позволяет получать отливки разной степени сложности и массы [1, 2]. При проектировании технологии зачастую невозможно учесть все особенности процесса литья, что приводит к появлению дефектов в отливках. Тем не менее, современные методы компьютерного моделирования (программное обеспечение ProCAST, LVMFlow, MagmaSoft, Полигон и другие) позволяют проверить технологичность отливки любой сложности [3 - 6]. Наиболее часто используемым пакетом моделирования является ProCAST, обеспечивающий комплексный подход к решению различного рода технологических задач и высокую достоверность полученных результатов [7, 8].

Целью данной работы является разработка рациональной технологии литья в песчаную форму при изготовлении заготовки для детали «Опора» и оценка качества получаемой отливки с помощью средств компьютерного моделирования.

Методы

Для разработки модели получаемой отливки была использована САПР программа для создания трёхмерных ассоциативных моделей «Компас-3D», разработанная российской компанией «Аскон» [9].

Для моделирования процесса выполнения заготовки и оценки качества полученной отливки использовалась программа «ProCAST», разработанная компанией «ESI Group» [10]. Данная программа моделирует литейные процессы и на основе результатов расчетов выявляет дефекты, что создает условия для выбора путей их устранения и в конечном итоге повышения качества отливок. Система основана на методе конечных элементов МКЭ, которая обеспечивает высокую точность описания геометрии отливки и учитывает большинство физических процессов, протекающих в форме, в процессе заливки и кристаллизации отливки.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была изменена конструкция исходной детали в соответствии с рекомендациями по проектированию технологичных заготовок [1, 2]. Толщина стенок уменьшена, чтобы избежать образование неравномерной структуры, обеспечить выполнения принципа направленного затвердевания и уменьшить металлоёмкость отливки. Для сохранения механических свойств детали добавлены внутренние рёбра жёсткости, что потребует использование стержней более сложной формы. Припуски назначены для получения стальных отливок в разовых песчаных формах из низко-влажных (до 2,8 %) высокопрочных смесей (свыше 16 кПа) с высоким и однородным уплотнением до твердости не ниже 90 единиц [11]. Степень коробления и степень точности поверхности не нормировались, так как для данной детали нет особых требований к этим параметрам точности. Компьютерная модель разработанной отливки представлена на рисунке 1, а.

Далее была разработана литниковая система таким образом, чтобы обеспечить плавное заполнение формы металлом за оптимальное время и не допустить размывания стенок. Для компенсации влияния объёмной усадки, ухудшающей качество отливок, были добавлены приливы с учётом выполнения принципа направленного затвердевания. После выполнения расчёта размеров опок разработана литейная форма, представленная на рисунке 1, б.

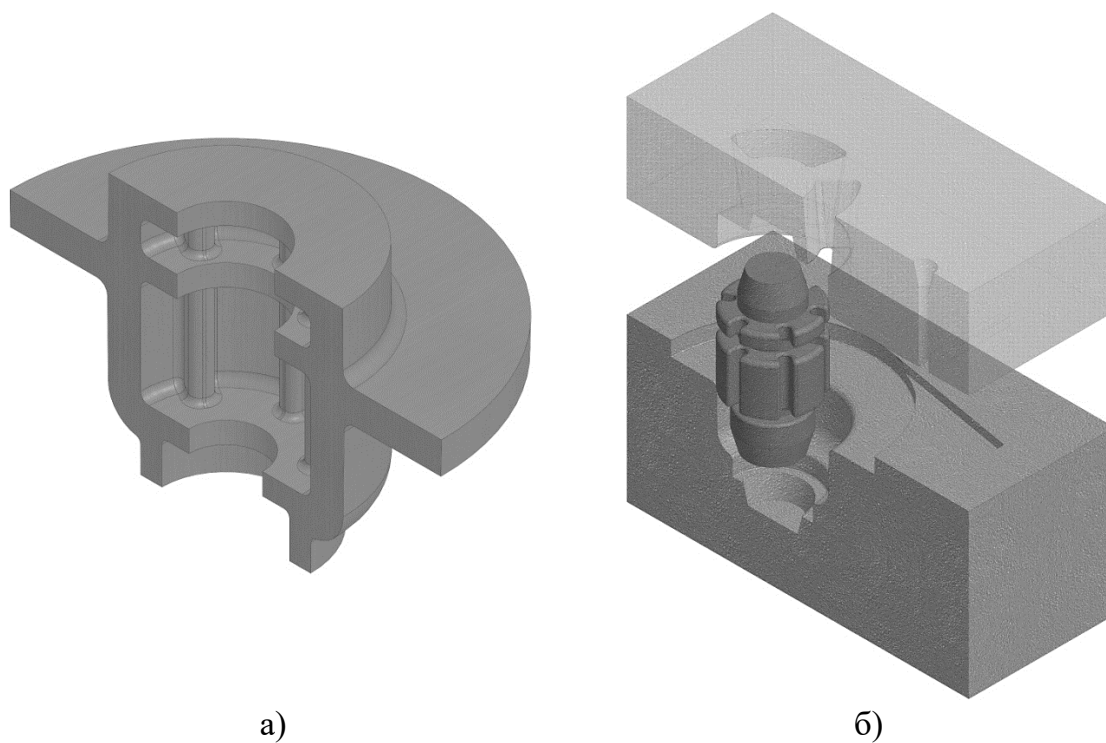


Рисунок 1 – Модель разработанной детали «Опора» (а) и модель литейной формы (б)

Конструктивной особенностью данной детали является большое количество сопряжений стенок. Несмотря на то, что выполняется принцип направленного затвердевания и количество металла в местах сопряжения не превышает максимально допустимого, существует высокий риск возникновения тепловых узлов, а, следовательно, дефектов. Для оценки правильности проектирования детали и литниковой системы, а также для выявления дефектов была применена программа «ProCAST». Результаты симуляции представлены на рисунке 2.

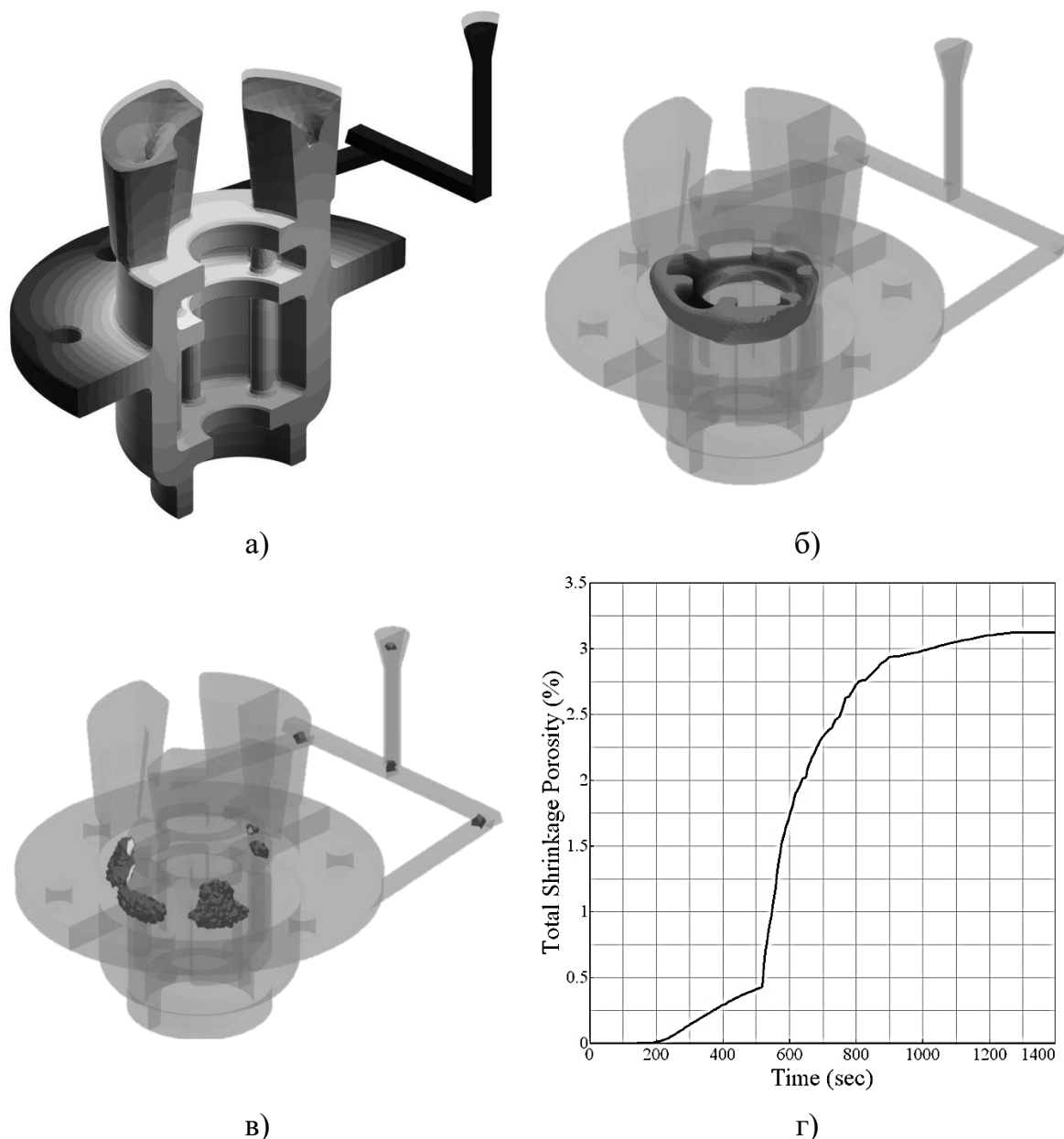
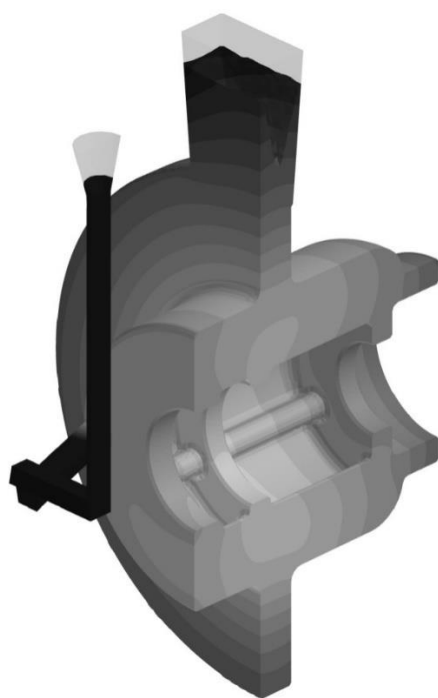


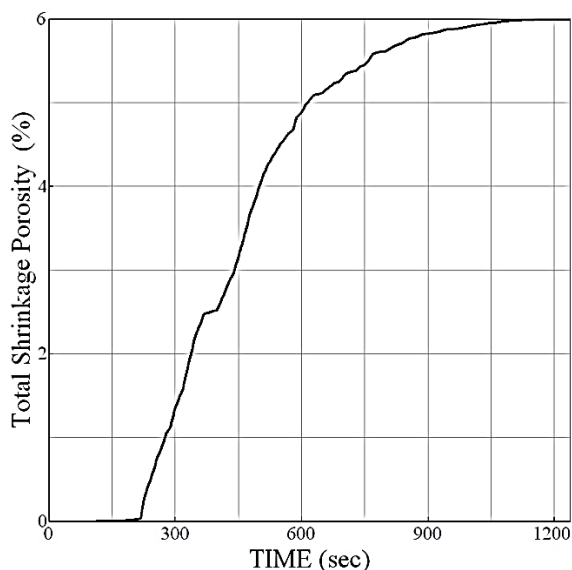
Рисунок 2 – Отливка с температурным градиентом после затвердевания (а), тепловые узлы в отливке (б), места возникновения усадочной пористости (в), график формирования пористости в отливке (г)

Симуляция выявила наличие тепловых узлов в местах сопряжения нескольких стенок, что привело к возникновению усадочной пористости. Это может негативно сказаться на механических свойствах детали и требует внесения конструктивных изменений в деталь для повышения её качества.

Для оценки влияния технологии изготовления отливки для детали «опора» на образование дефектов были изменены размеры литниковой системы и проведена симуляция при горизонтальном расположении отливки в форме. Результаты данной симуляции представлены на рисунке 3. При горизонтальном расположении отливки в форме принцип направленного затвердевания не выполняется, и это обстоятельство негативно сказывается на качестве получаемой заготовки.



а)



б)

Рисунок 3 – Отливка с температурным градиентом после затвердевания (а) и график формирования пористости в отливке (б)

В этом случае количество усадочной пористости увеличилось в два раза по сравнению с первоначальным вариантом. Эти результаты показывают, что наиболее рациональной технологией для получения более качественных отливок является заливка металла при вертикальном положении отливки в форме. Для дальнейшего снижения пористости можно рекомендовать уменьшение величины припусков, что приведет к созданию более благоприятных условий для реализации принципа одновременного затвердевания после заполнения металлом полости формы.

Заключение

В данной работе была разработана технологическая деталь «Опора», получаемая литьём в песчаную форму и проведены симуляции процесса получения заготовки при различных положениях отливки в форме. В результате моделирования выявлено наличие зон образования литейных дефектов и дана их количественная оценка. Показано, что более высокое качество отливки можно обеспечить при вертикальном положении отливки в форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косников, Г.А. Основы литейного производства: учеб. пособие. / Г.А. Косников. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2002. – 204 с.
2. Медко В.С. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок : учеб. пособие / В.С. Медко, М.М. Радкевич, В.П. Третьяков. – СПб. : Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 218 с.
3. Вольнов, И.Н. Моделирование литейных процессов – современные вычислительные технологии / И.Н. Вольнов // Литейщик России. – 2007. – № 11. – С. 27-30.

4. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования / И. Н. Хрусталева, Д. П. Гасюк, Л. Г. Черных [и др.]. // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 147-152.
5. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. А. Веселко, А. Ю. Пак // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 30-35.
6. Вдовин Р.А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Meshпрограммного продукта ProCast : учеб. Пособие / Р.А. Вдовин. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 108 с.
7. Девятков, С.А. ProCAST виртуальное моделирование литейных технологий / С.А. Девятков // CADmaster. – 2006. – № 5. – С. 36-43.
8. Монастырский, А. В. PoligonSoft для литейного производства / А. В. Монастырский, Ю. Б. Власов // Литейное производство. – 2022. – № 8. – С. 31-37.
9. Официальный сайт САПР КОМПАС [Электронный ресурс]. – URL: <https://kompas.ru> (дата обращения 03.05.2023).
10. ProCAST Моделирование литейных процессов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.esi-russia.ru/products/procast> (дата обращения 03.05.2023).
11. ГОСТ Р 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. – М. : Стандартиформ, 2010. – 62 с.

Г.А. Шельмин, В.Г. Теплухин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, shelmingeorge@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВКИ И ПОИСК РЕШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PROCAST ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация

При производстве отливок из металла существует высокая вероятность изготовления детали с дефектами. Работа посвящена прогнозированию результатов литья и улучшению качества заготовок типа «ползун» при литье в песчано-глинистые формы. Для этих целей используется программа ProCast, которая позволяет выявить возможные дефекты отливок на этапе проектирования заготовок и устранить их в случае обнаружения. В ней рассмотрен метод проектирования технологичных деталей отливок с помощью симуляции литейных процессов. В результате симуляции литейных процессов удалось проверить наличие таких дефектов в отливке как недолив, усадочная раковина и газовая пористость, произвести конструктивные изменения детали и литейной формы для их устранения и получения качественных отливок.

Ключевые слова: литье в песчаные формы, программное обеспечение ProCast, пористость металла, прибыль, холодильники.

Введение

При проектировании технологичных отливок, получаемых литьем в песчаные формы, зачастую не удается учесть все особенности процесса, прогнозировать появление дефектов при заливке расплава в формы и в период кристаллизации металла. Современные программы компьютерного моделирования способны подробно проиллюстрировать физико-химические процессы, происходящие при заполнении формы расплавами и кристаллизации металла. Существует множество профессионального ПО и САЕ систем (ProCast, LVMFlow, MagmaSoft, PowerCast, SolidCast, WinCast, Полигон) для моделирования процессов литья, применение которых уменьшает затраты времени на проектирование деталей, способствует существенному уменьшению вероятности возникновения дефектов, и в особых случаях позволяет полностью исключить брак. Наиболее функциональным из этих пакетов моделирования является ProCast, обеспечивающий комплексный подход к решению различного рода технологических задач и высокую достоверность полученных результатов [1].

Целью данной работы является проектирование технологичной детали «ползун», прогнозирование качества отливки и его повышение путем компьютерного моделирования процесса получения заготовки при литье в песчаные формы.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели использовали учебную версию программы Компас-3D российской компании Аскон [2] и систему программ ProCast от компании ESIGroup [3], позволяющие создать необходимые чертежи и модели для проведения исследований процесса заливки расплава в формы и кристаллизации металла.

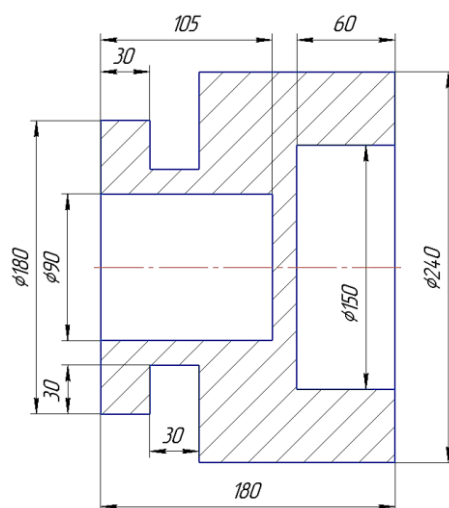
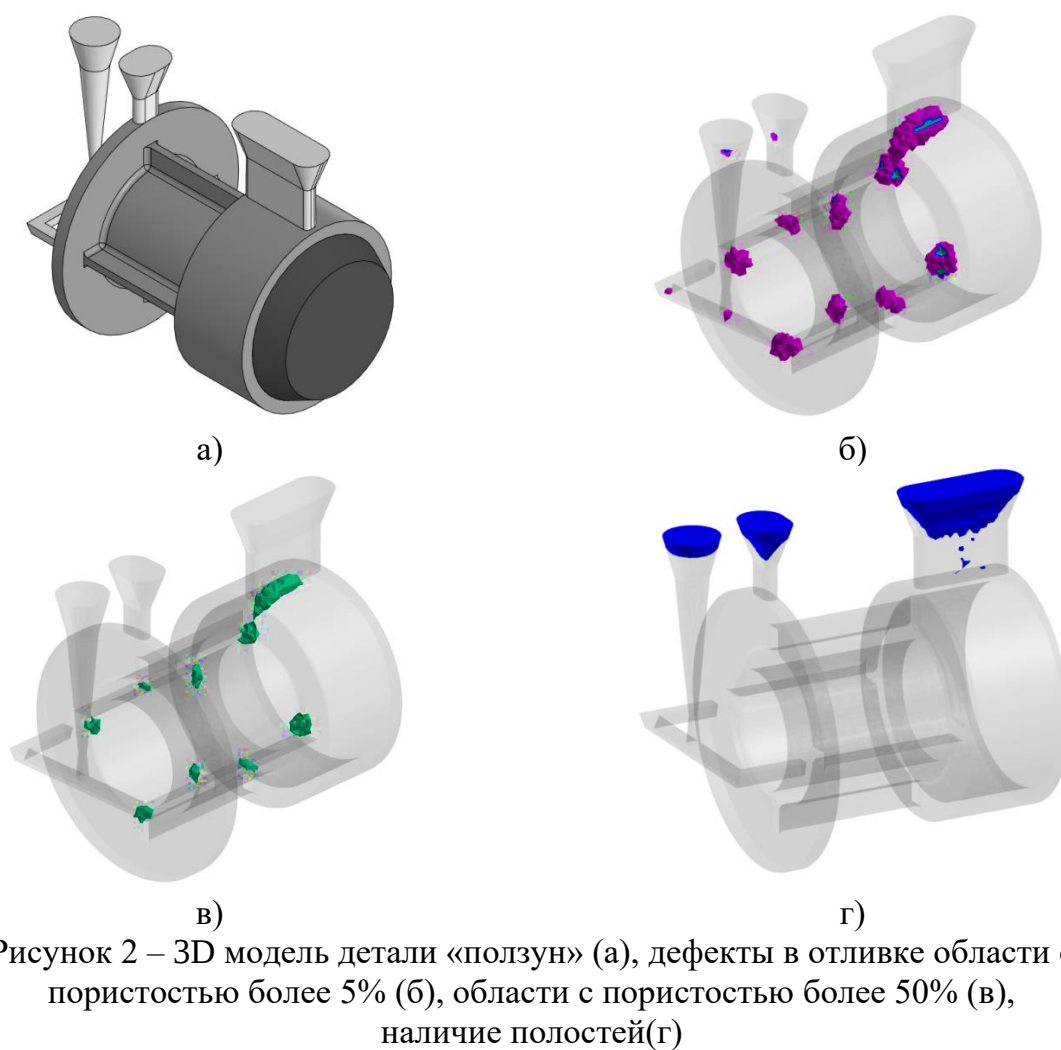


Рисунок 1 – Исходный чертеж детали «ползун»

Процесс создания технологичной детали «ползун» (рисунок 1) был разбит на 2 этапа. На первом этапе были проведены корректировка размеров и формы детали с учетом рекомендаций по проектированию технологичных заготовок [4].



Для обеспечения принципа одновременного затвердевания металла была выбрана одинаковая толщина стенок отливки (рисунок 2, а). Для обеспечения дополнительной жесткости конструкции использованы ребра жесткости.

Уменьшение влияния объемной усадки на качество отливки в процессе кристаллизации возможно лишь за счет поступающего из прибыли жидкого металла [6]. Была выбрана форма прибыли для предотвращения образования термических узлов, являющихся местом появления усадочных дефектов. Произведен расчет ее минимально допустимых размеров для создания тепловых условий, способствующих направленному затвердеванию отливки и снижающих расход металла [7].

На втором этапе проектирования использовали специализированную систему программы ProCast для оценки правильности расчета литнико-питающих систем, проведения моделирования процесса заполнения формы и кристаллизации расплава. Система основана на методе конечных элементов, который обеспечивает высокую точность описания геометрии отливки и формы расчетной модели. Также учитывается большинство физических процессов, протекающих в форме в процессе заливки и кристаллизации отливки.

Для точной настройки параметров моделирования процесса литья и его анализа используется база данных, которая учитывает диаграммы состояний углеродистых и легированных сталей, чугунов, алюминиевых и титановых сплавов, а также сплавов, созданных по личным параметрам пользователя. Для данного исследования использована сталь 15Л по ГОСТ 977-88, поскольку она соответствует требуемым механическим характеристикам детали. К основным этапам моделирования литейных процессов в ProCAST относятся:

- построение расчётной сетки из CAD-модели (отливка, форма, стержни);
- задание материалов и параметров литейного процесса (условия заполнения, охлаждения формы, параметры расчета);
- расчёт и анализ результатов моделирования.

Применение специализированной системы ProCast позволило определить вероятность нахождения в отливке таких дефектов, как наличие усадочных раковин и повышенную пористость металла как во всей отливке, так и в отдельных ее элементах (рисунок 1, б).

На основе данных, полученных при симуляции литейных процессов в системе ProCast, изменим полученную ранее геометрию отливки для уменьшения вероятности нахождения дефектов в отливке. Максимальная пористость в узлах отливки достигает 90 %, что может привести к браку при изготовлении. Для ее уменьшения увеличена площадь поперечного сечения прибыльных частей, что обеспечит лучшее питание отливки жидким металлом при ее остывании. Поскольку ползун не испытывает больших динамических нагрузок и работает в обычных климатических условиях, была произведена замена используемой ранее стали 15Л (прочность 392 МПа) на серый чугун СЧ35 ГОСТ 1412-85, который обладает меньшей объемной усадкой и несущественно уступает стали по прочности (350 МПа).

Выполнена повторная симуляция в системе ProCast и оценена возможность появления дефектов при использовании нового материала и увеличенном размере прибыльных частей (рисунок 3).

В результате повторной симуляции максимальное значение пористости детали составило 45 %.

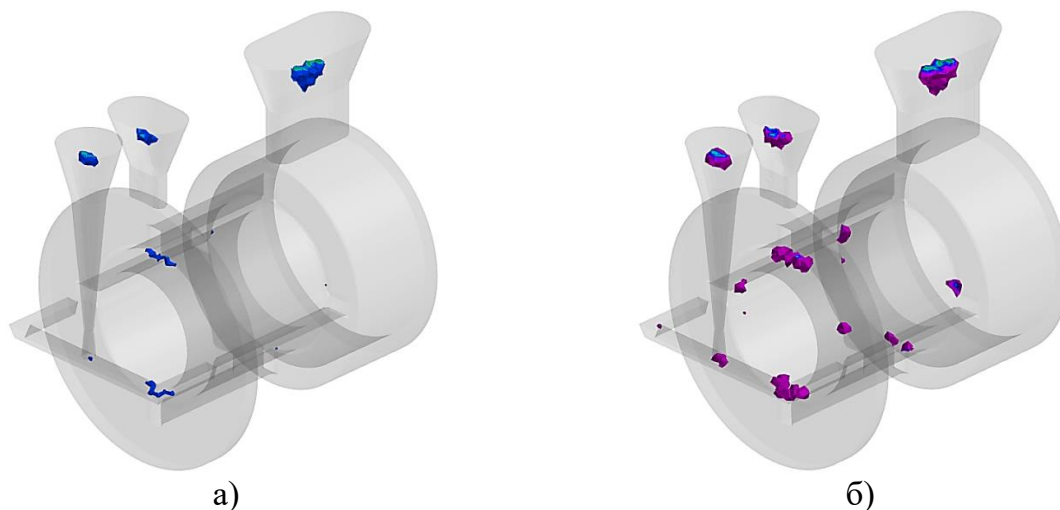


Рисунок 3 – Дефекты в отливке из чугуна с увеличенной прибылью: (а) области с пористостью более 30 %, (б) области с пористостью более 5 %

При дальнейшем увеличении поперечных размеров прибылей максимальное значение пористости в узлах отливки не изменяется. Поэтому необходимо установить внешние холодильники для контроля времени застывания металла на стыке ребер жесткости и стенок заготовки (рисунок 4, а).

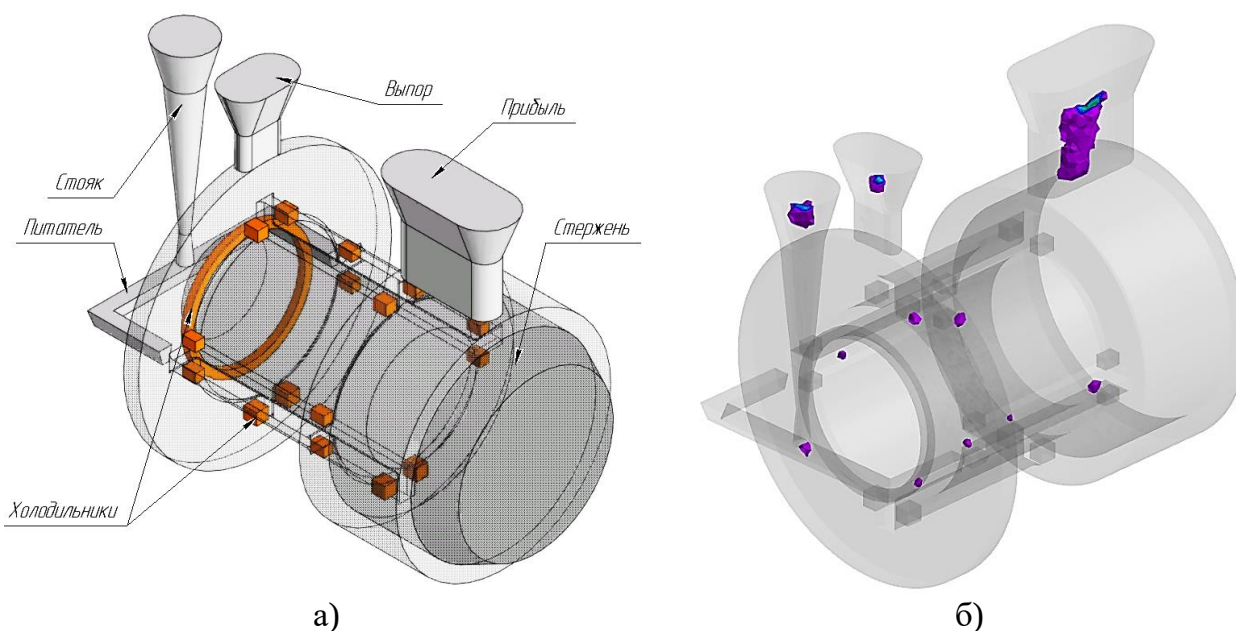


Рисунок 4 – Симуляция с использованием холодильников: Внешний вид заготовки с элементами литейной технологии (а), области с пористостью более 10 % (б)

Результаты и обсуждение

В результате установки внешних холодильников максимальное значение пористости детали в узлах ребер жесткости понизилось до 20 % (рисунок 4, б), а общая пористость отливки составила 2 %. При данном значении локальной пористости предельные напряжения материала и модули упругости уменьшаются в 1,5–2 раза [8,9], что является допустимым, поскольку пористость локализована на участках в несколько миллиметров.

Для проверки влияния сопряжений ребер жесткости с другими поверхностями отливки на максимальные значения пористости было проведено дополнительное моделирование литейных процессов. Однако, изменение формы и толщины ребер, а также их удаление не повлияло на исследуемый показатель, а их отсутствие может привести к уменьшению механических характеристик всей заготовки.

Для дополнительного снижения пористости может быть использовано литье в песчаные формы с большим количеством разъемов или литье под давлением, что обеспечит лучшее заполнение металлом полостей формы.

Заключение

В ходе работы была выполнена симуляция литейных процессов для обнаружения брака в отливках, получаемых при литье в песчаные формы. Проведено исследование на наличие усадочных раковин и определены значения средней и максимальной пористости металла. Применение программного обеспечения ProCast позволило установить места образования дефектов в отливке и снизить локальную пористость в детали на 15–20 % до требуемых значений, обеспечивающих получение качественных отливок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовин, Р.А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Mesh программного продукта ProCast: учеб. пособие / Р.А. Вдовин. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 108 с.
2. Аскон: российское инженерное ПО [Электронный ресурс]. – URL: <https://ascon.ru/products/kompas-3d/> (дата обращения: 03.02.2023).
3. ESIGroup Цифровое производство: [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.esi-russia.ru/products> (дата обращения: 10.02.2023).
4. Медко В.С. Технология конструкционных материалов. Производство заготовок : учеб. пособие / В.С. Медко, М.М. Радкевич, В.П. Третьяков; под ред. В.П. Третьякова. – СПб. : Изд-во ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 218 с.
5. ГОСТ Р 53464-2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. – М.: «Стандартинформ», 2010. – 62 с.
6. Чуркин, Б.С. Конструирование и расчет литниковых систем и прибылей для отливок / Б.С. Чуркин // учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2012. – 214 с.
7. Пуказов, Я. Г. Проектирование детали "шків" и моделирование процесса получения заготовки / Я. Г. Пуказов, В. П. Третьяков // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017. – С. 215-217.
8. Effects of porosity on mechanical properties and corrosion resistances of PM-fabricated porous Ti-10Mo alloy / W. Xu, X. Lu, B. Zhang [et al.]. // Metals. – 2018. – № 8. – P. 188 (1-13).
9. Влияние пористости на упругие характеристики твердых сплавов TiC-TiNi / В.В. Акимов, М.В. Акимов, М.С. Корытов, М.В. Пластинина // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 136–138.

П.А. Шмыкова¹, В.Н. Маликов¹, С.А. Войнаш²

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, osys@mail.ru

²Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Рубцовск, Россия

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация

В представленной работе рассматриваются особенности исследования качества молока с использованием метода импедансометрии. Была разработана методика, опирающаяся на указанный метод, для оценки качества молочных изделий и создан программно-аппаратный комплекс, который обеспечивает возможность анализа качества молочных изделий. Проведенные исследования с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса позволили выявить ряд закономерностей, отличительных для молока различного уровня стоимости - дорогого и дешевого. Эти результаты позволяют делать выводы о возможности использования метода импедансометрии в качестве эффективного инструмента для оценки и сравнения качества молочных продуктов на основе их физико-химических свойств.

Ключевые слова: импедансометрия, молочные продукты, сигнал, программно-аппаратный комплекс, оценка качества.

Введение

Молоко является одним из фундаментальных продуктов питания для человека. В силу своей питательной ценности оно способно заменить любой другой пищевой продукт, в то время как ни один другой продукт не может полностью заменить молоко. Особую ценность молока определяет его способность предоставлять человеку полноценный белок животного происхождения, биологическая ценность которого превосходит все известные белки.

Ценность молока как продукта питания и сырья для молочной промышленности тесно связана с его химическим составом, санитарным состоянием и технологическими свойствами. Высококачественные молочные продукты могут быть получены только из полноценного сырья, то есть молока, которое соответствует установленным стандартам. В настоящее время в стране разрабатывается проект нового ГОСТа на молоко, предназначенное для переработки, который будет соответствовать мировым стандартам. В связи с этим имеет особую практическую и научную значимость комплексная оценка молока, поступающего на переработку.

Этот процесс оценки молока предполагает учет его химических свойств и состава, а также строгий контроль за его санитарным состоянием. Такая комплексная оценка имеет важное значение для обеспечения качества и безопасности производства молочных продуктов, а также для соответствия продукции мировым стандартам [1, 2].

В понятие «некачественное молоко» входят:

- Кислое молоко. Основной причиной поступления молока с повышенной кислотностью является недостаточное охлаждение его у поставщиков.

- Молоко плотностью ниже 1.027 г/см³, что не соответствует требованиям ГОСТа.

- Фальсифицированное молоко.
- Расхождения по содержанию жира и массе молока (свыше 0,1 % между данными производителя и получателя).

В промышленности применяется обширный арсенал приборов, методов и материалов для определения качества молочной продукции. [3,4].

Физико-химические методы, используемые для определения качества молочной продукции, не всегда обеспечивают высокую точность, которую могут достичь инструментальные методы.

Однако в последние годы прогресс в области инструментальных методов анализа, микроэлектронной техники и микропроцессорных программных средств для обработки информации позволяет разрабатывать новое поколение экспресс-анализаторов для контроля состава и качества молока. Такие анализаторы будут сочетать преимущества как физико-химического, так и инструментального подхода, обеспечивая при этом низкую стоимость анализа и высокую точность результатов.

Эффективным и дешевым методом обнаружения фальсификации молока является метод электрической импедансометрии.

Импедансометрия молочных продуктов – метод измерения электрического импеданса молочной среды. Импедансометрия обладает рядом преимуществ, такими как скорость и простота процедуры, что делает этот метод привлекательным для использования в исследованиях и промышленных приложениях.

Цель данной работы состояла в разработке экспериментальной установки для определения качества молочных продуктов с использованием импедансометрии.

Методы

Для исследования зависимости сопротивления биологической жидкости от частоты переменного тока была построена экспериментальная установка, которая позволяет измерить импеданс биологического объекта (рисунок 1).



Рисунок 1 – Принципиальная блок-схема опыта для измерения импеданса биологической жидкости

В цепи использовался реостат (1), который позволял регулировать амплитуду сигнала. Реостат был подключен через две клеммы: нижнюю, связанную с обмоткой, и верхнюю клемму, расположенную на металлическом стержне. При таком подключении реостата ток в цепи проходил по виткам обмотки, а не поперек них через нижнюю клемму. Далее ток проходил через скользящий контакт, затем по

металлическому стержню и снова в цепь. Таким образом, в цепи использовалась только часть обмотки реостата. При перемещении ползунка менялось сопротивление той части обмотки реостата, которая находилась в цепи. Это приводило к изменению длины обмотки, сопротивления и силы тока в цепи.

Этот подход позволял контролировать амплитуду сигнала, изменяя сопротивление в цепи с помощью реостата. Таким образом, исследователи могли проверять зависимость сопротивления биологической жидкости от изменения амплитуды сигнала в различных диапазонах.

Для обеспечения более быстрой диагностики и компактности установки, в электрическую цепь были внесены цифровые устройства, заменяющие некоторые аналоговые приборы. Это позволило получать результаты измерений и графики зависимостей непосредственно на мониторе компьютера или ноутбука.

Для генерации переменного тока был использован ноутбук с установленным специальным приложением, позволяющим регулировать подаваемый сигнал. Это обеспечило более удобное управление напряжением сигнала, который подается на биообъект. При помощи программного интерфейса на компьютере или ноутбуке исследователь мог контролировать и регулировать параметры сигнала, осуществлять его изменение в реальном времени и получать результаты измерений.

Для измерения значения сопротивления резистора в цепи был использован цифровой омметр. Он позволял измерить сопротивление и вывести его значение в главное окно программы на компьютере или ноутбуке. Это обеспечивало удобство и точность измерений, а также возможность автоматической обработки данных.

Таким образом, внедрение цифровых устройств позволило значительно упростить процесс измерений, повысить точность и скорость получения результатов, а также обеспечить более гибкую обработку и анализ данных.

В данной работе для вывода данных использовалась система сбора данных AFSSensorDAQ, которая предназначена для проектов с сенсорным управлением и работает с помощью программного обеспечения NI LabVIEW. SensorDAQ является устройством, которое преобразует аналоговый сигнал в цифровой.

С использованием современного графического языка программирования LabVIEW была разработана графическая программа, которая позволяет управлять программно-аппаратным комплексом. Легко создаваемая лицевая панель пользовательского интерфейса предоставляла возможность интерактивного управления программной системой.

Установка была протестирована в ходе исследования импеданса молочных продуктов с различным содержанием жира и от разных производителей. В процессе эксперимента были измерены импеданс и емкость образцов, и полученные данные выводились на ПК для последующего анализа.

Эксперимент проводился с целью изучения электрических свойств молочных продуктов и их зависимости от состава и производителя. Импеданс является комплексным параметром, который характеризует взаимодействие электрического тока с молоком.

Результаты и обсуждение

Измерения импеданса и амплитуды напряжения сигнала, пропускаемого через образцы молочных продуктов, производились после вскрытия упаковки через 30 минут и повторялись через пять суток. В качестве характеристики, несущей информацию об образце молочной продукции, использовалось стандартное отклонение

действительной части импеданса (активного сопротивления) образцов в ходе сканирования. Сканирование производилось с использованием различных частот: от 300 до 5000 Гц.

На рис. 2-4 представлены результаты исследований образцов, демонстрирующих интересные для практических измерений закономерности. Хорошо заметно снижение уровня импедансометрического сигнала с возрастанием частоты электрического тока. Эта зависимость выполняется для всех видов молока.

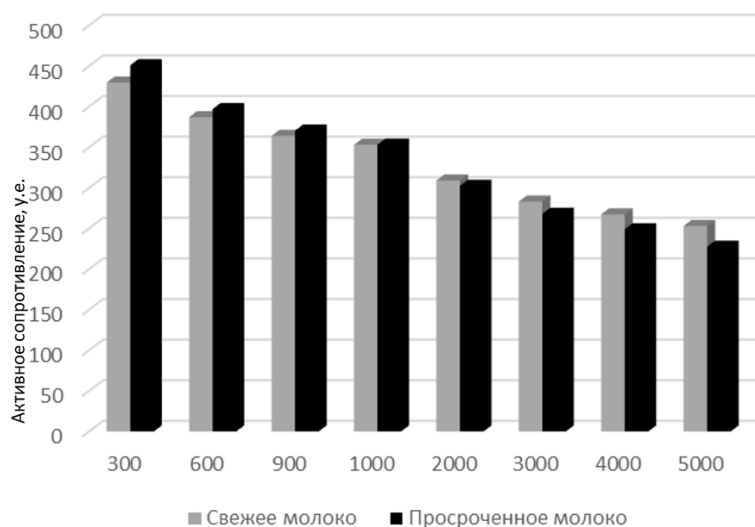


Рисунок 2 – Результаты измерения активного сопротивления образца молока «Безлактозное», жирность – 1,5%, диапазон частоты измерения: 300-5000 Гц

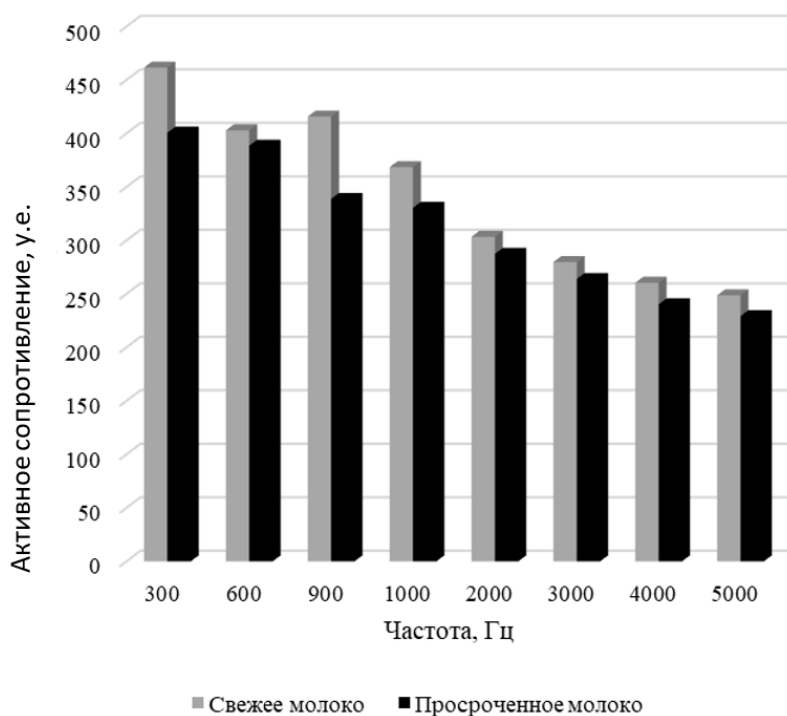


Рисунок 3 – Результаты измерения активного сопротивления образца молока «Домик в деревне», жирность – 3,4%, диапазон частоты измерения: 300-5000 Гц

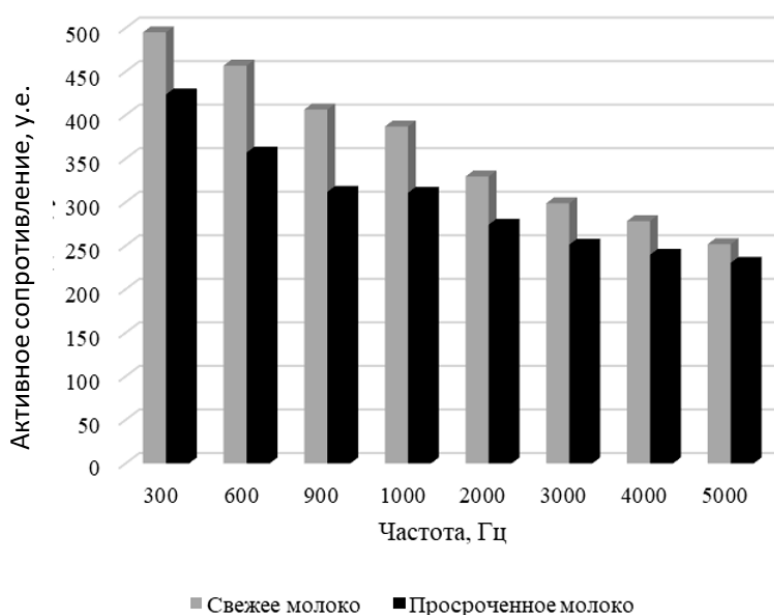


Рисунок 4 – Результаты измерения активного сопротивления фермерского молока, диапазон частоты измерения: 300-5000 Гц

Для фермерского молока очень значительна разница между уровнем сигнала от свежего и просроченного молока практически на всех частотах (в среднем – 11 %). Это свидетельствует о маленьком сроке годности фермерского молока. Молоко производителя «домик в деревне» демонстрирует разницу между уровнем сигнала от свежего и просроченного молока практически на всех частотах (в среднем – 7 %). И, наконец, для безлактозного молока, разница между уровнем сигнала от свежего и просроченного молока, в среднем, составляет 4%.

Заключение

В результате проведенных исследований был изучен метод импедансометрии и его применение для оценки качества молочных изделий. На основе системы сбора данных SensorDaq был разработан программно-аппаратный комплекс, предназначенный для анализа качества молочных продуктов.

Проведенные исследования, осуществленные с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса, позволили обнаружить ряд закономерностей, которые характеризуют различные виды молока. Эти закономерности позволяют предсказать возможность установления связи между импедансометрическим сигналом и показателем жирности молока на основе дальнейших исследований образцов молока одного производителя. В настоящий момент анализ полученных данных позволил лишь выявить различия в импедансе между образцами с разной жирностью и происхождением от различных производителей.

Полученные результаты представляют собой полезную информацию для производства и контроля качества молочных продуктов. Они могут быть использованы для оптимизации производственных процессов, обеспечения стабильного качества продукции и улучшения потребительских характеристик молочных изделий.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития Алтайского государственного университета на 2021-2030 годы в рамках реализации программы

стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», проект «Разработка многопараметровой системы определения качества молочных продуктов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mabrook, M. F. Effect of composition on the electrical conductance of milk / M.F. Mabrook, M.C. Petty // Journal of Food Engineering. – 2003. – V. 60. – P. 321–325.
2. Abrantes, M.R. Fraud in milk: Detection methods and implications for the consumer / M.R. Abrantes, C.S. Campêlo, J.B.A. Silva // Journal of Inst. Adolfo Lutz. – 2014. – V. 73. – P. 244-251.
3. Sadat, A. Determining the adulteration of natural milk with synthetic milk using ac conductance measurement / A. Sadat, P. Mustajab, I.A. Khan // Journal of Food Engineering. – 2005. – V. 77. – P. 472-477.
4. Reddy, D.M. Adulteration of milk and its detection: A review / D. M. Reddy, K. Venkatesh, C. V. S. Reddy // International Journal of Chemical Studies. –2017. – V. 5. – P. 613-617.

Е.А. Назаров
Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия,
mvaa@mil.ru

МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РТК: КОМПОНОВКА СПЕЦВЫЧИСЛИТЕЛЯ, РАЗВЕРТЫВАНИЕ НЕЙРОСЕТИ, ЭКСПЕРИМЕНТ

Аннотация

Автором проведен анализ отечественного вычислителя и предложен алгоритм реализации программного обеспечения (ПО) для развертывания на нем искусственной нейронной сети, рассмотрены некоторые инструменты и технологии, которые целесообразно использовать при этом процессе, проведен практический эксперимент.

Ключевые слова: технологии искусственного интеллекта, интеллектуализация, искусственная нейронная сеть, портация, нейромодуль, вычислитель.

Введение

Область разработок в сфере искусственного интеллекта (ИИ) вызывает сегодня особый интерес. В настоящее время в сложные технические системы (СТС) различного назначения внедряются интеллектуальные решения для обработки массивов данных, управления, в том числе разнородными робототехническими комплексами (РТК). Особое внимание уделяется разработке таких информационно-технических систем машинного обучения, в состав которых входят интеллектуальные модули, связанные с высокотехнологичными СТС [1-4]. Это позволяет не только принимать решения в режиме, близком к реальному времени, но и получать прогнозы, с учетом которых целесообразно осуществлять дальнейшее стратегическое планирование. Следовательно, актуальным становится вопрос построения единой информационно-вычислительной системы машинного обучения (ИВС МО). ИВС МО представляет собой распределенную совокупность организационно и технически связанных: персонала, аппаратных и программных средств, баз данных (знаний), СТС с элементами ИИ и правил их взаимодействия, обеспечивающая обработку и хранение данных, обучение (дообучение), тестирование и портацию. Глобально такая система является базисным интегратором единого информационного пространства (ЕИП), точно – интеллектуальные модули СТС должны состоять из отечественных доверенных нейроморфных платформ – вычислителей. Именно такая платформа и представляется к рассмотрению в качестве примера для использования в интеллектуальных модулях СТС.

Методы

Следует отметить, что развертывание и портация подготовленной нейронной сети на носителе является одним из актуальных направлений развития программной инженерии в области ИИ. Это процесс, в котором создается ПО, позволяющее запускать и использовать нейросеть на конкретном устройстве или платформе. Разработка такого ПО требует точного понимания не только особенностей работы нейросети, но и аппаратных особенностей носителя [5-10].

Перед коллективом авторов стояла задача развертывания нейросети на компактном спецвычислителе, размещенном на носителе (БПЛА коптерного типа), с целью реализации функции детектирования объектов в режиме реального времени на видеопотоке. При этом, требовалось осуществить подготовку как нейросети непосредственно, так и спецвычислителя, характеристики и архитектура ПО, которого заранее не были известны.

В качестве спецвычислителя был предоставлен мезонинный нейромодуль для реализации обученных искусственных нейронных сетей – «NMMezzomini» основу которого составляют модуль «NMCard» и чип «OK3399-Cdevelopmentboard». Представленный нейромодуль разработан компанией Научно-технический центр «Модуль» [11].

Модуль «NMCard» представляет собой спецвычислитель, подключаемый в слот расширения PCIe на материнской плате компьютера. Эффективен для реализации нейронных сетей, решения задач цифровой обработки сигналов и изображений. Модуль разработан на базе процессора NM6408. Совместно с NMCard действует чип OK3399-Cdevelopmentboard – самодостаточный компьютер, собранный на печатной плате, на которой установлены микропроцессор, оперативная память, системы ввода-вывода и другие модули, необходимые для функционирования компьютера.

Оба этих устройства и составили мезонинную структуру – нейромодуль, который размещался на экспериментальном БПЛА коптерного типа (рис. 1). При этом общий вес собранного устройства в защитном коробе с периферией составил 750 г, а мощность энергопотребления при пиковых нагрузках не более 25 Вт.



Рисунок 1 – БПЛА с установленным нейромодулем «NMMezzomini»

Подготовка модели нейросети

Чтобы использовать возможности вычислителя для расчета данных об обнаруженных объектах, необходимо посылать ему сигналы с помощью функций пакета NMDL [11, 12]. NMDL («NeuroMatrixdeeplearning») – комплект программных средств для разработки и реализации глубоких нейронных сетей. Программный модуль NMDL позволяет запускать предварительно обученную глубокую сверточную нейронную сеть на вычислительных модулях на базе микросхем компании «Модуль». NMDL выполняет обработку пользовательских исходных изображений в соответствии с заданной моделью нейросети. В отличие от других технологий машинного обучения,

NMDL обладает модульной структурой, которая позволяет «кастомизировать» и настраивать обработку данных в соответствии с конкретными задачами. Это делает NMDL очень востребованной технологией в области анализа данных и машинного обучения.

В нашем случае использовалась модель нейросети YOLOv5 формата pytorch, которую для работы с NMDL необходимо сконвертировать в формат onnx. Воспользуемся `export.py` для экспорта весов из формата Yolo в формат onnx. Следует обратить внимание, что при экспорте в формате onnx первым аргументом должна быть указана высота `h`, а не ширина `w`: `python3 export.py --weights<path_to_weights> --img h w --include onnx`. Пример вызова этой команды представлен на рисунке 2.

Если конвертация выполнена верно, то визуализация модели в программе Netron будет выглядеть так, как показано на рисунке 3.

```

root@ef3386326e34: /usr/src/app
root@ef3386326e34:/usr/src/app# python3 export.py --weights Projects/best.pt --img 1088 1920 --include onnx
export: data=coco128.yaml, weights=Projects/best.pt, imgsz=[1088, 1920], batch_size=1, device=cpu, half=False, inplace=False, train=False, optimize=False, int8=False, dynamic=False, simplify=False, opset=13, topk_per_class=100, topk_all=100, iou_thres=0.45, conf_thres=0.25, include=['onnx']
YOLOv5 v6.0-0-g956be8e torch 1.9.1+cu102 CPU

Fusing layers...
Model Summary: 213 layers, 1765930 parameters, 0 gradients, 4.2 GFLOPs

PyTorch: starting from Projects/best.pt (5.1 MB)

ONNX: starting export with onnx 1.8.0...
/usr/src/app/models/yolo.py:60: TracerWarning: Converting a tensor to a Python boolean might cause the trace to be incorrect. We can't record the data flow of Python values, so this value will be treated as a constant in the future. This means that the trace might not generalize to other inputs!
  if self.grid[i].shape[2:4] != x[i].shape[2:4] or self.onnx_dynamic:
ONNX: export success, saved as Projects/best.onnx (9.1 MB)
ONNX: run --dynamic ONNX model inference with: 'python detect.py --weights Projects/best.onnx'

Export complete (3.97s)
Results saved to /usr/src/app/Projects
Visualize with https://netron.app
root@ef3386326e34: /usr/src/app#

```

Рисунок 2 – Конвертация модели в формат onnx внутри Docker контейнера.

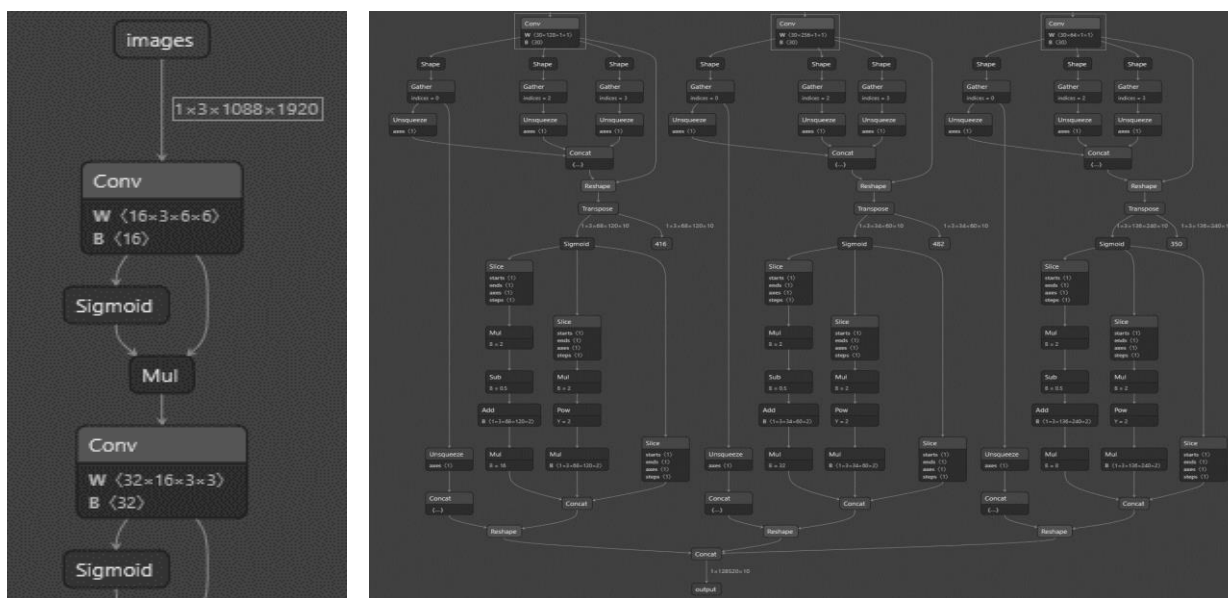


Рисунок 3 – Вход модели (слева) и выход модели (справа)

Далее необходимо узнать имена трех последних сверток. Местонахождение последней свертки и ее имени в программе Netron можно видеть в разделе OUTPUTS. В нашем случае это name: 392.Ниже приведен листинг кода программы для конвертации onnx весов в формат, необходимый NMDL. В переменную `output_names` записываются имена трех последних сверток.

```

import onnx
from onnx.tools import update_model_dims
from onnxsim import simplify
input_path = '1088x1920_yolov5n.onnx'
output_path = '1088x1920_yolov5n_modified.onnx'
input_names = ['images']
output_names = ['392', '458', '326']
BATCH = 1
CHANNEL = 3
HEIGHT = 1088
WIDTH = 1920
onnx.checker.check_model(input_path)
model = onnx.load(input_path)
e = onnx.utils.Extractor(model)
extracted = e.extract_model(input_names, output_names)
onnx.checker.check_model(extracted)
static_length_model = update_model_dims.update_inputs_outputs_dims(extracted,
{input_names[0]: [int(BATCH), int(CHANNEL), int(HEIGHT), int(WIDTH)]},
{output_names[0]: ['B', 'C', 'H', 'W'], output_names[1]: ['B', 'C', 'H', 'W'], output_names[2]:
['B', 'C', 'H', 'W']})
onnx.checker.check_model(static_length_model)
model_simp, check = simplify(static_length_model)
assert check, "Simplified ONNX model could not be validated"
# Save the ONNX model
onnx.save(model_simp, output_path)

```

Алгоритм работы программы

Исходя из вышеизложенного, алгоритм работы программы для развертывания нейросети на нейромодуле «NMMezzomini» пошагово будет иметь следующую последовательность.

1. Конвертация модели нейронной сети в вид, пригодный для использования в пакете nmdl.
2. Инициализация модели, параметров, входного видеопотока.
3. Параллельный запуск функции захвата потока, функции вычисления данных об обнаруженных объектах, функции постобработки.
4. Подача сигнала на функцию захвата потока для сохранения актуального кадра.
5. Конвертация кадра в массив битов, пригодный для использования в функции вычисления данных об обнаруженных объектах. Сохранение копии кадра для последующей постобработки. Подача сигнала и массива битов в функцию вычисления данных об обнаруженных объектах.
6. Постобработка кадра, вывод полученного изображения на экран, сохранение обработанного изображения.
7. Конвертация серии полученных изображений в видеоролик.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 4. Выделенные области выполняются параллельно в циклах, ожидая получение сигнала-директивы от другой области.

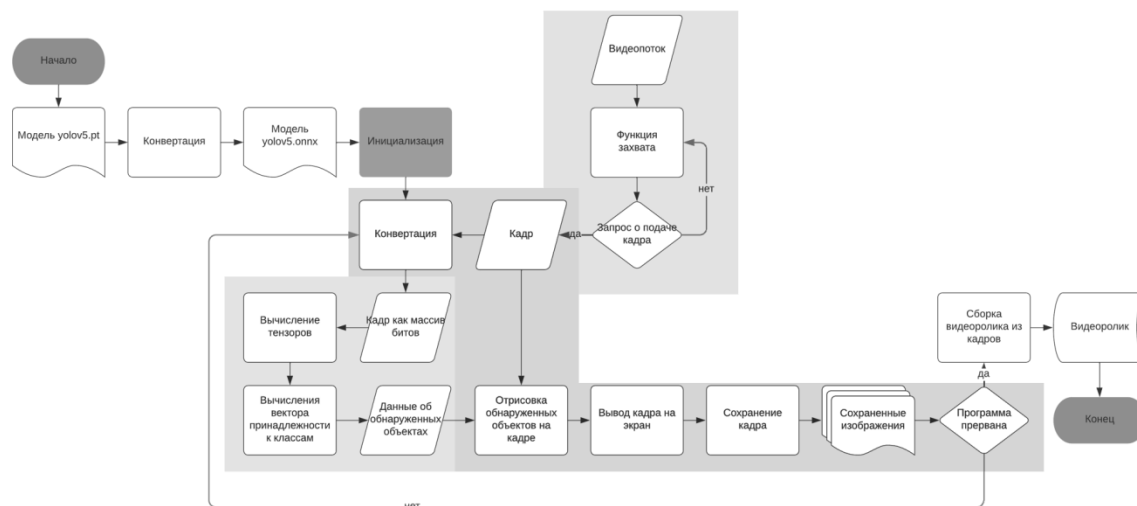


Рисунок 4 –Алгоритм работы программы

В качестве видеопотока может использоваться как веб-камера, так и видеоролик. Скрипт конвертации запускается в подпроцессе. Постобработка изображения запускается в потоке. Скрипт конвертации представляет собой bash-скрипт, запускающий программу пакета NMDL «nmdl_image_converter_console». Функция вычисления данных об обнаруженных объектах написана на языке C++. Оставшаяся часть программы написана на языке python. Программа завершается путем ввода комбинации Ctrl+C, что посылает процессу сигнал SIGINT, тем самым завершая его. После этого автоматически запускается область кода, которая отвечает за завершение всех подпроцессов, закрытие файлов и создание видео.

Результаты и обсуждение

Как можно видеть на рисунке 5, по результатам, выведенным на консоли, время, затрачиваемое на выполнение запущенных в потоке конвертации и аннотации (Conv/Annot) не сильно отличается от времени выполнения постпроцессинга изображений. Так как конвертация следующего кадра и отрисовка предыдущего выполняются параллельно постпроцессингу, такая структура при выполнении программы значительно повышает производительность в отличие от последовательного выполнения этих областей кода. Практические эксперименты для проверки работоспособности ПО на вычислителе, а также проверки функционирования непосредственно связки ПО – вычислитель – полезная нагрузка – БПЛА проводились на открытой местности в светлое время суток. Целью экспериментов предполагалось протестировать работоспособность предобученной ИНС по детектированию отдельных объектов в рамках предоставляемого аппаратного обеспечения в условиях аэрофотосъемки с воздуха [13]. После проведения подготовительных мероприятий (подключения камеры GoPro к бортовому компьютеру и активации нейросети) произведена подготовка и запуск БПЛА с выполнением сценария «Обнаружение объектов - людей». Высота съемки составляла от 50 до 100м. Кадры, обработанные нейросетью, развернутой на вычислителе, в режиме реального времени, показаны на рисунке 6.

```

pc_module@NM-Vision:/opt/nmdl/process_stream$ python3 main.py
Successful conversion!
Main program has been started.
Saving frame...
Query library version...
Lib version: 5.6.2
Board detection...
Detected boards: 1
NMDL initialization...
Use multi unit...
CURRENT TIME -- 1.2
Performing conversion...
Get model information...
Input tensor number: 1
Input tensor 0: 1920, 1088, 3
Output tensor number: 3
Output tensor 0: 240, 136, 30
Output tensor 1: 120, 68, 30
Output tensor 2: 60, 34, 30
Reserve outputs...
Prepare inputs...
Process input...
NMDL Process -- 0.6 SEC 1.7 FPS
Successful conversion!
Total boxes: 6
Postprocess -- 1.4 SEC
conv/Annot -- 1.47 SEC; 0.68 FPS.

Frame has been processed.
Image has been annotated.

Saving frame...
Prepare inputs...
frames/127/1.jpeg
CURRENT TIME -- 3.6
Performing conversion...
Process input...
NMDL Process -- 0.59 SEC 1.7 FPS
Successful conversion!
Total boxes: 1
Postprocess -- 1.3 SEC
conv/Annot -- 1.16 SEC; 0.86 FPS.

```

Рисунок 5 – Вывод консоли



Рисунок 6 – Обработанные кадры видео с камеры БПЛА

В результате эксперимента точность детектирования объектов составила от 68 до 89%. При этом имелись ложные срабатывания (около 8% от всей выборки объектов, находящихся на местности) и случаи не детектирования объектов. Исходя из этого уверенность срабатывания нейросети составила диапазон от 36 до 82%.

Заключение

Таким образом, задача по разработке ПО для выполнения системы автоматического детектирования объектов интереса по данным видеопотока и его развертка на отечественном вычислителе была выполнена. Алгоритм работы программы выполняется достаточно эффективно благодаря запуску функций в потоках и мультипроцессингу [14]. Полученное ПО возможно масштабировать добавлением дополнительных алгоритмов, таких, как кластеризация и ранжирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасюк, Д. П. Типологизация факторов, обуславливающих создание системы управления полным жизненным циклом ракетного комплекса сухопутных войск / Д. П. Гасюк, В. А. Дубовский, Н. И. Дубовская // Актуальные проблемы защиты и безопасности : труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН, Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2020 года / Российская академия ракетных и артиллерийских наук. Том 4. – Санкт-Петербург: Б. и., 2020. – С. 108-115.
2. Оптимизационная модель формирования решений по развитию системы робототехнических комплексов военного назначения / В. Г. Анисимов, А. М. Ковальчук, А. М. Сазыкин, С. Ю. Сысуев // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2022. – № 9-10(171-172). – С. 13-19.
3. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств / В. Г. Анисимов,

Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин [и др.]. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2015. – № 648. – С. 6-12.

4. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности / П. Д. Зегжда, А. Ф. Супрун, В. Г. Анисимов [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 4. – С. 45-49.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665343 Российская Федерация. «Программное обеспечение для автоматизированного управления беспилотными летательными аппаратами "Посыльный"»: № 2023617645 : заявл. 21.04.2023 : опубл. 14.07.2023 / Е. А. Назаров, Б. Г. Лещенко, С. Н. Салтыков [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА».

6. Гасюк, Д. П. Актуальные вопросы развития системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии вооруженных сил Российской Федерации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2022. – № 2(17). – С. 81-88.

7. Indices of the effectiveness of information protection in an information interaction system for controlling complex distributed organizational objects / V. G. Anisimov, P. D. Zegzhda, E. G. Anisimov [et al.]. // Automatic Control and Computer Sciences. – 2017. – Vol. 51, No. 8. – P. 824-828.

8. Анисимов, В. Г. Методологический подход к развитию системы робототехнических комплексов военного назначения / В. Г. Анисимов, А. М. Ковальчук, А. Е. Романюта // Вестник Академии военных наук. – 2022. – № 1(78). – С. 120-125.

9. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин [и др.]. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 1-2(79-80). – С. 44-53.

10. Назаров, Е. А. Концептуальные взгляды на разработку специализированного программного обеспечения модели системы управления техническим состоянием / Е. А. Назаров // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : Труды одиннадцатой общероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2018 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2019. – С. 249-253.

11. АО НТИЦ «Модуль» более 30 лет успешно работает на российском рынке наукоемких технологий [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.module.ru/company/about>(дата обращения 05.10.2023).

12. Портативный компьютер NMVision [Электронный ресурс]. 2023. – URL: <https://www.module.ru/products/4-programmno-apparatnye-kompleksy-pak/neuromatrix-deep-learning> (дата обращения 06.10.2023).

13. Способ определения реальных координат наблюдаемого объекта в условиях высокотехнологичных конфликтов / Е. А. Назаров, В. П. Тресков, А. В. Колузов, И. А. Хорошев // Физическое образование в ВУЗах. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 116-122

14. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин, В. А. Косова, А. А. Романов // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 10-18.

В.В. Ларькин^{1,2}, В.Л. Хрулев², А.С. Ерюшев², М.В. Левицкий², А.А. Иванов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, valentin_larkin@mail.ru

²Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

В статье проведен сравнительный анализ и выбор методов поиска решений слабоструктурированных задач управления эксплуатацией сложных технических систем. Выбор методов поиска решений слабоструктурированных задач управления эксплуатацией сложных технических систем привел к выводу о том, что многоэтапность реальных слабо структурированных задач управления эксплуатацией СТС требует при поиске необходимой совокупности шагов для решений задачи применять метод редукции, сущность которого сводится к решению составляющих подзадач. При представлении задачи в семиотической системе в виде теоремы каждая из подзадач представляется в виде одного из условий теоремы.

Ключевые слова: система управления, эксплуатация, слабоструктурированные задачи.

Введение

Под процессом решения задачи управления понимается поиск рациональных путей достижения соответствующей цели (целей) при условии учета имеющихся возможностей и ограничений на ресурсы. Следует отметить двойственность понятия «решение» – решение, как процесс, и решение, как результат. В смысле решения, как результата поиска средств достижения поставленной цели, следует различать допустимые, оптимальные и рациональные решения. Допустимые обеспечивают достижение цели. Оптимальные – достижение цели с минимальными затратами ресурсов в определенных условиях. Рациональные позволяют достичь цель в заранее неизвестных условиях, экономя при этом имеющиеся ресурсы [1-5].

В соответствии с иерархической структурой слабо структурированной задачи управления в ней выделяют ряд формализуемых и неформализуемых этапов (подзадач). В зависимости от модели формализуемой подзадачи и метода поиска решения можно получить все три типа решений. При этом оптимальное решение можно получить только для монокритериальной задачи. В других постановках получают допустимое или, в лучшем случае, рациональное решение. Для неформализуемых этапов можно вести речь только о рациональном и допустимом решении. Таким образом, для слабо структурированной задачи, как комплекса составляющих ее подзадач, существуют только два типа решения: рациональное и допустимое.

Стремление к выбору наиболее целесообразного способа применения сил и средств выдвигает требования выбора такого метода поиска решения, который соответствовал особенностям слабо структурированных задач управления в предметной области управления эксплуатацией СТС и позволял получать

рациональные решения.

Методы

Задачу поиска решений можно сформулировать в общем виде так: пусть исходная задача описывается тройкой (S, F, T) , где S – множество начальных состояний; F – множество операторов, отображающих одни состояния в другие; T – множество целевых состояний. В интерпретации к задачам управления эксплуатацией СТС элемент множества S может означать уровень технической готовности образца СТС до воздействия, элемент множества T – конечное состояние образца СТС после воздействия, множество F включает способы воздействия на техническую готовность образца СТС.

Решение задачи заключается в нахождении последовательности операторов $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_k$ ($f_i \in F$), которые преобразуют начальные состояния в целевые. Известно несколько методов решения подобной задачи: методы перебора; эвристические методы поиска; дедуктивные методы; методы поиска в больших пространствах состояний; метод редукции; методы поиска в условиях неопределенности и др [6-10].

Для задач небольшой размерности применяют методы перебора: поиск в глубину, поиск в ширину, поиск на основании сходимости дуг. Достоинствами этих методов относятся простота их реализации и возможность в принципе находить решение, если оно существует. Однако поиск в глубину и поиск в ширину дают допустимое решение и могут применяться для решения задач классификации в условиях определенности, когда между любыми двумя классами существует различие (т. е. принимается гипотеза о компактности классов ситуаций). Причем для моделей, представленных с помощью логической системы, наиболее естественным является поиск в глубину. Сущность метода поиска на основании сходимости дуг заключается в том, что каждой дуге (оператору) ставится в соответствие некоторая стоимость, позволяющая получить интегральную оценку варианта решения, что дает возможность выбора рационального решения.

Практически для всех задач управления эксплуатацией СТС имеет смысл использовать эвристические методы поиска решений. При решении неформализуемых задач должностное лицо органа управления применяет определенные правила (эвристики), позволяющие выбрать наиболее удачное решение, не производя полный перебор. Формализация этих правил в СБЗ позволит сократить объем просматриваемых вариантов решений.

Для определения направления поиска используется мера f , называемая оценочной функцией, и позволяющая получить оценку перспективности вершины или пути, где эта вершина находится. Для ее использования необходимо иметь большой объем знаний о предметной области эксплуатации СТС и тщательный анализ пространства состояний. Однако на практике ее применение не всегда оправдано. Это связано с тем, что для нахождения значения оценочной функции требуются значительные объемы вычислений, и это не позволяет эффективно вести поиск решения.

Другая, очень эффективная, эвристика заключается в соответствующей организации правил в базе знаний, позволяющей использовать в первую очередь часто применяемые правила. В большинстве случаев это обеспечивает существенное уменьшение количества шагов при поиске вариантов решений [11-15].

Особенностью моделей слабо структурированных задач управления, реализуемых с помощью СБЗ, является возможность применения дедуктивных

методов поиска решения. К ним относятся прямой вывод, обратный вывод и различные модификации метода резолюций. Как показывает опыт разработки СБЗ для моделирования задач управления эксплуатацией СТС, применение в качестве механизма поиска решения обратного вывода позволяет создавать системы с легко модифицируемой базой знаний. Это существенно для представления задачи управления в виде семиотической системы.

Наиболее эффективный из дедуктивных методов - метод резолюций. Его идея заключается в переводе логических утверждений в дизъюнктивную форму и проверке наличия в множестве S (т. е. в множестве конечных состояний) ложного дизъюнкта. Если S содержит пустой дизъюнкт, то решения задачи нет. Его основной недостаток – экспоненциальный рост числа правил, используемых для описания задачи – не позволяет применять данный метод для задач с большим пространством поиска.

Для больших проблемных областей следует применять методы поиска в больших пространствах состояний. Их сущность заключается в генерации неполных решений, соответствующим описаниям различных подпространств, проведении оценочных процедур и отсеке целых классов недопустимых полных решений. Для перспективного неполного решения вырабатываются полные решения и определяется, являются ли они целевыми. Эти методы применимы для построения моделей задач и нахождения их решения в интегрированной системе моделирования задач управления эксплуатацией СТС [16-22].

Данные и знания, с которыми приходится иметь дело при решении задач управления эксплуатацией СТС, редко бывают абсолютно точными и достоверными. Модель оперирования с неточными данными и знаниями включает две составляющие: язык представления неточности и механизм вывода на неточных знаниях. Для построения языка необходимо выбрать форму представления неточности (скаляр, интервал, распределение, лингвистическое выражение, множество) и предусмотреть возможность приписывания меры неточности всем высказываниям.

Результаты и обсуждение

Анализ используемых схем учета неопределенности в реальных интеллектуальных системах показал, что в условиях дефицита времени на принятие решения в качестве формы представления неточности следует применять скалярную величину – коэффициент неопределенности. Он показывает степень достоверности фактов и импликаций. Как правило, для численного выражения коэффициента неопределенности применяют интервал чисел от -1 до $+1$. Главное преимущество его использования заключается в простоте механизма получения оценки достоверности решения.

Для разработки модели неточного вывода в дедуктивной системе необходимо задать функции пересчета, позволяющие вычислить: а) меру неточности x антецедента правила по мерам неточности x_i составляющих его высказываний: $x=f(x_1, \dots, x_n)$; б) меру неточности y консеквента правила по мерам неточности правила (r) и посылки правила (x): $y=h(r, x)$; в) объединенную меру неточности высказывания A по мерам, полученным из правил, консеквентом которых является A : $y^0=g(y_1, \dots, y_m)$.

Предлагаемая модель неточного вывода включает следующие элементы.

1. Модель

$$x=f(x_1, \dots, x_n): \quad x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где p – количество посылок в антецеденте правила; x_i – коэффициент определенности каждой посылки (факта). При этом будем полагать, что антецедент правила состоит их конъюнкции посылок. В противном случае правило разбивается на ряд правил, соответствующих названному условию. Даже при отсутствии у системы знаний о какой-либо посылке такая схема позволяет не отвергать правило, а только снижать его достоверность.

2. Модель

$$y = h(r, x): y = x \cdot r. \quad (2)$$

3. Модель $y^0 = g(y_1, \dots, y_m)$ позволяет объединить силы нескольких правил, подтверждающих или опровергающих одну и ту же гипотезу:

$$\begin{aligned} \text{для двух} & & y^0 &= y_1 + y_2 - y_1 \cdot y_2; \\ \text{правил:} & & & \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{для трех} & & y^0 &= y_1 + y_2 + y_3 - y_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot y_3 - y_2 \cdot y_3 + y_1 \cdot y_2 \cdot y_3. \\ \text{правил:} & & & \end{aligned}$$

Это выражение представляет собой функцию, в которой два коэффициента определенности преобразуются в один больший, чем исходные, но не превышающий единицы. Подобную формулу можно записать для любого количества правил. Ее суть заключается в формировании произведений из базисных коэффициентов определенностей правил и в сложении и вычитании этих произведений соответствующим образом. Каждая двойная комбинация коэффициентов определенностей вычитается, тройная – прибавляется, четвертная – вычитается и так далее до тех пор, пока все правила не будут использованы совместно.

Таким образом, при использовании мер неточности целесообразно выводить одно и то же утверждение различными путями (с последующим объединением значений неточности), что совершенно бессмысленно в традиционной дедуктивной логике.

Многоэтапность реальных слабо структурированных задач управления эксплуатацией СТС требует при поиске необходимой совокупности шагов для решений задачи применять метод редукции, сущность которого сводится к решению составляющих подзадач. При представлении задачи в семиотической системе в виде теоремы каждая из подзадач представляется в виде одного из условий теоремы. Так, например, задача планирования эксплуатации группы СТС может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} & \text{выбор_задач_по_важности} \quad (\text{Исходный_список_задач}, \quad \text{Список_задач_по} \\ & \text{важности}) \ \& \\ & \text{выбор_воздействия} \quad (\text{Список_возможных_вариантов_воздействий}, \quad \text{Список} \\ & \text{средств_воздействия}, \\ & \text{распределение}(Y)) \rightarrow \\ & \text{планирование_эксплуатации} \quad (\text{Исходный_список_задач}, \quad \text{Список_средств} \\ & \text{воздействия}, Y). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь *распределение* (Y) – предикат, отвечающий за подключение расчетного модуля программы; Y – оптимальный план распределения. Поиск решения происходит путем доказательства условий теоремы, каждое из которых, в свою очередь, также является теоремой. Процесс редукции, связанный с доказательством теорем, будет происходить до тех пор, пока не будет установлена разрешимость или неразрешимость исходной задачи. Этот метод органично сочетается с особенностями слабо структурированных задач, которые состоят из ряда формализуемых и неформализуемых процедур обработки информации.

Заключение

С учетом того, что современные ЭВМ, устанавливаемые сегодня на СТС, оснащены обычным вычислительным процессором, рассмотренные методы поиска решений слабо структурированных задач управления, модели которых представлены в виде семиотической системы, практически полностью исчерпывают весь перечень возможных для реального применения методов. Как показал анализ, для решения задач рассматриваемого класса следует комбинировать дедуктивные, эвристические методы и метод учета неточности под общим управлением метода редукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия / Ю. В. Ведерников, А. Ю. Гарькушев, В. Г. Анисимов [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2014. – № 5-6(71-72). – С. 61-72.
2. Математические методы и инструментальные средства оценивания эффективности инвестиций в инновационные проекты / И. В. Ильин, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов [и др.]. – Санкт-Петербург : Информационный издательский учебно-научный центр "Стратегия будущего", 2018. – 289 с.
3. Анисимов, В. Г. Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии : Монография / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, В. А. Самоленков; Военная академия генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. – Москва : Военная академия генерального штаба, 2008. – 180 с.
4. Черныш, А. Я. Концепция построения теории таможенного дела / А. Я. Черныш, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2009. – № 3. – С. 5-11.
5. Анисимов, В. Г. Модификация метода решения одного класса задач целочисленного программирования / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1997. – Т. 37, № 2. – С. 179-183.
6. Кузьменко, А. А. Методика обоснования рациональной трудоемкости технологического процесса на сборочном участке / А. А. Кузьменко, Д. П. Гасюк // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 434-439.
7. Гасюк, Д. П. К вопросу ценообразования процессов создания образцов ракетно - артиллерийского вооружения в условиях государственного оборонного заказа / Д. П. Гасюк, И. Д. Казенов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : Труды III Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16 февраля 2018 года. Том 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного" Министерства обороны Российской Федерации, 2018. – С. 268-272.
8. Повышение эффективности технологического процесса сборки на основе имитационного моделирования / И. Н. Хрусталева, Д. П. Гасюк, Л. Г. Черных [и др.]. // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 147-152.

9. Анисимов, В. Г. Оптимизационная модель распределения возобновляемых ресурсов при управлении экономическими системами / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2007. – № 1. – С. 49-54.
10. Анисимов, В. Г. Алгоритм ресурсно-временной оптимизации выполнения комплекса взаимосвязанных работ / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2013. – № 1. – С. 080-087.
11. Назаров, Е. А. Концептуальные взгляды на разработку специализированного программного обеспечения модели системы управления техническим состоянием / Е. А. Назаров // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : Труды одиннадцатой общероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2018 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2019. – С. 249-253.
12. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности / П. Д. Зегжда, А. Ф. Супрун, В. Г. Анисимов [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 4. – С. 45-49.
13. Гасюк, Д.П. Информационное обеспечение процесса обоснования требований к уровню унификации продукции / Д.П. Гасюк, И.Н. Филатов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2007. – Т. 1. – С. 15-18.
14. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А. В. Тебекин, Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4, № 11. – С. 30-38.
15. Методика оценки показателей качества информационных систем / А. Ю. Гарькушев, А. В. Курилов, А. Ф. Супрун, Д. П. Гасюк // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 3. – С. 56-61.
16. Гасюк, Д. П. Способы обоснования затрат на эксплуатацию и ремонт ракетно-артиллерийского вооружения в условиях выполнения государственного оборонного заказа / Д. П. Гасюк, И. Д. Казенов // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : ТРУДЫ IV МЕЖВУЗОВСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Санкт-Петербург, 06 февраля 2019 года. Том 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного" Министерства обороны Российской Федерации, 2019. – С. 269-273.
17. Гасюк, Д. П. Актуальные вопросы развития системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии вооруженных сил Российской Федерации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2022. – № 2(17). – С. 81-88.
18. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин, В. А. Косова, А. А. Романов // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 10-18.
18. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Г. А. Ботвин [и др.] ; Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; В. Г. Анисимов. – Москва : Военная академия Генерального штаба Вооружённых сил Российской Федерации, 2006. – 288 с.

19. Учет неопределенности при формировании планов инновационного развития военно-промышленного комплекса / С. В. Чварков, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Т. Н. Сауренко // Актуальные вопросы государственного управления Российской Федерации : Сборник материалов круглого стола, Москва, 22 августа 2018 года / Военная академия генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации, Военный институт (Управления национальной обороной). – Москва: Военная академия генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации, 2018. – С. 17-25.

20. Модели организации и проведения испытаний элементов системы информационного обеспечения применения высокоточных средств / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Д. А. Бажин [и др.]. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2015. – № 648. – С. 6-12.

21. Гасюк, Д. П. Проблема обоснования облика системы управления полным жизненным циклом ракетного комплекса сухопутных войск / Д. П. Гасюк, В. А. Дубовский, А. В. Гурьянов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2020. – № 2(112). – С. 29-33.

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 621.83

А.В. Козленок, С.И. Худорожков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, kozlenok.a.v@gmail.com

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ КЛИНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КЛИНОВЫХ МУФТ СВОБОДНОГО ХОДА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

Аннотация

В работе предложен способ модификации клиньев муфт свободного хода с дополнительной кинематической связью (Благоднарова А. А.) с целью увеличения эффективности их функционирования. При помощи лабораторного эксперимента был испытан ряд образцов имеющих модификации поверхности, полученные благодаря применению аддитивных технологий. В результате проделанной работы было определено влияние расположения пористых структур на характеристики муфты свободного хода. Анализ данных, полученных в результате эксперимента, показал, что расположение предложенных пористых структур на обеих рабочих поверхностях клина позволяет снизить длительность фазы заклинивания и увеличить быстроходность без потери нагрузочной способности муфты.

Ключевые слова: муфта свободного хода, моделирование трения, режимы смазки, аддитивные технологии.

Введение

В настоящее время механизмы и муфты свободного хода (МСХ) нашли применение практически во всех отраслях машиностроения [1, 2]. Однако применение МСХ в перспективных автомобильных передачах требует одновременно высокой нагрузочной способности и быстроходности [3]. Для передачи высоких крутящих моментов с высокой частотой нагружения, как правило, применяют муфты, использующие низшие кинематические пары [4,5] (клиновые, кулачковые), в т. ч. клиновые механизмы свободного хода с дополнительной кинематической связью (далее — клиновые МСХ). Однако, в силу высокой инерционности и низкой эффективности отвода смазочных материалов клиновые МСХ с дополнительной кинематической связью не могут обеспечить требуемой быстроходности. Соответственно, внедрение таких МСХ в перспективные передачи и трансмиссии требует их глубокой модернизации, а также применения новейших технологий для изготовления их компонентов.

Методы

Для моделирования факторов, ограничивающих характеристики клиновых МСХ, была разработана многоуровневая математическая модель в пакете программ *MatLabSimulink* и *Simscape* [6]. В качестве рассматриваемой клиновой МСХ была принята модифицированная клиновая муфта с дополнительной кинематической связью № 8 из монографии А. А. Гончарова [2]. С целью увеличения чувствительности МСХ к изменению указанных выше параметров был увеличен угол заклинивания до 9,59 градуса (МСХ стала более склонна к проскальзыванию). Предложенная математическая модель позволила исследовать чувствительность клиновой МСХ к изменению коэффициента трения (и его поведения от скорости проскальзывания), передаточного числа кинематической пары, жесткости прижимной пружины и скорости отвода смазочных материалов из контактов трения. Как показало исследование, модель клиновой МСХ имеет наибольшую чувствительность к изменению коэффициента трения и скорости отвода смазочных материалов. Однако стоит отметить, что увеличение коэффициента трения не приводит к увеличению эффективности нормально функционирующего образца в силу того, что исходный коэффициент трения уже обеспечивает самоторможение МСХ. В то же время увеличение эффективности отвода смазочного материала показало значительное снижение длительности фазы заклинивания, что существенно увеличивало рабочий ход МСХ и ее цикловой КПД. Соответственно, можно сделать вывод, что дальнейшее исследование модификаций поверхности клиньев МСХ является перспективным направлением.

Для подтверждения результатов математического моделирования были изготовлены металлические образцы клиньев с различными модификациями поверхности. Ниже на рисунке 1 показаны два наиболее перспективных образца (клинья “В” и “С”), а также базовый образец (клин “А”), выполненный по той же технологии в качестве образца для сравнения [7]. Как можно видеть из рисунка, клинья “В” и “С” имеют цилиндрические поры, способствующие отводу смазочного материала с поверхности во внутренние сквозные каналы. Изготовление предложенных конструкций потребовало применения аддитивных технологий, которые позволили обеспечить как сами пористые структуры, так и сложную внутреннюю архитектуру образцов.

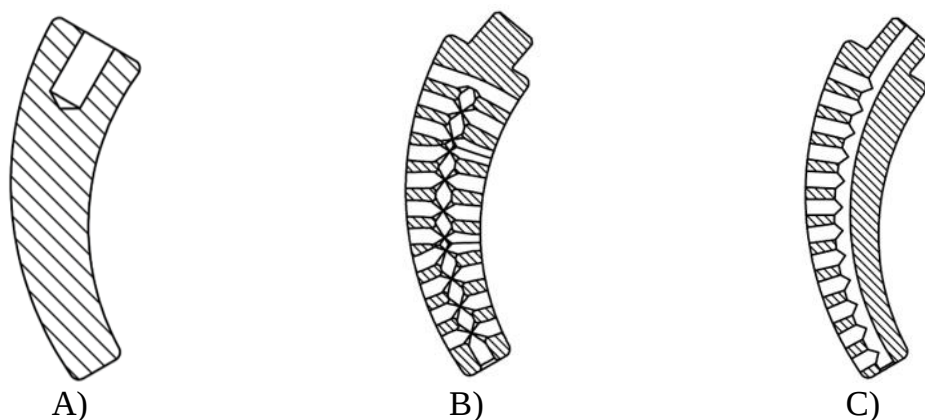


Рисунок 1 – Изготовленные образцы клиньев МСХ: А) без модификаций, В) с пористыми структурами на обеих рабочих поверхностях, С) с пористыми структурами на поверхности, контактирующей с ведомой обоймой

Каждый из представленных образцов был испытан на лабораторном стенде, позволяющем регистрировать крутящий момент нагрузки, а также положение и частоту вращения ведущего и ведомого элементов МСХ. Исследование проводилось в диапазоне частот работы МСХ от 0 до 4.5 Гц (с шагом 0.9 Гц). Ограничение частотного диапазона испытаний обосновано тем, что геометрия исследуемой МСХ имеет тенденцию к проскальзыванию и на частотах выше 3.6 Гц базовый клин “А” не мог обеспечить стабильную работу. Нагрузочный диапазон был выбран исходя из жесткости конструкции МСХ и составлял от 0 до 20 Нм (с шагом 4 Нм). Диапазон был выбран исходя из того, что превышение порога нагрузки в 24 Нм приводило к незначительным деформациям оси ведущего вала МСХ, и смещению оси датчика крутящего момента, что снижало достоверность результатов измерения [8]. Соответственно, каждый из клиньев был испытан в двадцати пяти экспериментах.

Результаты и обсуждение

Одной из наиболее показательных характеристик МСХ является длительность фазы рабочего хода (в цикле заклинивание — рабочий ход — расклинивание — холостой ход). При фиксированной амплитуде колебаний ведущего вала рабочий ход МСХ характеризует эффективность ее работы. В рамках исследования, положение ведомого и ведущего элементов МСХ было записано с частотой 2000 Гц, а результирующая величина рабочего хода рассчитывалась как среднее значение по десяти рабочим циклам. На рисунке 2 приведен график зависимости рабочего хода от частоты работы МСХ и крутящего момента нагрузки для трех рассматриваемых образцов.

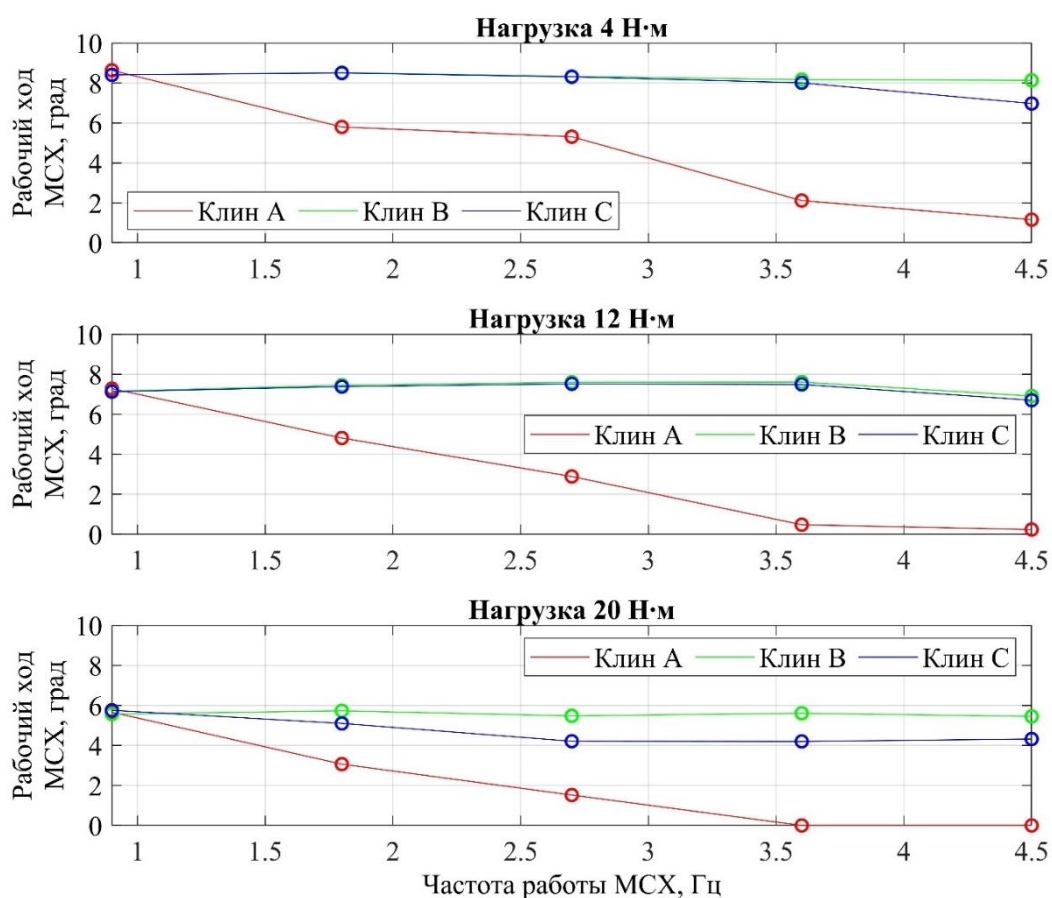


Рисунок 2 – График зависимости рабочего хода клиновой МСХ от частоты работы и крутящего момента нагрузки

Как можно увидеть из графика, величина рабочего хода клиновой МСХ падает как при росте частоты работы, так и при росте крутящего момента нагрузки. Стоит отметить, что при равных рабочих условиях, длительность фазы рабочего хода МСХ, оснащенной клином “А”, существенно ниже, чем при оснащении модифицированными образцами. Данное явление вызвано тем, что с ростом частоты работы и нагрузки, МСХ оснащенная клином “А” с меньшей эффективностью отводит смазочные материалы. Низкая эффективность отвода смазочных материалов приводит к существенному удлинению фазы заклинивания, тем самым снижая длительность фазы рабочего хода и величину рабочего хода МСХ. Также, важно отметить, что рабочий ход МСХ оснащенных клиньями “В” и “С” не снижался до нуля, а значит, что применение клиньев с пористыми структурами позволяет расширить как скоростной, так и нагрузочный диапазон МСХ.

С целью выявления корреляции между падением рабочего хода МСХ и повышением частоты работы или повышением крутящего момента нагрузки, график на рисунке 2 был преобразован в график на рисунке 3.

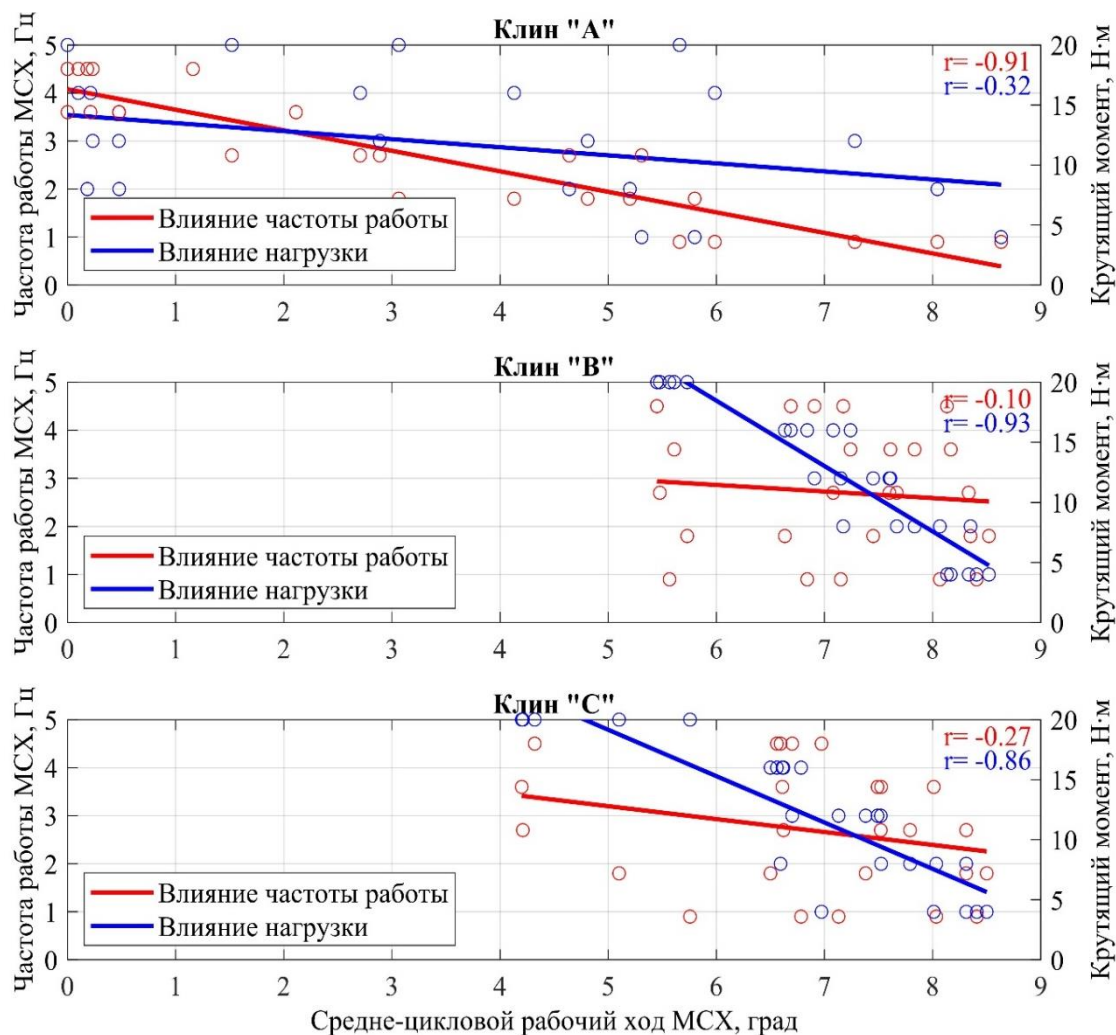


Рисунок 3 – График зависимости падения величины рабочего хода клиновой МСХ от роста частоты работы и нагрузки.

Благодаря преобразованию можно увидеть следующие зависимости:

- МСХ оснащенная клином “А” более чувствительна к росту частоты работы (коэффициент корреляции -0.91), нежели к росту нагрузки;

- Рабочий ход и КПД клиновой МСХ оснащенной клином “А” может падать до нуля с увеличением частоты работы;
- МСХ оснащенная клиньями “В” и “С” более чувствительна к росту нагрузки (коэффициент корреляции -0.93 (“В”) и -0.86 (“С”)) нежели к росту частоты работы;
- МСХ оснащенная клином “В” имеет более высокое значение циклового рабочего хода относительно остальных образцов.

Заключение

В рамках представленного исследования были определены основные факторы, ограничивающие характеристики клиновой МСХ с дополнительной кинематической связью, а также предложено решение, позволяющие расширить скоростной диапазон ее работы. Путем экспериментального исследования, внедрив изготовленные образцы с модифицированными поверхностями трения, было получено снижение длительности переходных процессов в силу повышения эффективности отвода смазочных материалов. Анализ полученных данных подтвердил, что внедрение клина с модификаторами поверхности снижает чувствительность МСХ к увеличению частоты работы, а наибольший эффект достигается при расположении модификаторов поверхности на обеих рабочих сторонах клина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарков, О.В. Механизмы свободного хода фрикционного типа. Современное состояние вопроса / О.В. Шарков // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – № 1. – С. 2-11.
2. Гончаров, А.А. Самотормозящиеся клиновые механизмы свободного хода: монография / А.А. Гончаров. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 200 с.
3. Kozlenok, A.V. Dynamics of a vehicle equipped with mechanical self-regulating stepless transmission / A.V. Kozlenok, S.I. Hoodorozhkov // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). – 2021. – Vol. 15. – P. 13–22.
4. Карабань, В.Г. Основные проблемы обеспечения качества бесступенчатых механических импульсных передач малой мощности и возможные пути их решения / В.Г. Карабань // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – 32 с.
5. Гончаров, А.А. Исследование влияние геометрических параметров элементов на самоторможение клиновых механизмов свободного хода / А.А. Гончаров // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 1. – С. 18-28.
6. Miller S. An overview of two methods for capturing the effects of small elastic deformations. Modeling Flexible Bodies with Simscape Multibody Software.: MathWorks [Электронный ресурс]. - 2017. – URL: <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/s/Modeling-Flexible-Bodies-Simscape-Multibody-171122.pdf> (дата обращения 28.07.2023).
7. Пат. RU 198952 U1(Российская Федерация) МПК F 16 H 57/032, F 16 D 41/06. Клиномеханизм свободного хода / А.В. Козленок 2020116381; Заявлено 19.05.2020; Опубликовано 04.08.2020.
8. Koto, J. Experimental method for mechanical engineering / J. Koto, N. Nasir // Ocean & Aerospace Research Institute. – 2018. – 159 p.

В.В. Колнышенко, Д.В. Ляшенко, М.В. Ляшенко, А.Д. Давыдов,
Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко, Хуаньюй Лян
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, kolnyshenko.vv@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

Аннотация

В работе представлены результаты испытаний образцов из полимерных материалов, полученных с использованием аддитивного производства методом послойной 3D печати, на лабораторной установке в потоке жидкости. Испытания проведены при наличии в жидкости включений и налипания частиц на поверхность образцов.

Ключевые слова: полимерные материалы, лабораторные испытания, установка для испытаний.

Введение

На объектах пищевой промышленности, связанных с изготовлением и реализацией продуктов питания, используется широкий спектр оборудования, которое условно можно классифицировать по категориям: тепловое, холодильное, электромеханическое, торгово-раздаточное. При изготовлении, транспортировке и хранении продуктов питания имеется большой риск попадания в них бактерий и микробов, частиц смазки или материала используемого оборудования, поэтому необходимо соблюдать требования безопасности и санитарные нормы, должны использоваться материалы химически нейтральные к перекачиваемой жидкости и рабочие поверхности иметь высокую износостойкой, чтобы не снижать качество продукции за счет частиц износа.

Насосы для пищевой промышленности предназначены для перекачки жидких пищевых продуктов различной вязкости с содержанием мягких или твердых абразивных частиц различной крупности.

Разрушение рабочих поверхностей насоса из-за износа приводит к ухудшению качества пищевых продуктов, остановкам оборудования для замены деталей и дополнительным экономическим затратам предприятия. Повышение без аварийного срока службы насоса за счет повышения износостойкости рабочих органов насосов является актуальной задачей [1-3].

Изготовление полимерных образцов осуществлялось на базе лаборатории МНОЦ «BaltTribo-Polytechnic», а лабораторные испытания и исследование образцов после испытаний в НТК «Новые технологии и материалы» СПбПУ Петра Великого.

Методы

Авторами использовались экспериментальные методы исследования образцов из полимерных материалов, полученных послойной 3D печатью, в потоке жидкости на установке для коррозионно-эрозионных испытаний. Исследование образцов после испытаний проводились гравиметрическим и оптическим методами.

Результаты и обсуждение

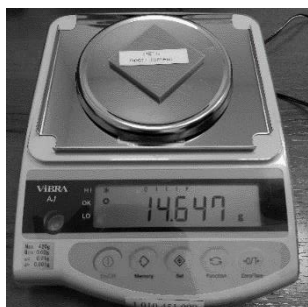
Методом послойной 3D печати выполнены полимерные образцы размером 50x50x5 мм. В таблице 1 показаны материал и фирма изготовитель прутка.

Предварительно проводилось взвешивание образцов (рисунок 1). Результаты взвешивания показаны в таблице 2.

Схема и фото установки в лаборатории показаны на рисунке 2 а и 2 б. Описание установки приведено в работе [4].

Таблица 1 – Полимерные материалы и фирмы изготовители

№ образца	Материал прутка	Фирма производитель
1	ABS	REC
2	PETG	Syntech
3	PETG	BestFilament
4	PETG	PrintProduct
5	PLA	FDPlast
6	PLA	Geekfilament
7	PLA+	ESUN



а)

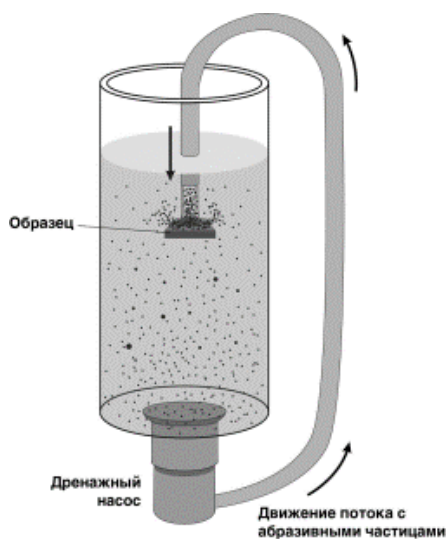


б)

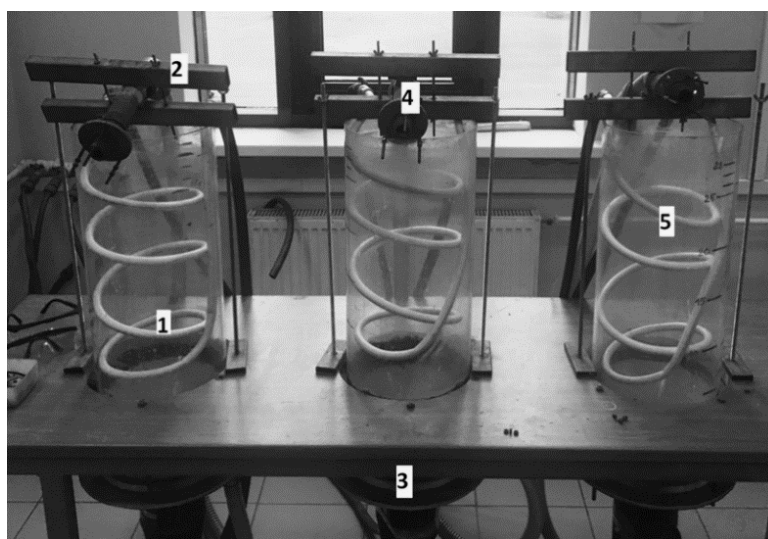


в)

Рисунок 1 – Фото определения веса образцов: а) PETG (BestFilament); б) ABS (REC); в) PETG (Syntech)



а)



б)

Рисунок 2 – Установки для испытаний: а) схема установки; б) коррозионно-эрозионный стенд: 1 – цилиндрическая емкость; 2 – рама; 3 – насос; 4 – платформа; 5 – охладитель.

Методика испытаний. Образцы помещались в установку для испытаний (рисунок 2) и подвергались воздействию потоком жидкости с твердыми частицами по режиму испытаний таким образом имитируя перекачку жидкости с твердыми включениями. Условия испытаний:

- температура среды – +20°C;
- pH среды – 8;
- скорость потока – 8,5 м³/час;
- абразив – кварцевый песок SiO₂;
- концентрация абразива – 0,7% или 175г на 25л;
- длительность испытания – 2 часа;
- угол наклона образца относительно потока – 90°;
- расстояние от края сопла до образца – 7 см.

После испытаний образцы взвешивались на весах неавтоматического действия Scout SPX6201 и фотографировались с использованием микроскопа Reichert-Jung MeF3A5, оптический объект-микрометр ОМО.

В таблице 2 представлены результаты взвешивания.

Таблица 2 – Результаты эрозионных испытаний

№ образца	Образец	Масса, г		Изменение массы, г
		До испытания	После испытания	
1	ABS (REC)	12,200	12,185	-0,015
2	PETG (Syntech)	14,229	14,269	+0,040
3	PETG (BestFilament)	14,567	14,622	+0,055
4	PETG (PrintProduct)	15,014	15,090	+0,0753
5	PLA (Geekfilament)	12,828	12,880	+0,060
6	PLA (FDPlast)	14,792	14,799	+0,007
7	PLA+ (ESUN)	14,390	14,399	+0,009

Результаты испытаний всех образцов представлены в таблице 2. За счет ребристой поверхности образцов, кроме образца ABS, изменение массы произошло в сторону ее увеличения за счёт застрявших в ячейках частиц песка. Так как поверхность образцов PLA и PLA+ до испытаний была отшлифована в большей степени, то количество застрявших частиц меньше и, следовательно, меньше увеличилась масса.

На рисунке 2 представлены изображения образцов после испытаний, полученные на стереомикроскопе. В образце PLA (Geekfilament) (рис. 2 в, г) наблюдаем тот факт, что частицы песка застревают как в верхнем, так и средних слоях.

Заключение

Результаты лабораторных испытаний могут быть использованы при проектировании деталей из полимерных материалов для оборудования пищевой промышленности. Рекомендуется использовать материалы для перекачки жидких продуктов различной вязкости без мягких и твердых включений. При изготовлении деталей с использованием аддитивных технологий необходима обработка поверхностей деталей для снижения шероховатости.

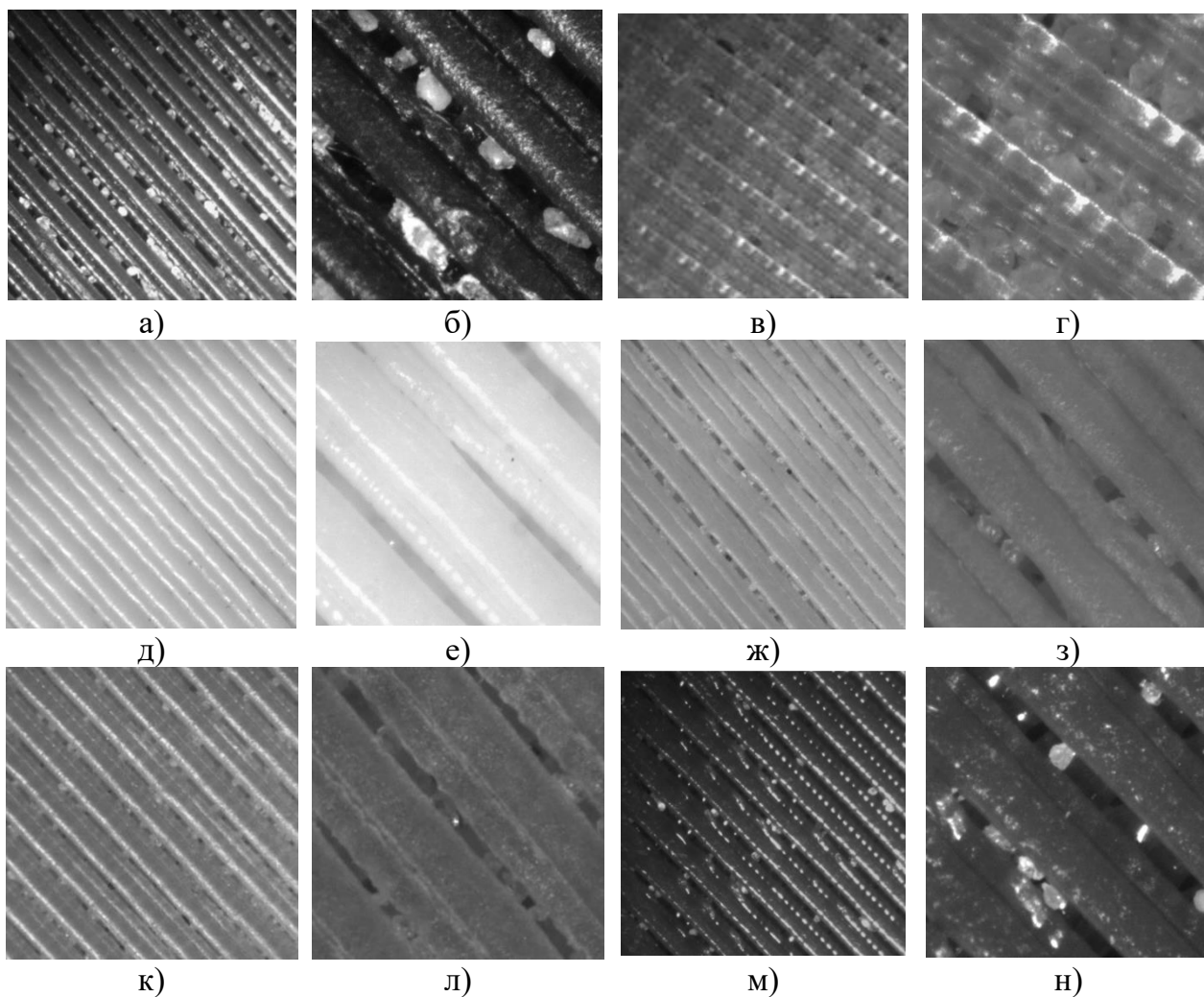


Рисунок 2 – Фото образцов после испытаний: а, б) PETG (Syntech);
в, г) PLA (Geekfilament); д, е) PLA (FDPlast); ж, з) PLA+ (ESUN);
к, л) PETG (BestFilament); м, н) PETG (PrintProduct).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишакова, В. А. Анализ основных параметров центробежных насосов для пищевой промышленности / В. А. Мишакова, А. М. Рожков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 138-142.
2. Арет, В.А. Реология и физико-механические свойства материалов пищевой промышленности: учеб. пособие / В.А. Арет, С.Д. Руднев. – СПб.: ИЦ Интермедия, 2014. – 252 с.
3. Андреев, В. Н. Исследование применения композиционных упаковочных материалов в пищевой промышленности / В. Н. Андреев, А. Н. Мартеха // Безопасность и ресурсосбережение в техносфере: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Краснодар, 29 апреля 2021 года. – Краснодар: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 2021. – С. 394-397.
4. Ляшенко, Д. В. Исследование металлических покрытий на износ / Д. В. Ляшенко, Г. В. Иванова, Е. А. Тарасенко // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 111-118.

МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7.044

В. Авдеенко, К.С. Арсентьева, И.В. Калатошишвили, В.С. Мамутов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, avdeenko.v@edu.spbstu.ru

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПЕРАЦИЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA

Аннотация

В работе применительно к электрогидроимпульсной штамповке разработан подход и методика компьютерного моделирования комбинированных операций электрогидроимпульсной штамповки в комплексе LS-DYNA. Показана некорректность применения моделей безмоментных оболочек для компьютерного моделирования высокоскоростного взаимодействия заготовки с матрицей. Также показано, что задание давления в качестве нагрузки на заготовку при моделировании ее объемным объектом может привести к значительным ошибкам. Предложен простой способ моделирования, позволяющий это избежать.

Ключевые слова: Электрогидроимпульсная листовая штамповка, комбинированные операции, конечно-элементный комплекс LS-DYNA, компьютерное моделирование.

Введение

Разрушение заготовки при разделительных операциях обработки металлов давлением (ОМД) являются одним из наиболее сложных и наименее изученных разделов теории ОМД. Задачи разрушения характеризуются нелинейностью дифференциальных уравнений, краевых условий, физической нелинейностью поведения металла, геометрической нелинейностью, большими пластическими деформациями, а также требуют задания комплекса физико-механических характеристик материала, определяющих трение, упругое и пластическое поведение, упрочнение и разрушение [1]. Надежные экспериментальные исследования очага деформации также проблематичны [2]. Развитие вычислительных методов механики разрушения, создание конечно-элементных программных комплексов, использующих такие методы, например, комплекс LS-DYNA [3]. Данный комплекс позволяет в настоящее время достаточно точно решать задачи для квазистатических и динамических процессов листовой штамповки [4, 5]. С точки зрения проектирования технологических процессов при этом сложность увеличивается для комбинированных операций, когда вместе с разделительной операцией присутствует формообразующая операция, особенно для процессов импульсной штамповки. В настоящее время в литературе практически отсутствуют рекомендации по проектированию таких процессов. Поэтому целью данной работы была разработка подхода и методики

компьютерного моделирования комбинированных операций электрогидроимпульсной штамповки в комплексе LS-DYNA.

Методы

Для достижения поставленной цели рассмотрен пример компьютерного моделирования в конечно-элементном (КЭ) комплексе LS-DYNA осесимметричной детали «крышка двигателя» из стали 12X13C2M2 толщиной 1 мм, изготавливаемой методом комбинированной электрогидроимпульсной штамповки (ЭГИШ) (рис. 1, а). Диаметр детали 155 мм, а отношение минимального радиуса закругления к толщине менее 1.5. На рисунке 1, б показана матрица для комбинированной штамповки детали, предусматривающая комбинирование формообразование рельефа и пробивки центрального отверстия.

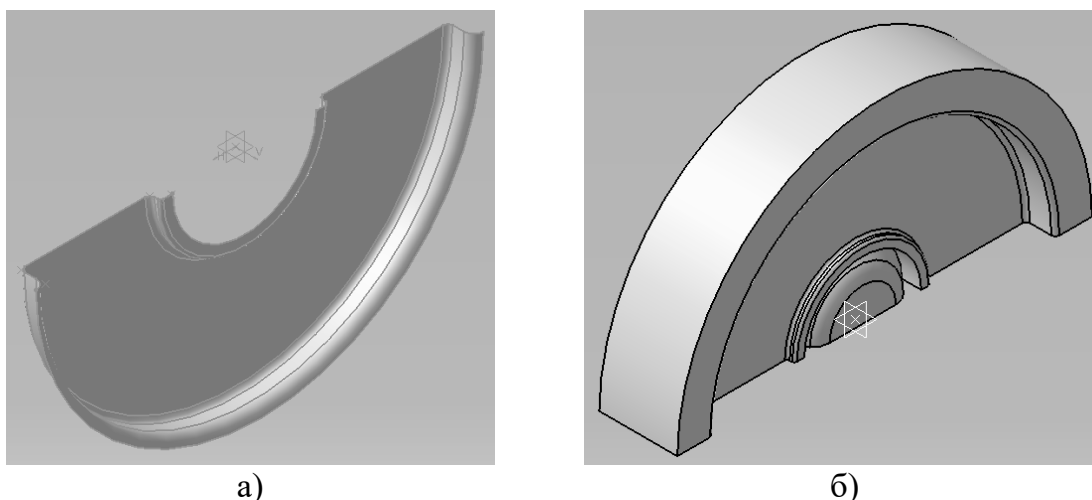


Рисунок 1 – Деталь «крышка двигателя»: а) геометрическая модель детали, б) возможная матрица для штамповки при совмещенном комбинировании

С точки зрения максимальной информации компьютерного моделирования оптимальным является «полный» компьютерный расчет с учетом переходных процессов в разрядном контуре, динамикой развития плазменного канала в жидкости, учетом гидродинамики сжимаемой жидкости, ее взаимодействием с камерой и заготовкой, взаимодействием заготовки с матрицей. Аналог такого расчета представлен в работе [6] и требует достаточно сложное программирование модели, а также суперкомпьютера для ее реализации. Поэтому для упрощения в инженерных расчетах примелась модель безмоментной оболочки при заданном законе импульсного давления [7]. Для данной детали модель безмоментной оболочки по типу ThinShell 163 не пригодна, и необходимо решать объемную задачу. С учетом формы детали можно считать осесимметричный вариант по типу 2DSolid 162, который также сможет учесть волновое взаимодействие заготовки с матрицей, что не учитывается в случае использования безмоментной оболочки.

Вторым важным моментом является оценка возможности задания давления при расчете нагружения заготовки при использовании объемной осесимметричной заготовки.

Результаты и обсуждение

Результаты компьютерного расчета с полусинусоидальным импульсом давления длительностью 4 мс для осесимметричной заготовки представлены на рис. 2. На

рисунке показаны характерные моменты взаимодействия заготовки с рельефом матрицы: а) заготовка до соприкосновения с рельефом матрицы, б) соприкосновение заготовки с матрицей, в) отскок заготовки от матрицы. Реально при ЭГИШ такого не происходит. Вода тормозит отскок заготовки. Поэтому максимально упрощенный подход к моделированию с заданием детерминированного давления – не пригоден.

Предложен новый упрощенный подход, с наличием жидкости (рис. 3). Варьируя массой поршня, высотой жидкости и скоростью перемещения поршня можно получить широкий спектр параметров импульсного давления и определить требуемые величины параметров.

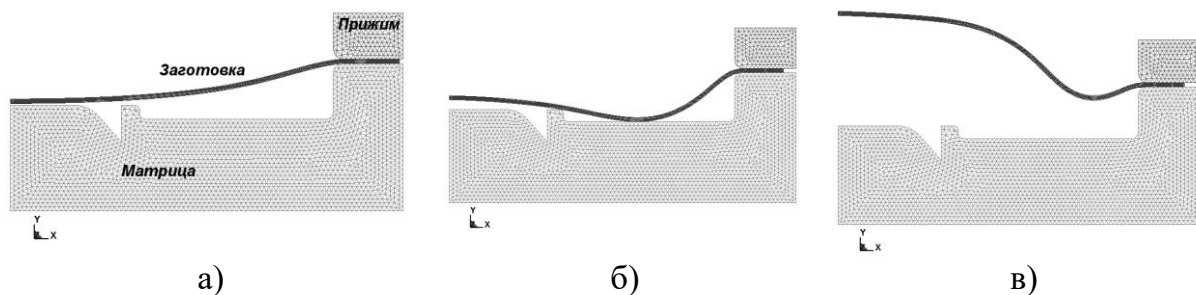


Рисунок 2 – Взаимодействие заготовки с матрицей: а) заготовка до соприкосновения с рельефом матрицы, б) соприкосновение заготовки с матрицей, в) отскок заготовки от матрицы

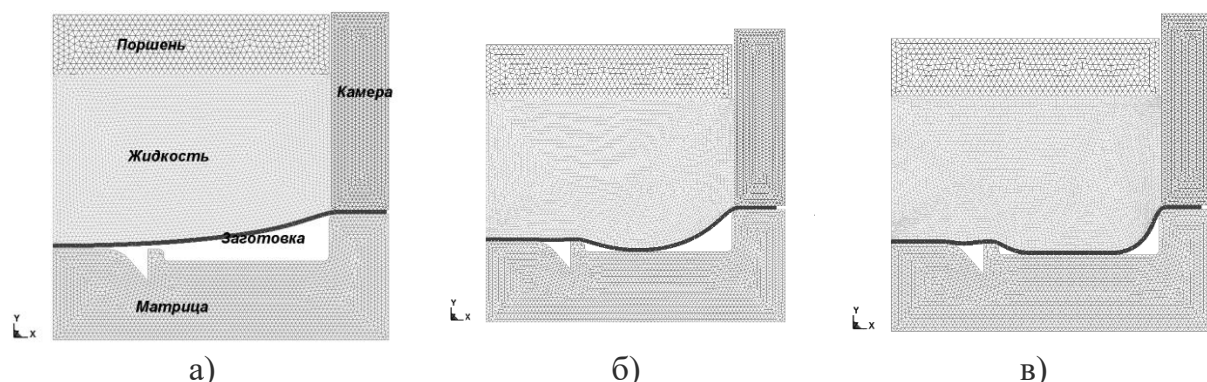


Рисунок 3 – Взаимодействие заготовки с матрицей при наличии жидкости: а) заготовка до соприкосновения с рельефом матрицы, б) соприкосновение заготовки с матрицей, в) заполнение рельефа матрицы

Заключение

Разработан подход и методика компьютерного моделирования комбинированных операций электрогидроимпульсной штамповки в комплексе LS-DYNA. Установлено, что применении безмоментных оболочек в качестве модели заготовки не может быть использовано при расчете высокоскоростного взаимодействия заготовки с матрицей. Показано, что задание нагрузки в виде закона давления в случае объемной заготовки не дает возможности корректного расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов, Г.М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Г.М. Морозов, Г.П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

2. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А.Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
3. Improving standard shell elements, friction models and contact algorithms for the efficient solution of sheet metal forming problems with LS-DYNA 3D / J.O. Hallquist, K. Schweizerhof, K. Weimar, D.W. Stillman // VDI Berichte. – 1991. – N 89. – P.499-515.
4. Мамутов, В.С. Компьютерный расчет разрушения металла при тонколистовой вырубке-пробивке / В. С. Мамутов // Тематич. сб. научн. тр. «Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні». – Краматорск: из-во ДГМА, 2008. – С.37-40.
5. Мамутов, В. С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов / В. С. Мамутов // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 465-471.
6. Mamutov, V. S. Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming / V. S. Mamutov, G. N. Zdor // International Review of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 11, No. 5. – P. 332-336.
7. Мамутов, В. С. Электрогидроимпульсная вытяжка в закрытую матрицу с плоским дном при различных параметрах нагружения заготовки / В. С. Мамутов, К. С. Арсентьева // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – № 7. – С. 569-580. – DOI 10.1872/MMF-2018-49.

И.Е. Волокитина¹, А.В. Волокитин², Е.А. Панин², А.И. Денисова²

¹Рудненский индустриальный институт, Рудный, Казахстан, irinka.vav@mail.ru

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

Аннотация

В статье описано волочение стальной проволоки в условиях криогенного охлаждения в жидком азоте. Результаты лабораторного эксперимента показывают, что применение криогенной деформационной обработки после волочения проволоки улучшает механические свойства по сравнению с традиционным волочением. В данном случае за один проход относительное сужение после растяжения снижается на 5 %, предел прочности повышается на 21 %, условный предел текучести – на 18 %. Результаты показывают, что условия деформации при криогенном волочении являются дополнительным фактором для реализации структурных ресурсов для оптимизации физико-механических свойств стальной проволоки.

Ключевые слова: волочение, механические свойства, сталь, криогенное охлаждение.

Введение

Для реализации планов, которые стоят перед экономикой Республики Казахстан, необходимо обеспечить ключевые отрасли промышленности высококачественной металлопродукцией с уникальными физико-механическими и другими эксплуатационными характеристиками. Во многих случаях решение этих задач сопряжено с высокими энергетическими затратами. С точки зрения экономии энергетических и сырьевых ресурсов большое практическое значение имеет вопрос об энерго- и ресурсосберегающих методах, позволяющих с минимальными затратами времени обрабатывать продукцию и получать материалы со свойствами, сочетающими высокую прочность и пластичность одновременно, на относительно простом и дешевом оборудовании.

В настоящее время актуальными являются технологии, которые производят металлопродукцию на одной непрерывной линии путем объединения или комбинирования нескольких операций. Такой подход ведет к существенному повышению конкурентоспособности за счет сокращения количества промежуточных процессов.

Одним из наиболее востребованных видов металлопродукции является стальная проволока, которая широко используется в качестве элемента при производстве металлокорда, канатов и биметаллических стальных изделий. Эти металлоизделия определяют безопасность и надежность функционирования таких объектов, как железные дороги, оборудование для подъема людей и грузов, строительные опоры для различных объектов и конструкций, телефонные линии, специальные микрокабели, авиационные и сейсмические кабели, оборонная промышленность и авиация. В настоящее время к уровню нормативных свойств этих металлоизделий предъявляются более жесткие требования. Традиционные технологии улучшения механических характеристик стальной проволоки не имеют существенного резерва по таким технико-

экономическим показателям, как рентабельность, энергоемкость, ограниченная возможность оперативного изменения, как всего технологического процесса, так и отдельных его параметров. Поэтому разработка технических и технологических средств комплексного улучшения механических свойств стальной проволоки с использованием инновационных методов деформационной обработки является важной научно-технической задачей.

На основании большого количества работ [1-3] мы знаем, что, уменьшая размер зерна конструкционных материалов, можно значительно улучшить прочностные свойства при холодной деформации и пластические свойства при горячей деформации. Поэтому практический интерес сосредоточен на разработке методов предельного уменьшения размера зерна. В настоящее время перед материалововедами стоит задача получения субмикро- и нанокристаллических структур в количествах, пригодных для промышленного использования. Одним из возможных решений этой проблемы является деформация при температуре жидкого азота (так называемая криогенная деформация). Предполагается, что крайне низкие температуры деформации значительно затрудняют процессы возврата и, тем самым, существенно ускорят измельчение микроструктуры [4, 5].

За последние несколько лет ученые стали проявлять повышенный интерес к криогенному охлаждению с использованием жидкого азота во время деформации методами ОМД [6, 7]. Криогенная или холодная обработка была впервые предложена советским ученым А. С. Гуляевым в 1937 году [8] и с тех пор используется за рубежом. Для многих легированных и углеродистых марок сталей полное прекращение мартенситного превращения происходит при минусовых температурах, поэтому при охлаждении до комнатной температуры в структуре остается определенное количество аустенита. Но повторные высокотемпературные закалки не могут изменить микроструктуру дальше. Это говорит о том, что сталь не может достичь максимально возможного значения твердости. Также желательно как можно более полно перевести аустенит в мартенсит, поскольку остаточный аустенит со временем может постепенно перейти в бейнит. Это достигается путем охлаждения до конечной температуры мартенситного превращения, которая может находиться в диапазоне от плюс до -140°C для промышленных марок стали [8]. Кроме того, при криогенной обработке не происходит динамического возврата или перекристаллизации, что позволяет более эффективно измельчать зернистую структуру. Еще одним преимуществом такой деформации является значительное повышение прочности при меньших усилиях деформации по сравнению с традиционными методами ОМД.

Поэтому интенсивное охлаждение на выходе проволоки из фильеры с помощью жидкого азота может дать лучший компромисс между прочностью и пластичностью материала. Это может быть достигнуто за счет увеличения подвижности дислокаций и одновременного увеличения их плотности.

В связи с этим, целью настоящего исследования было изучение закономерности изменения механических свойств проволоки из низкоуглеродистой стали при ее деформации методом волочения при комнатной и криогенной температурах. Сталь была выбрана в качестве материала исследования из-за ее практической важности и необходимости одновременного улучшения ее прочностных и пластических свойств.

Методы

Схема процесса волочения проволоки с криогенным охлаждением показана на рисунке 1.

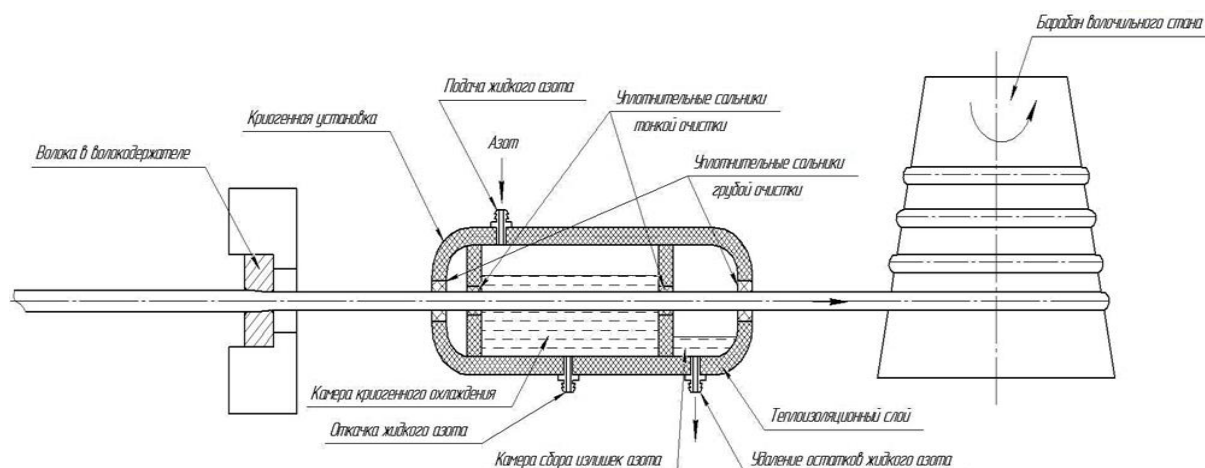


Рисунок 1 – Схема криогенного охлаждения проволоки

Эта технология представляет собой комбинированный процесс, при котором волочение проволоки и последующая термообработка в среде жидкого азота выполняются на одной линии агрегата. Процесс волочения проволоки в данном случае ничем не отличается от традиционного волочения и задачи проволоки в стан. Заостренный конец проволоки вставляется в фильеру, находящуюся в волокодержателе и подается в пустую резервуар-камеру для криогенного охлаждения. Затем конец проволоки зажимается щипцами на проволочном барабане волочильной машины и наматывается несколько витков проволоки. Затем машина достигает рабочей скорости волочильного стана. В это же время камера криогенного охлаждения заполняется жидким азотом. Камера оснащена системой рециркуляции азота. В зоне деформации в фильере проволока интенсивно нагревается, при этом температура поднимается до 120-150°C, после чего проволока поступает в криогенную камеру охлаждения, где происходит интенсивное охлаждение при температуре -196°C.

Диаметр проволоки составлял 5 мм.

Для оценки однородности механических свойств использовался коэффициент вариации случайной величины (мера относительной степени рассеивания случайных величин, которая указывает на степень их усреднения), рассчитанный как отношение среднего арифметического и стандартного отклонения образцов.

Результаты и обсуждение

Результаты лабораторного эксперимента показывают, что применение криогенной деформационной обработки после волочения проволоки улучшает механические свойства по сравнению с традиционным волочением. В данном случае за один проход относительное сужение после растяжения снижается на 5 %, предел прочности повышается на 21 %, условный предел текучести - на 18 %. По сравнению с волочением при комнатной температуре, улучшение прочностных свойств после криогенного волочения, может быть связано со степенью дефектности микроструктуры, ее фрагментацией и изменением состояния границ фрагментов.

Также криогенное охлаждение увеличило микротвердость в центре с 1250 МПа до 1615 МПа, изменив ее с 1345 МПа до 1830 МПа на поверхности. Оценка однородности механических свойств подтвердила, что разброс механических свойств по длине полученной проволоки не превышал значений, допускаемых международными стандартами.

Заключение

В данной работе изучены изменения механических свойств стальной проволоки при криогенном охлаждении в процессе волочения и сделаны следующие выводы:

- Криогенная обработка проволоки из низкоуглеродистой стали увеличивает предел прочности при растяжении на 21 %, предел текучести на 18 %. Относительное сужение после разрыва понижается на 5 %;

- Условия деформации при криогенном волочении являются дополнительным фактором в реализации структурных ресурсов для оптимизации физико-механических свойств стали.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP19576369)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов, А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.
2. Волокитина, И.Е. Влияние исходного структурного состояния на формирование структуры и механических свойств стали при РКУП / И.Е. Волокитина, Г.Г. Курапов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – No12. – С. 27-32.
3. Лежнев, С.Н. Влияние процесса прессование-волочение на изменение структуры и механических свойств стали / С.Н. Лежнев, И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин // Сталь. – 2017. – No 3. – С. 44-48.
4. Механические свойства малоуглеродистой стали после волочения в криогенных условиях / А.Т. Турдалиев, А.Х. Абуова, И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин // Промышленный транспорт Казахстана. – 2019. – No 3. – С. 159-163.
5. Конькова, Т.Н. Интенсивная криогенная деформация меди / Т.Н. Конькова, С.Ю. Миронов, А.В. Корзников // ФММ. – 2010. – С.184-187.
6. Mechanical properties of aluminium–copper–lithium alloy AA2195 at cryogenic temperatures / N. Nayan, S.V.S. Narayana, K. Abhay S.C. Sharma, G.V.S. Sastry // Mater. Des. – 2014. – V.58. – P. 445-450.
7. Li, Y.S. Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures / Y.S. Li, N.R. Tao, K. Lu // Acta Mater. – 2008. – V. 56. – P. 230-241.
8. Гуляев, А.П. Термическая обработка стали / А.П. Гуляев. – М.: ГНТИ, 1953. – 384 с.

А.В. Волокитин, И.Е. Волокитина, Д.Н. Лавринюк, Т.Д. Федорова
Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан,
irinka.vav@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ СКРУЧИВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВОЛОЧЕНИЯ

Аннотация

В данной работе проведено исследование изменения механических свойств медной проволоки в процессе деформирования новым способом. Данный способ заключается в совмещении двух технологий: традиционного волочения и скручивания в равноканальной ступенчатой матрице. Скручивание заготовки происходит именно в равноканальной ступенчатой матрице, за счет вращения ее вокруг оси заготовки, что позволяет достигать скручивания во всем объеме заготовки с последующей калибровкой поперечного сечения за счет прохождения канала фильеры. Физический эксперимент показал возможность получения повышенных механических свойств в медной проволоке. В связи с этим использование усовершенствованного метода волочения, сочетающего в себе способы кручения, реализующие схему простого сдвига и классического процесса волочения через фильеру, позволяет расширить границы применения традиционных конструкционных материалов.

Ключевые слова: проволока, медь, волочение, скручивание, микроструктура, механические свойства.

Введение

За последние несколько лет статьи по применению методов интенсивной пластической деформации (ИПД) являются наиболее читаемыми и цитируемыми. Это связано с тем, что ИПД успешно используется для получения субмикронных зернистых структур, а в некоторых случаях наноразмерных кристаллитов, в широком ряду сплавов [1,2]. Однако, несмотря на большое количество методов ИПД, создание технологий деформационного наноструктурирования для промышленного использования, в частности, для производства массовых изделий, включая проволоку, является сложной научно-технической проблемой, решение которой требует разработки схем непрерывного ИПД, обеспечивающих получение ультрамелкозернистых наноструктур в длинномерных металлических полуфабрикатах. Такие новые технологии и могут быть основаны на хорошо известном процессе обработки металла волочением.

Традиционно большинство металлов и сплавов конструкционного назначения характеризуются однородной микроструктурой, где средние размеры зерен в разных частях более или менее однородны. Согласно классическому соотношению Холла-Петча, однородный поликристаллический металл можно упрочнить путем уменьшения среднего размера зерна, так как увеличение объемной доли границ зерен будет еще больше препятствовать движению дислокаций. Тем не менее, уменьшение размера зерна неизбежно приведет к уменьшению пластичности и деформируемости материала из-за ограниченной подвижности дислокаций, тем самым создавая дилемму, известную как «компромисс между прочностью и пластичностью», который ограничивает применение многих металлических материалов. Однако в последние годы металлы с

градиентной наноструктурой стали новым классом конструкционных материалов с многообещающим потенциалом преодоления компромисса между прочностью и пластичностью [3-5].

Поэтому развитие и разработка новых процессов получения высокопрочных материалов с улучшенными прочностными свойствами является актуальным и важным вопросом для развития производства. В связи с этим использование усовершенствованного метода волочения, сочетающего в себе способы кручения, реализующие схему простого сдвига и классического процесса волочения через фильеру, позволяет расширить границы применения традиционных конструкционных материалов.

Целью данной работы является исследование изменения механических свойств медной проволоки в процессе деформирования новым способом, который заключается в скручивании проволоки в равноканальной ступенчатой матрице и традиционного волочения.

Методы

Для реализации совмещенной технологии при деформировании медной проволоки использовали промышленный барабанный волочильный стан В-1/550М. Деформирование проводилось при комнатной температуре с использованием маршрута Вс (вращение проволоки после каждого цикла деформирования осуществлялось на 90°). Количество проходов – 3. Уменьшение диаметра проволоки после каждого цикла деформирования составляло 0,5 мм. Так после 3 проходов деформирования мы получили проволоку диаметром 5,0 мм.

Технология процесса скручивания в равноканальной ступенчатой матрице с последующим волочением не имеет существенных отличий от классического волочения (рис. 1). На первом этапе проволока заостряется на острильном станке до требуемого диаметра. Далее проволока пропускается через камеру со смазкой, в которой установлен механизм вращения. Проволока проходит через отверстие банджа матрицы, а затем через отверстие фильеры. Передний конец проволоки фиксируется в клещах волочильного барабана. Далее вокруг проволоки устанавливаются два сегмента равноканальной ступенчатой матрицы и по принципу клина вводятся в бандаж. На этом этапе заканчиваются все подготовительные операции. После чего осуществляется запуск стана с выходом на запланированную скорость волочения и параллельно приводится в движение механизм, осуществляющий вращение равноканальной ступенчатой матрицы.

Металлографический анализ был проведен на просвечивающем электронном микроскопе JEM2100. Объекты для ПЭМ готовили струйной полировкой на приборе Тепирол-3 при комнатной температуре и напряжении 25В в 7% растворе H_3PO_4 в дистиллированной воде.

Оценку эффективности упрочнения после деформирования проводили по измерению микротвердости в соответствии с ГОСТ 9450-76 с интервалом 1 мм, по методу Виккерса. Индентором являлся алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием. Нагрузка составляла 0,5 Н.

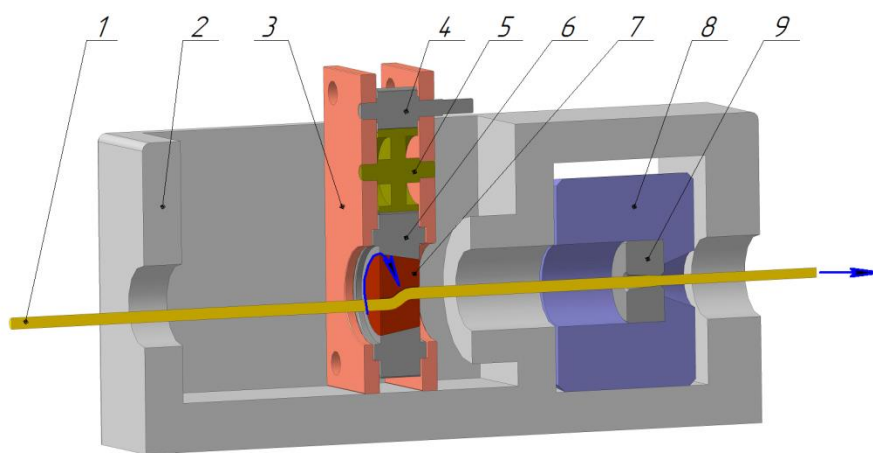


Рисунок 1 – Схема совмещенного процесса деформирования проволоки

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны фотографии микроструктуры, полученные с помощью ПЭМ. Первое изображение получено на расстоянии $\approx 0,2$ мм от поверхности проволоки (поверхностный слой). Как видно границы зерен волокнистые и изогнутые, что обычно характерно для большого количества дефектов, средний размер зерен составляет 500 нм. Следующее ПЭМ-изображение было получено на расстоянии ≈ 2 мм от поверхности проволоки (средний слой). Здесь сформирована бимодальная структура, которая состоит из мелких зерен с высокоугловыми границами и больших зерен с развитой субструктурой. Средний размер зерен составляет 2 мкм. Внутри зерен сформирована тонкая структура в виде скоплений дислокаций, и ячеек. Крупные зерна, скорее всего, образовались по механизму бездиффузионной рекристаллизации, так, как если бы произошла динамическая рекристаллизация, зерна не имели бы искажений кристаллической решетки и не содержали бы дефектов. И последнее изображение было получено из центральной части проволоки. Структура представляет собой ячеистую дислокационную структуру деформационного происхождения со средним размером зерна 4 мкм. Наблюдаются как крупные зерна с небольшим количеством субграниц, а также зерна, содержащие большое количество субграниц.

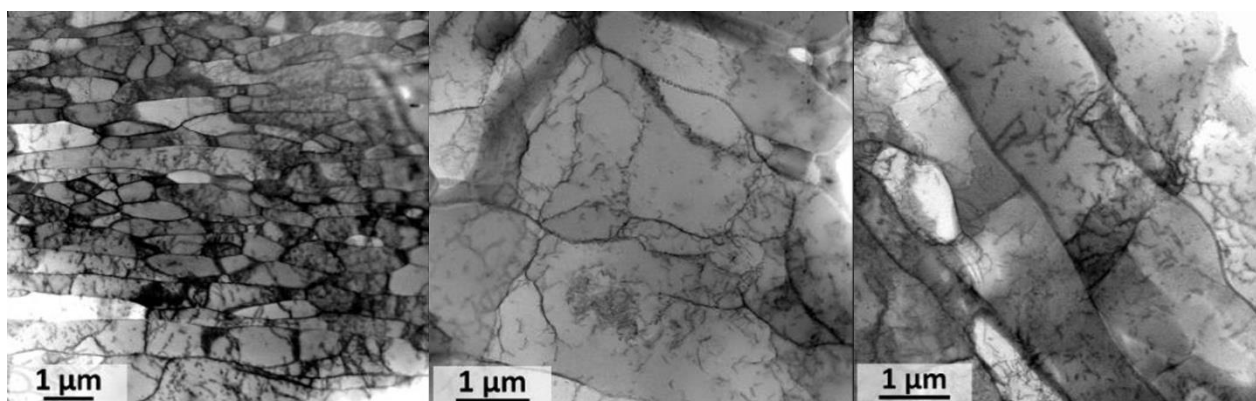


Рисунок 2 – Микроструктура деформированной медной проволоки (поперечное сечение): а – поверхностный слой, б – средний слой, в – центральная часть

Анализ микротвердости показал, что среднее значение микротвердости в поверхностных слоях составило 216 МПа, в средних слоях – 174 МПа, а в центре проволоки 155 МПа. Такой разброс микротвердости можно объяснить образованием

градиентной структуры и упрочнением границ зерен за счет увеличения плотности дислокаций.

Заключение

Металлографический анализ показал наличие градиентной структуры в медной проволоке после деформирования новым способом. В поверхностном слое получена ультрамелкозернистая структура с размером зерен ≈ 500 нм, которая увеличивается к центру проволоки до 4 мкм. Проведенные микромеханические испытания на определение микротвердости подтвердили наличие градиентной микроструктуры в медной проволоке.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP19676903).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyakov, A.V. Peculiarities of ultrafine-grained structure formation in Ti Grade-4 using ECAP-Conform / A.V. Polyakov, I.P. Semenova, G.I. Raab // *Advanced Materials Science*. – 2012. – No 31. – P. 78-84.
2. Lezhnev, S. Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper / S. Lezhnev, I. Volokitina, T. Koinov // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2014. – No 49. – P. 621-630.
3. Li, J. Production of Surface Layer with Gradient Microstructure and Microhardness on Copper by High Pressure Surface Rolling / J. Li, Q. Mei, Y. Li, T. Wang // *Metals*. – 2020. – No 10. – P. 73-75.
4. Volokitina, I. Structure and mechanical properties of aluminum alloy 2024 after cryogenic cooling during ECAP / I. Volokitina // *J. Chem. Technol. Metall.* – 2020. – V. 55, No 2. – P. 479-485.
5. Raab, G.I. Tailoring the gradient ultrafine-grained structure in low-carbon steel during drawing with shear / G.I. Raab, L.A. Simonova, G.N. Aleshin // *Metalurgija*. – 2016. – No 55. – P. 177-180.

Д.Р. Кравцов, А.А. Степанов, К.А. Тукачев, К. Лепетан
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, kravtsov.dr@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ КОНИЧЕСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

В работе рассмотрены результаты вытяжки различных материалов коническим пуансоном, выявленные при проведении компьютерного моделирования. Показаны диаграммы предельных деформаций, максимальная высота вытяжки, а также возможные зоны возникновения разрушения заготовки.

Ключевые слова: листовая штамповка, вытяжка, компьютерное моделирование, диаграмма предельных деформаций

Введение

Детали, получаемые методами пластической деформации металлов, широко используются в промышленности. Вытяжкой, в частности, можно изготовить технологичные изделия с высоким коэффициентом использования материала, применяемые в приборостроении в качестве корпусов различных элементов или в машиностроении – в качестве кожухов механизмов.

Иногда для подобных задач используются металлы, деформирование которых мало изучено ввиду редкой применяемости в других отраслях, такие как титан или алюминий. Существующие эмпирические данные в достаточной степени описывают лишь вытяжку мягких сталей или латуней [1].

В то же время, зоны утонения и возможного возникновения разрушения материала заготовки при вытяжке цилиндрическим инструментом принципиально отличаются от таких зон при применении пуансонов других форм. Известны способы многопереходной вытяжки конических деталей [2], однако возможности использования сразу конического инструмента на первом переходе штамповки требуют дополнительных исследований.

Доступным методом исследования вытяжки сейчас является компьютерное моделирование процессов пластической деформации. Оно не требует изготовления дорогостоящей штамповой оснастки и позволяет в короткий срок получить результаты для различных начальных условий, форм инструмента и материалов заготовки.

Таким образом, целью данной работы является исследование течения различных металлов заготовки и вероятность возникновения дефектов при вытяжке коническим пуансоном.

Методы

Для исследования вытяжки использовался программный комплекс конечно-элементного расчета LS-DYNA. Так как данный комплекс изначально разработан для расчетов импульсных процессов, исследуемый квазистатический процесс вытяжки был сведен к динамическому по параметру сходимости λ [3].

Для моделирования были заданы геометрия вытяжного инструмента (рис. 1), физические и механические характеристики исследуемых материалов (табл. 1), а также

параметры конечно-элементной сетки, нагружения и трения, одинаковые для всех материалов. Расчеты проводились для вытяжки круглых заготовок диаметром 100 мм и толщиной 1 мм. Полином, аппроксимирующий кривую деформационного упрочнения задан по формуле Холломана.

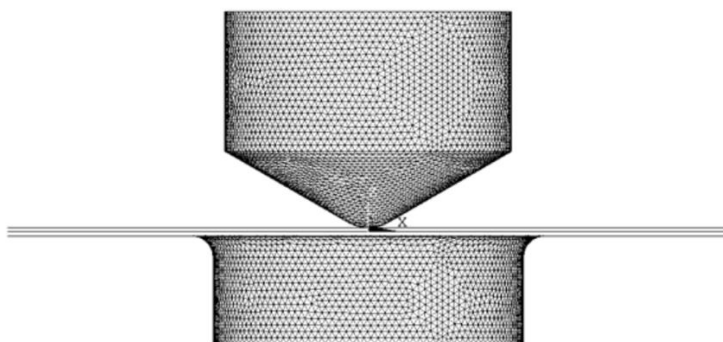


Рисунок 1 – Конечно-элементная сетка инструмента и заготовки

Таблица 1 – Характеристики исследуемых материалов

Материал	Параметры аппроксимации		Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Плотность
	B , МПа	m	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
Сталь 12Х18Н9Т	1180	0,29	202	0,31	7800
Латунь Л68	740	0,44	115	0,34	8600
Медь М1	480	0,38	120	0,35	8900
Алюминий АД1	73	0,22	70	0,31	2700

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных расчетов с помощью программы LS-PrePost были построены диаграммы предельных деформаций (FLD) (рис. 2, 3), определены значения перемещения точек конечно-элементной сетки (рис. 4-7), а также толщины заготовки на разных участках после вытяжки (рис. 8-11).

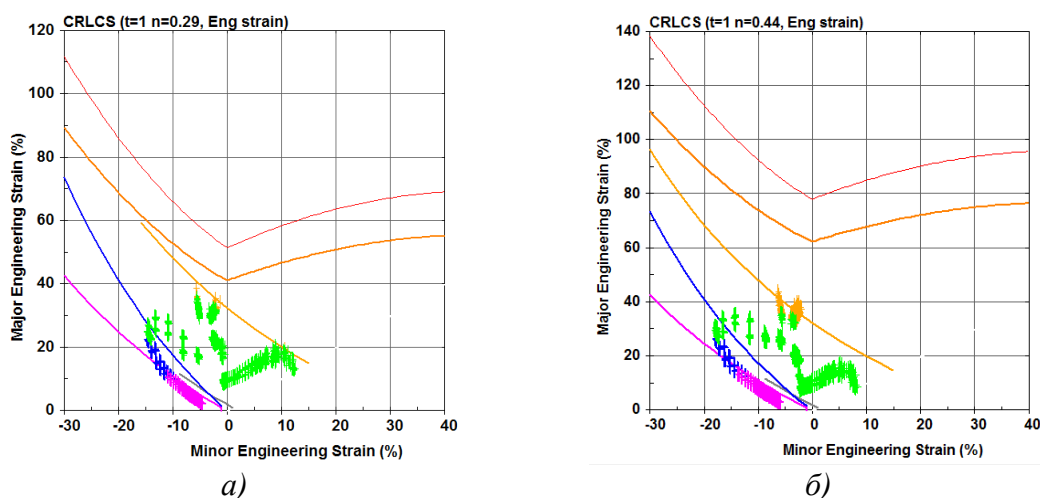


Рисунок 2 – Диаграммы предельных деформаций для: а) стали 12Х18Н9Т; б) латуни Л68

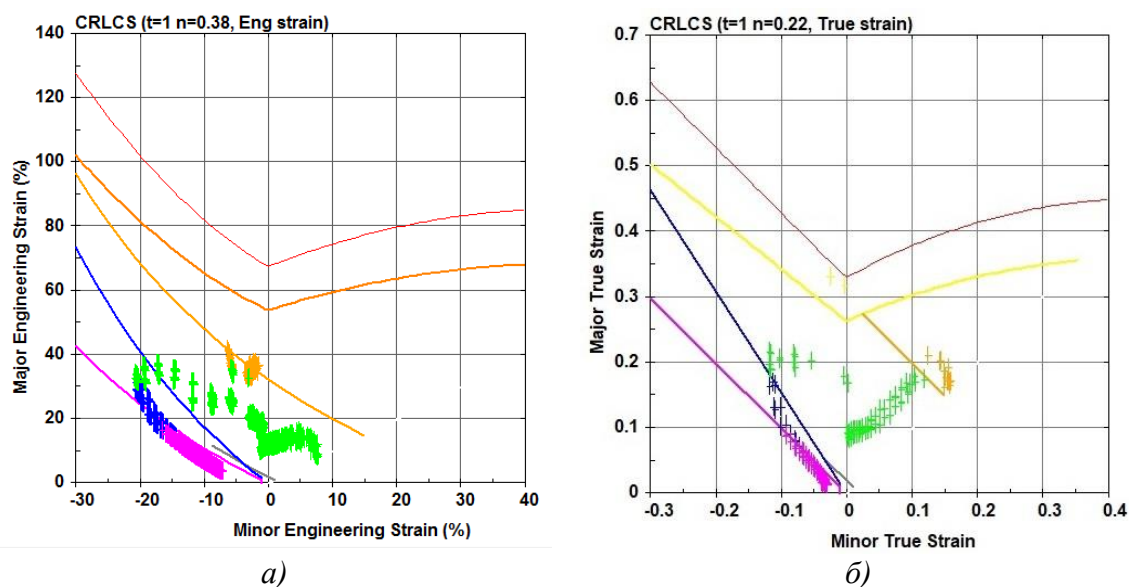


Рисунок 3 – Диаграммы предельных деформаций для: а) меди М1; б) алюминия АД1

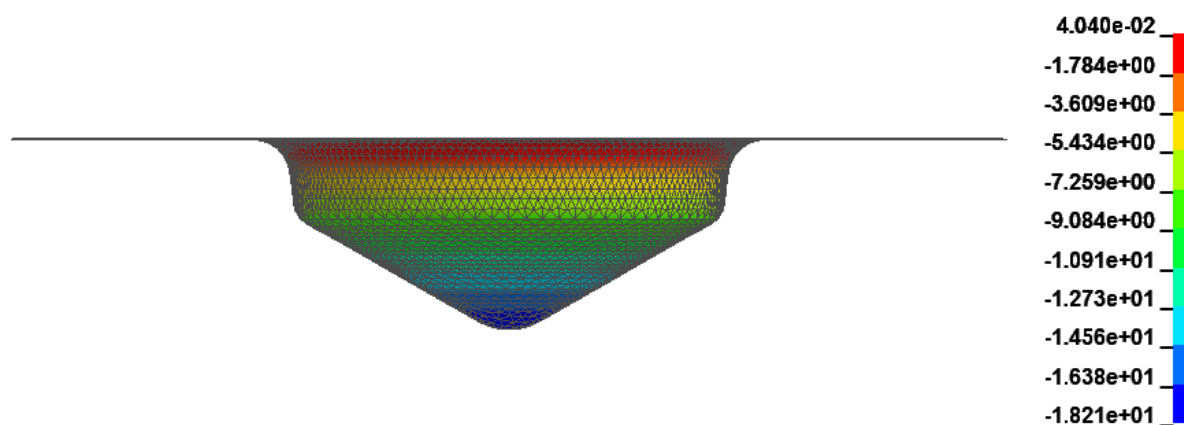


Рисунок 4 – Величина перемещения точек конечно-элементной сетки заготовки из стали 12X18H9Т

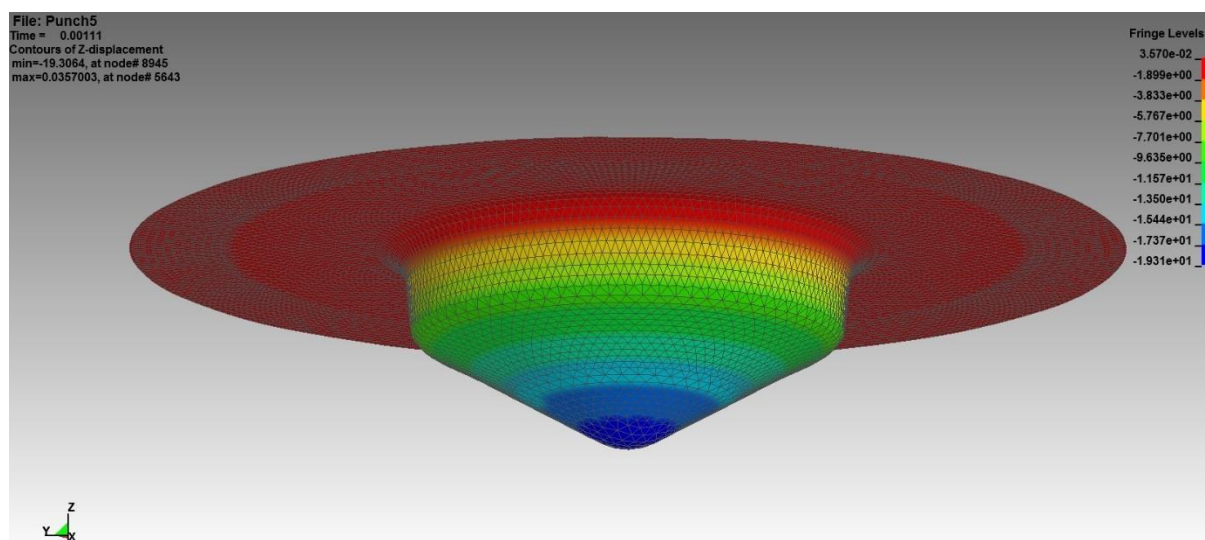


Рисунок 5 – Величина перемещения точек конечно-элементной сетки заготовки из латуни Л68

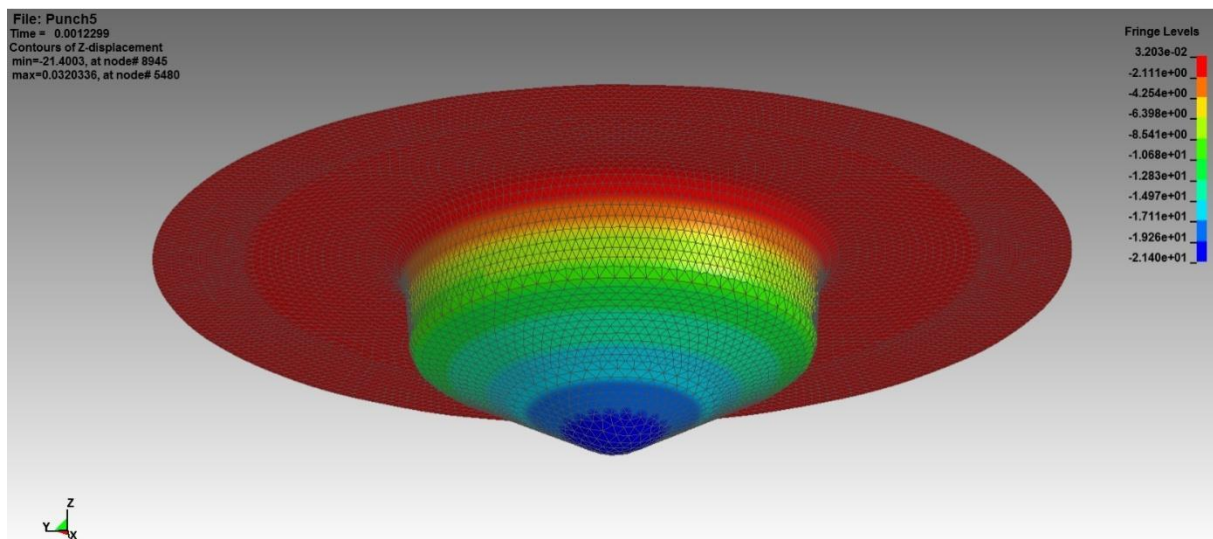


Рисунок 6 – Величина перемещения точек конечно-элементной сетки заготовки из меди М1

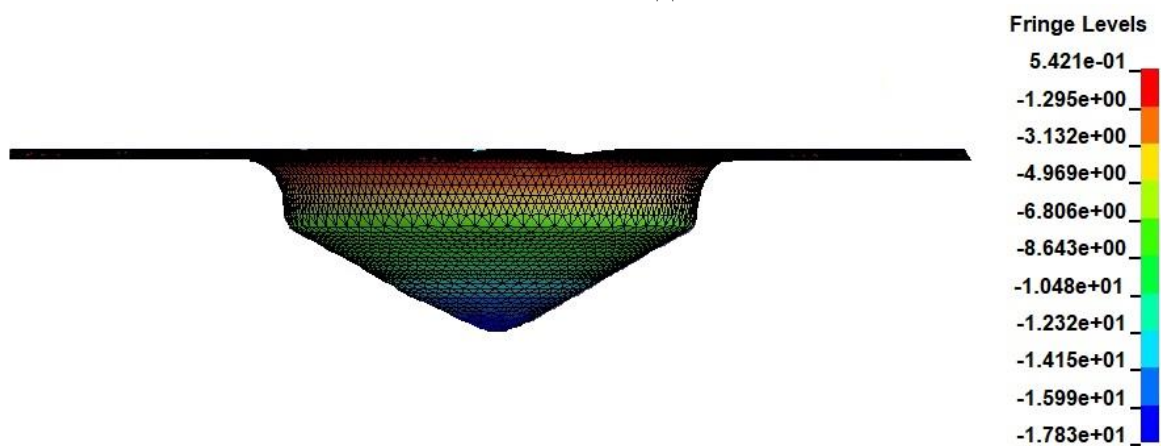


Рисунок 7 – Величина перемещения точек конечно-элементной сетки заготовки из алюминия АД1

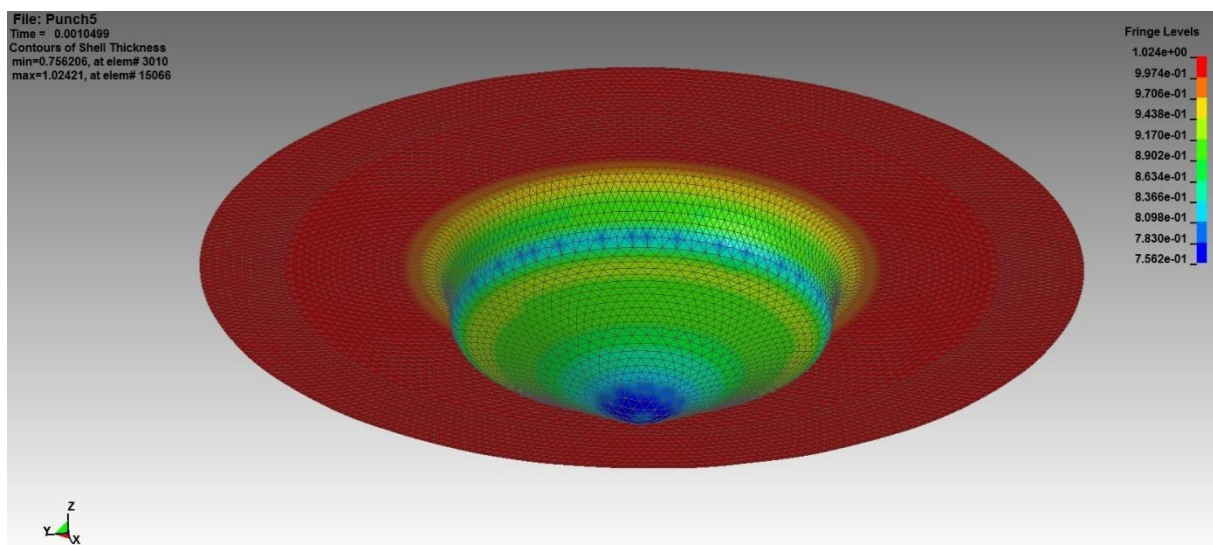


Рисунок 8 – Относительное утонение материала заготовки из стали 12Х18Н9Т

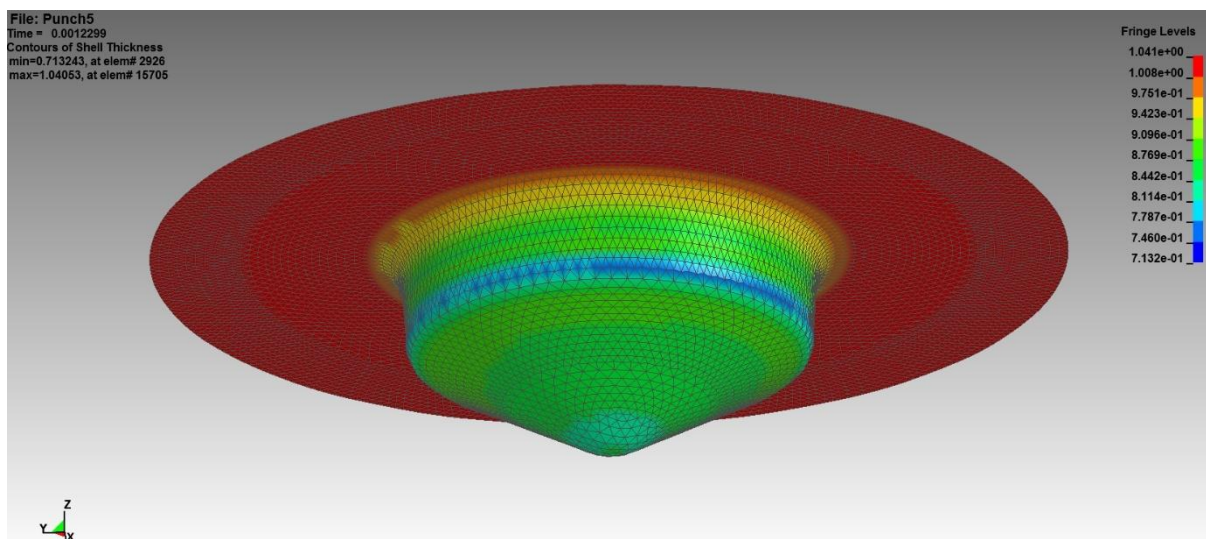


Рисунок 9 – Относительное утонение материала заготовки из латуни Л68

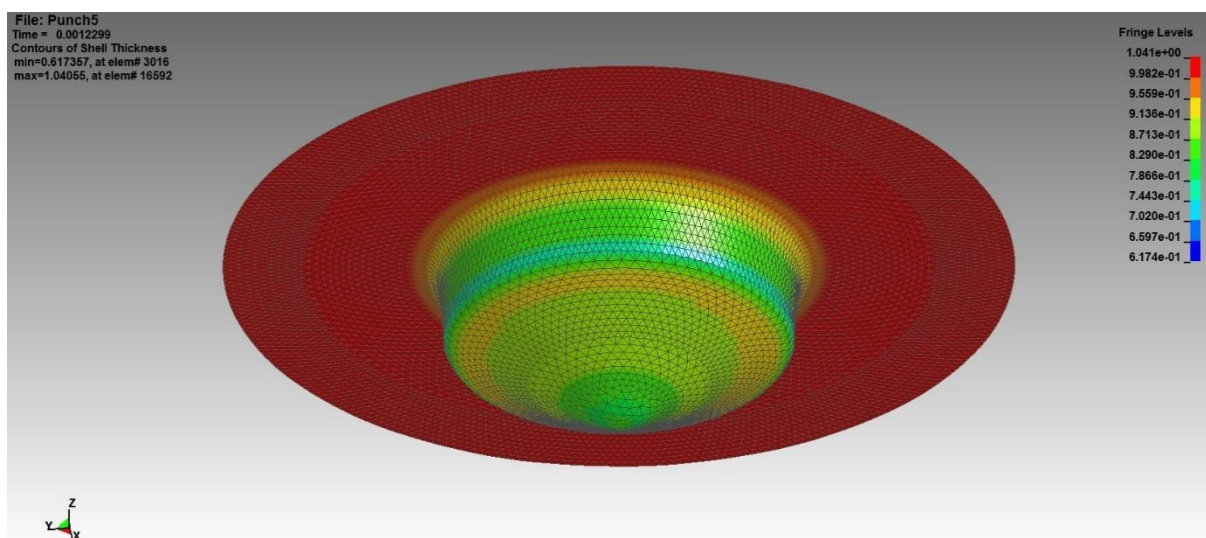


Рисунок 10 – Относительное утонение материала заготовки из меди М1

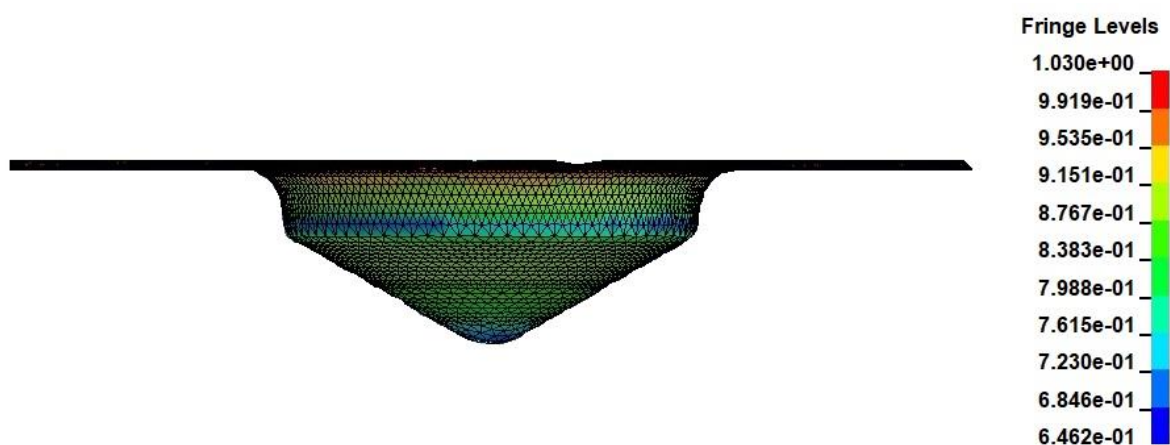


Рисунок 11 – Относительное утонение материала заготовки из алюминия АД1

Расчет проводился до начала разрушения материала заготовки.

Из полученных данных можно наблюдать, что наибольшей высотой обладает заготовка из меди (21,4 мм), наименьшей – заготовка из алюминия (17,8 мм). Заготовка из латуни обладает высотой 19,3 мм, из нержавеющей стали – 18,2 мм.

Наибольшее утонение у заготовки из меди наблюдается у дна (до 0,76 мм), из латуни и меди – в зоне перехода цилиндрической части в коническую (до 0,71 мм и 0,62 мм соответственно), из алюминия – в обоих указанных выше зонах (до 0,65 мм).

Полученные результаты легко сопоставить с механическими характеристиками материалов заготовок. Так, например, высота вытянутой заготовки связана с относительным удлинением при разрыве, а максимальное утонение – с коэффициентом Пуассона.

Заключение

В данной работе была рассмотрена вытяжка заготовок различных материалов коническим пуансоном. Исследование, проведенное методом компьютерного моделирования, показало зависимость геометрии вытянутых заготовок от механических свойств материалов.

На основании полученных данных определены зоны возможного разрушения заготовки во время вытяжки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
2. Киреева, А. Е. Вытяжка конической облицовки из листовой заготовки / А. Е. Киреева, О. Н. Митин, Т. А. Ялхимова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 11-2. – С. 310-314.
3. Арсентьева, К. С. Формуемость тонколистовых низкоуглеродистых металлов при импульсных и статических нагрузках / К. С. Арсентьева, В. С. Мамутов // Неделя науки СПбПУ : Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–06 декабря 2014 года / Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. – С. 125-128.

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ МАТРИЦЫ НА РАЗМЕР ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ СВОБОДНОЙ ГИБКЕ

Аннотация

Производство кронштейнов из листового металла для крепления и соединения между собой отдельных деталей находит широкое распространение в различных отраслях промышленности. Точность расчета габаритов развертки в значительной степени сказывается на точности получения готовой детали и простоте сборки конструкции. Ключевым фактором точности расчета размеров развертки, является K -фактор, который равен расстоянию от нейтральной оси до внутренней поверхности листа в месте радиусагиба отнесенному к толщине исходной заготовки. В данной работе эмпирическим путем установлена зависимость K -фактора от ширины раскрытия матрицы, рассчитаны значения K -фактора.

Ключевые слова: гибка, листовая заготовка, развертка, матрица, нейтральная ось

Введение

При расчете исходной заготовки детали следует учитывать ее увеличение на участке возникающих растягивающих напряжений в слое металла по наружному радиусугиба. Для этого необходимо при расчете размеров исходной заготовки вычесть размер участка металла подвергнувшегося растяжению (BD) из суммы размеров двух полок ($Y_2 + X_2$). На рисунке 1 показана схема расчета исходной заготовки (развертки).

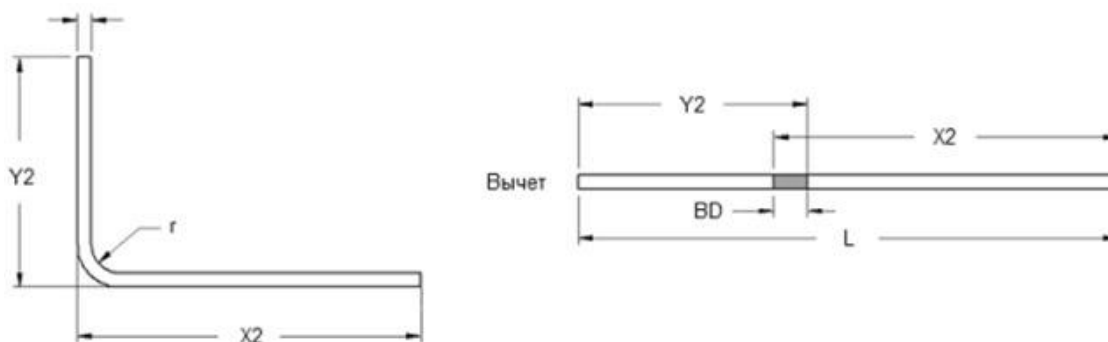


Рисунок 1 – Схема расчета развертки листовой заготовки

Длина исходной заготовки (L) рассчитывается по формуле (1):

$$L = (Y_2 + X_2) - BD, \quad (1)$$

где Y_2 – размеры полки 1, мм; X_2 – размеры полки 2, мм; BD – участок растяжения, мм.

Из формулы 1 определяем величину участка растяжения:

$$BD = L - (Y_2 + X_2) \quad (2)$$

Рассчитать участок растяжения BD можно по формуле 3:

$$BD = 2 \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) (r - s) - \frac{\pi \times \varphi}{180} (r + k \times s) \right), \quad (3)$$

где φ – уголгиба, °; r – внутренний радиус, мм; s – толщина металла, мм; k – K -фактор [1].

Приравняв выражения 2 и 3, можно определить K -фактор (4):

$$K = \frac{(2 \left(tg \left(\frac{\varphi}{2} \right) (r + s) \right) - (L - (Y_2 + X_2))) \times 180}{\pi \varphi r s} \quad (4)$$

Слой металла, в котором действуют сжимающие напряжения и слой металла, в котором действуют растягивающие напряжения, разделяются нейтральной осью (Рис 2). Нейтральная ось при изгибе листа смещается в направлении области действия сжимающих напряжений.

В настоящее время, на практике, K -фактор определяют с помощью диаграмм, предложенных разными авторами [2]. На рисунке 3 представлен график выбора K -фактора по справочным источникам.

Такой метод определения K -фактора не обеспечивает достаточной точности расчета развертки заготовки поскольку используются усредненные значения (табл. 1) [3]. В таблице 1 приведены усредненные значения K -фактора.

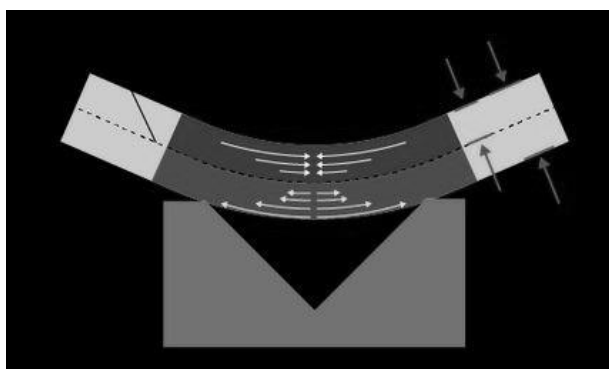


Рисунок 2 – Схема действия сжимающих и растягивающих напряжений по толщине металла

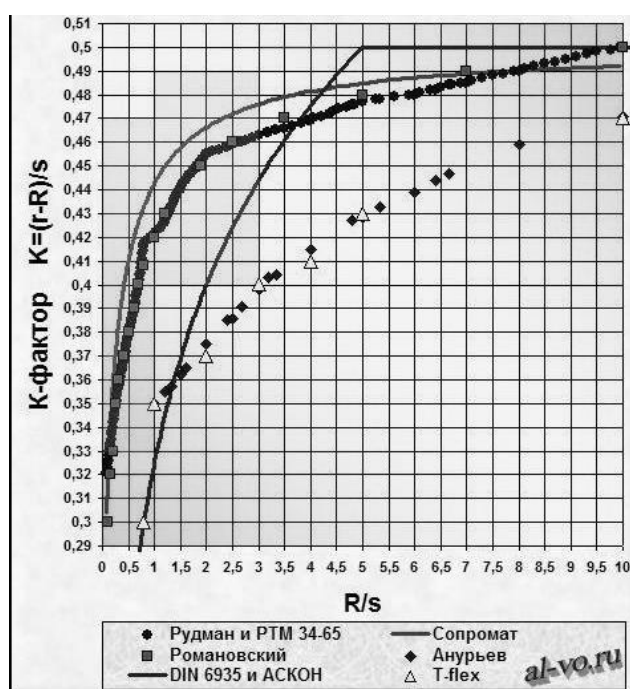


Рисунок 3 – Зависимость K -фактора от коэффициента положения нейтрального слоя при гибке по данным источника [2]

Таблица 1– Значения K -фактора для расчета разверток методом свободной гибки

Материал	$R/s < 1$	$1 \leq R/s \leq 3$	$R/s > 3$
Предел прочности < 300 МПа	0,33	0,4	0,5
$300 \text{ МПа} \leq$ Предел прочности ≤ 400 МПа	0,38	0,43	0,5
Предел прочности > 400 МПа	0,4	0,45	0,5

Авторы предлагали определять величину значения K -фактора только учитывая предел прочности материала, отношения внутреннего радиусагиба к толщине заготовки (R/s). Это приводило к погрешности расчета развертки, так как не учитывался

такой важный параметр технологического процесса, как ширина раскрытия матрицы (V), оказывающий влияние на точность расчета.

Исходя из выше сказанного, было проведено дополнительное исследование по определению влияния ширины раскрытия матрицы на K -фактор.

Для этого были проведены эксперименты по гибке заготовок при различных значениях ширины раскрытия матрицы.

Методика исследования

При проведении эксперимента использовали заготовки из следующих марок сталей: Сталь 3 с толщиной листа 0,5; 0,7; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 и сталь 12Х18Н10Т с толщиной листа 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5. Радиусгиба детали был принят равным толщине листа ($R=s$).

Опытную гибку выполняли по чертежу детали, показанной на рисунке 4.

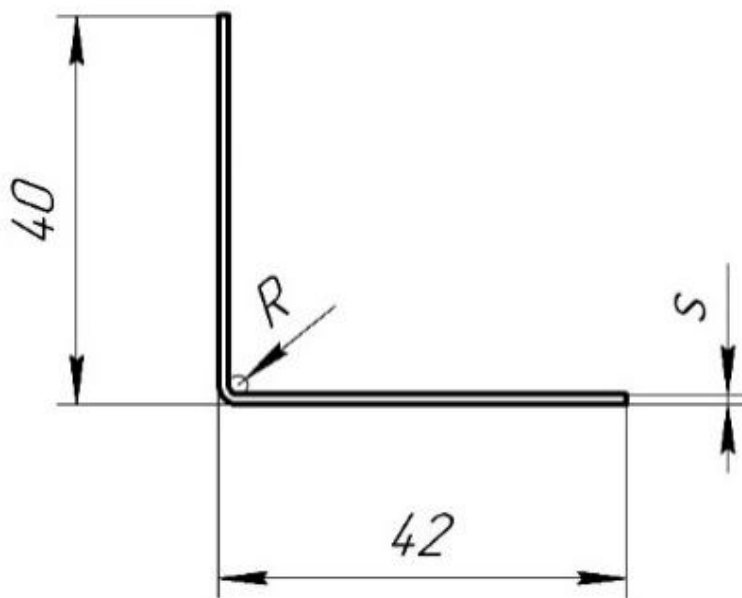


Рисунок 4 – Типовая деталь исследования

Результаты и обсуждение

Ширина раскрытия матрицы была выбрана в зависимости от марки стали и толщины детали [4]. Исходные значения ширины раскрытия матрицы при проведении эксперимента приведены в таблице 2.

Расчетным путем определили значение параметра BD по формуле 2. При этом $Y_2=40$ мм, $X_2=42$ мм. Полученные значения BD приведены в таблице 3.

Используя формулу 4 и результаты значения параметра BD , рассчитали K -фактор (Табл. 4).

Для наглядности и удобства использования полученных результатов были построены графики зависимости K -фактора от марки стали, толщины листа и ширины раскрытия матрицы (рис. 5 и 6).

Таблица 2 – Исходные значения ширины раскрытия матрицы

Марка материала	Толщина заготовки	Рекомендуемое раскрытие матрицы 1	Рекомендуемое раскрытие матрицы 2	Внутренний радиус детали, R мм
Сталь 3	0,5 мм	V6	V8	0,5
Сталь 3	0,7 мм	V6	V8	0,7
Сталь 3	0,8 мм	V6	V8	0,8
Сталь 3	1,0 мм	V6	V8	1,0
Сталь 3	1,5 мм	V8	V10	1,5
Сталь 3	2,0 мм	V10	V12	2,0
Сталь 3	2,5 мм	V12	V16	2,5
Сталь 3	3,0 мм	V16	V20	3,0
12X18H10T	0,8 мм	V6	V8	0,8
12X18H10T	1,0 мм	V6	V8	1,0
12X18H10T	1,5 мм	V8	V10	1,5
12X18H10T	2,0 мм	V12	V16	2,0
12X18H10T	2,5 мм	V16	V20	2,5

Таблица 3 – Расчетные результаты значения BD

Марка материала	Толщина заготовки	Раскрытие матрицы 1	BD при раскрытии матрицы 1, мм	Раскрытие матрицы 2	BD 2 при раскрытии матрицы 2, мм
Сталь 3	0,5 мм	V6	1,1	V8	1,18
Сталь 3	0,7 мм	V6	1,4	V8	1,49
Сталь 3	0,8 мм	V6	1,5	V8	1,63
Сталь 3	1,0 мм	V6	1,85	V8	1,93
Сталь 3	1,5 мм	V8	2,6	V10	2,8
Сталь 3	2,0 мм	V10	3,5	V12	3,63
Сталь 3	2,5 мм	V12	4,3	V16	4,6
Сталь 3	3,0 мм	V16	5,1	V20	5,6
12X18H10T	0,8 мм	V6	1,5	V8	1,6
12X18H10T	1,0 мм	V6	1,7	V8	1,9
12X18H10T	1,5 мм	V8	2,7	V10	2,74
12X18H10T	2,0 мм	V12	3,7	V16	3,8
12X18H10T	2,5 мм	V16	4,5	V20	4,75

Таблица 4 – Расчетные значения K -фактора

Марка материала и толщина детали	Раскрытие матрицы 1	k -фактор для раскрытия матрицы 1	Раскрытие матрицы 2	k -фактор для раскрытия матрицы 2
Сталь 3 0,5 мм	V6	0,31	V8	0,29
Сталь 3 0,7 мм	V6	0,34	V8	0,32
Сталь 3 0,8 мм	V6	0,35	V8	0,32
Сталь 3 1,0 мм	V6	0,37	V8	0,35
Сталь 3 1,5 мм	V8	0,4	V10	0,36
Сталь 3 2,0 мм	V10	0,43	V12	0,41
Сталь 3 2,5 мм	V12	0,46	V16	0,43
Сталь 3 3,0 мм	V16	0,47	V20	0,44
12X18H10T 0,8 мм	V6	0,36	V8	0,34
12X18H10T 1,0 мм	V6	0,38	V8	0,34
12X18H10T 1,5 мм	V8	0,42	V10	0,41
12X18H10T 2,0 мм	V12	0,44	V16	0,42
12X18H10T 2,5 мм	V16	0,45	V20	0,42

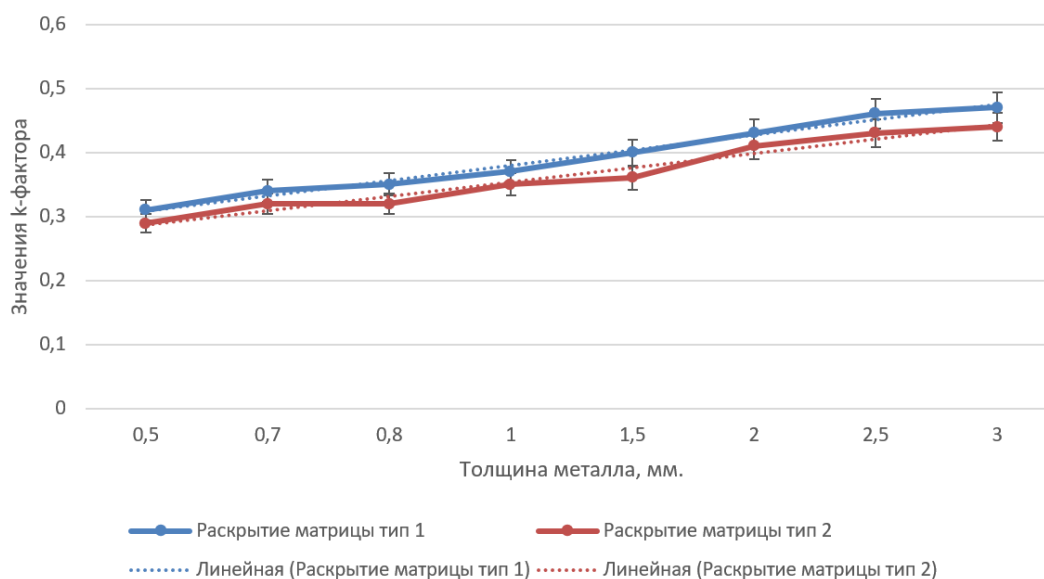


Рисунок 5 – График зависимости K -фактора от толщины листа и ширины раскрытия матрицы для Стали 3

Заключение

Таким образом, установлена зависимость влияния ширины раскрытия матрицы на точность расчета развертки. Получена уточненная формула расчета K -фактора, учитывающая ширину раскрытия матрицы, обеспечивающая 4-5 квалитет точности деталей при свободной гибке.

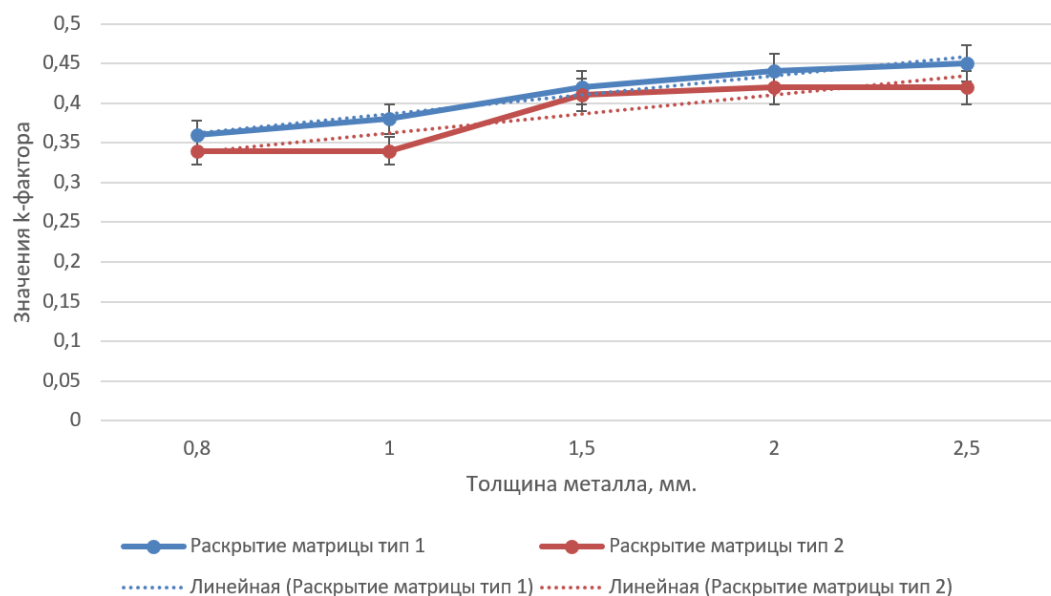


Рисунок 6 – График зависимости K -фактора от толщины листа и ширины раскрытия матрицы для стали 12X18H10T

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысов, М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. И. Лысов, д-р техн. наук проф. – Москва : Машиностроение, 1966. – 236 с.
2. Попов, Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки: учеб. пособ. для вузов / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 480 с.
3. Шинкин, В.Н. Сопротивление материалов для металлургов / В.Н. Шинкин. – Москва : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 655 с.
4. Калькулятор параметров и усилия гибки: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metal-tool.ru/ukb/kalkulyator-parametrov-i-usiliya-gibki.htm> (Дата обращения: 15.07.2023).

К.В. Лепетан, П.А. Кузнецов, А.О. Просторова, А.В. Соловьяненко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, lepetan_k@mail.ru

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБ В КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Аннотация

В работе проанализирована существующая технология изготовления трубных элементов кожухотрубных теплообменников, основанная на развальцовке концов труб, помещенных в отверстия трубной решетки. Применяемые для этого роликовые вальцовки довольно сложны в изготовлении, а трудоёмкость их использования достаточно велика. Предложен вариант технологии изготовления трубных элементов, включающий предварительное редуцирование концов труб и их последующую запрессовку «пакетом» в трубных досках на гидравлическом горизонтальном прессе. Для опытного и мелкосерийного производства предложена технология радиальной запрессовки эластичной средой. Предложения снижают трудоемкость изготовления малогабаритных теплообменников.

Ключевые слова: кожухотрубные теплообменники, дорнование, редуцирование, раздача на конус, запрессовка труб

Введение

Применение труб и трубчатых заготовок в различных отраслях промышленности занимает значительное место [1,2]. Одним из постоянных потребителей труб является производство кожухотрубных теплообменников, которые весьма востребованы в холодильной, химической и др. областях производства [2,3]. Трудоёмкость изготовления кожухотрубных теплообменников весьма значительна, так как включает в себя операции раскроя, резки листовых и трубных заготовок, штамповку крышек, сварку, металлообработку, развальцовку концов труб в трубных решетках, сварку, термообработку, финишную обработку и др.

Важной операцией, определяющей качество и надежность работы теплообменников, является операция закрепления труб в трубной решетке. Закрепление осуществляют различными способами: в конструкциях для атомной промышленности - методом взрыва, в энергетических теплообменных аппаратах применяют установки электрогидроимпульсной развальцовки трубок, использующие энергию, выделяемую при высоковольтном электрическом разряде на взрывающейся проволоке унифицированного патрона, заполненного водой. Но указанные методы из-за повышенных требований по технике безопасности не нашли широкого применения. Наиболее распространенным является метод развальцовки, широко применяемый в химической промышленности [3,4].

Сущность метода поясняется на рисунке 1. На рис.1,а показана одна из возможных конструктивных схем вальцовки, содержащая три конических ролика, установленных под углом 120° друг к другу по периметру вальцовки, и центральным нажимным конусом. Вальцовка приводится в действие электрическим или пневматическим приводом.

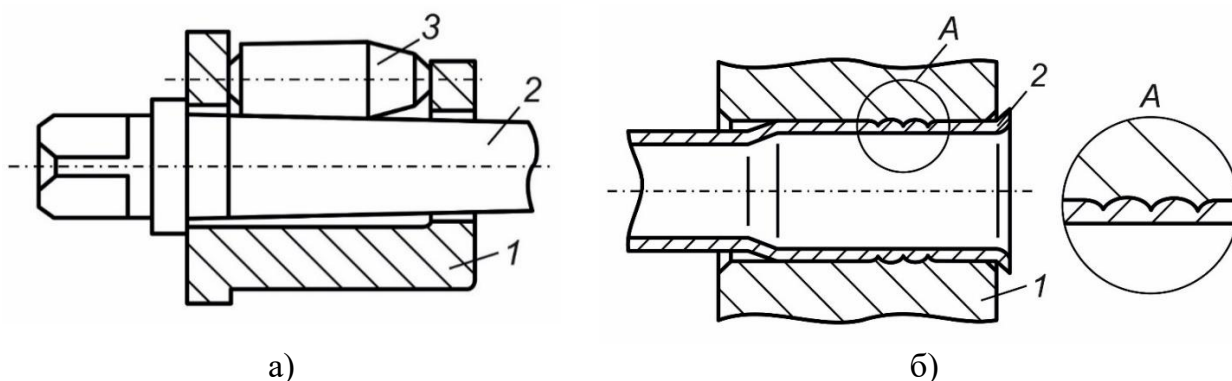


Рисунок 1 – а) принципиальная схема роликовой вальцовки: 1 – корпус, 2 – конус, 3 – вальцовочные ролики; б) схема завальцовки трубы в трубной решетке: 1 – трубная решетка, 2 – труба

Вальцевание становится более эффективным при применении кольцевых рельефов в отверстиях трубной решетки. На рис. 1,б показана схема завальцовки трубы в отверстии с кольцевыми рельефами. Но изготовление кольцевых рельефов увеличивает трудоёмкость. Кроме того, при вальцевании происходит утонение стенок труб, которое может вызвать появление кольцевых трещин и даже поломку. Для предупреждения чрезмерного утонения стенок трубок применяют автоматические устройства, ограничивающие крутящий момент на конце вальцовки [3]. При окончании процесса вальцевания, т. е. снятия давления роликов на внутреннюю стенку трубы, происходит уменьшение диаметра трубы на величину упругой деформации. Следовательно, герметичность и прочность соединения несколько уменьшаются. В частности, при вальцевании трубок из пластичных материалов, например алюминиевых сплавов, вальцевание не всегда обеспечивает достаточную герметичность, поэтому приходится применять дополнительные меры для её достижения. Несомненно, задача уменьшения трудоёмкости операций закрепления труб в трубной решетке является актуальной.

Методы

Анализируя различные способы получения разъёмных и неразъёмных соединений, можно выделить способ запрессовки, при котором внутренний элемент соединения (кольцо, труба) запрессовывается в наружную обойму с фиксированным натягом [5]. Следовательно, подготовив концы труб, придав им размер, который в соответствии с расчетным размером отверстия в решетке обеспечит требуемый натяг, можно получить надежное соединение и снизить трудоёмкость соединения труб с решеткой. Подготовительную операцию можно осуществлять редуцированием, дорнованием или раздачей в зависимости от последующей операции запрессовки. Оборудованием для этой операции могут служить универсальные гидравлические прессы. На рисунке 2 показаны различные виды концов труб, подготовленных для запрессовки в решетку.

Вариант редуцирования концов труб (рис.2,а) является наиболее технологичным, так как редуцированные трубы можно собрать в пакет и запрессовать в решетку одновременно на горизонтальном гидравлическом прессе, например, на прессе П6738Б (производство «ПРЕССМАШ»).

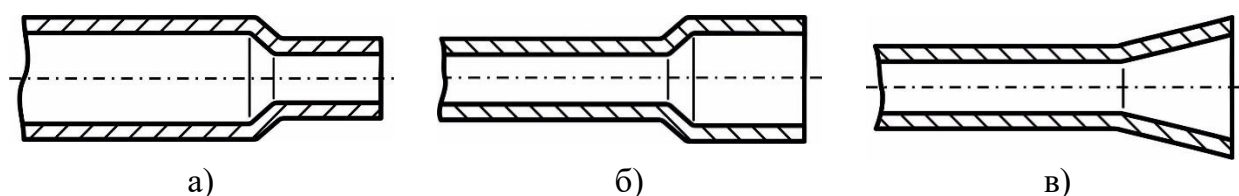


Рисунок 2 – Виды концов труб: а) после редуцирования; б) после дорнования; в) после раздачи на конус

Однако операции предварительной деформации концов труб и запрессовки имеют ограничения в связи с возможной потерей устойчивости трубы. В очаге деформации при обжиме действуют меридиональные сжимающие напряжения, изменяющиеся по очагу деформации, и окружные сжимающие напряжения, постоянные в окружном направлении ввиду осевой симметрии. Максимальное значение меридиональных напряжений имеет место в недеформируемой части заготовки (в зоне передачи усилия). Величина этих напряжений и усилие деформирования при обжиме могут быть рассчитаны по формулам, представленным, например в работе [3]. Лимитирующим фактором при обжиме является потеря устойчивости (образование кольцевой складки) в зоне передачи усилия. Потеря устойчивости происходит при степенях формоизменения, при которых максимальные значения меридиональных напряжений становятся равными или больше критических напряжений потери устойчивости.

Результаты

При использовании тонкостенных труб в теплообменниках более надежным и устойчивым процессом их закрепления в решетках является вариант радиальной раздачи. Предлагается процесс раздачи осуществлять эластичной средой, помещенной в конец трубы [6,7]. На рисунке 3 представлена принципиальная схема радиальной запрессовки трубы в решетке эластичной средой. Процесс осуществляется следующим образом. Конец трубы 1 помещается в трубную решетку 3. В отверстие трубы вводится конус 2, закрепленный вместе с полиуретановой втулкой 4 на штоке 6. Внутренний объем отверстия в решетке замыкается прижимом 5. При сжатии полиуретановой втулки осевым усилием штока пневмо- или гидроцилиндра происходит передача давления в эластичной среде в радиальном направлении, что обеспечивает процесс напрессовки.

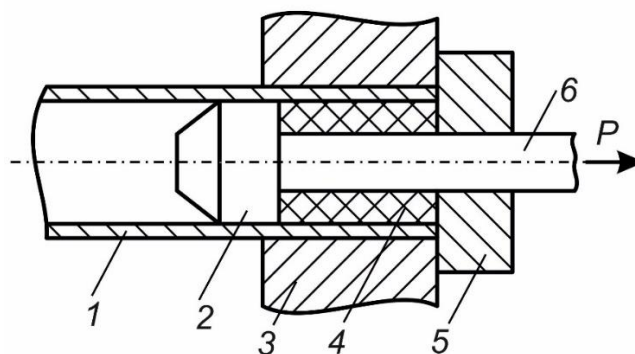


Рисунок 3 – Принципиальная схема радиальной запрессовки трубы в решетке эластичной средой: 1 – труба, 2 – конус, 3 – решетка, 4 – эластичная втулка, 5 – прижим, 6 – шток.

Обсуждение

При выборе варианта крепления трубы в решетке теплообменника следует опираться на данные предварительных выборочных испытаний на растяжение, на раздачу, на загиб и на результаты расчетов критических напряжений потери устойчивости, а также экономический расчет для данной серийности и условий производства.

Контроль качества соединений трубок в решетках осуществляют, в основном, по результатам гидроиспытаний. Принимаемые в эксплуатацию теплообменные аппараты должны быть установлены в соответствии с проектом и отвечать требованиям ПТЭ, Ростехнадзора, а также нормам по технике безопасности и противопожарной технике [8].

Заключение

Анализ возможных вариантов крепления труб в трубных досках показал возможность применения различных вариантов их эффективного крепления, в том числе вариант запрессовки «пакетом» на горизонтальном гидравлическом прессе. Использование варианта радиальной напрессовки эластичной средой позволяет значительно снизить трудоемкость изготовления в опытном и мелкосерийном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб. / Ю.Ф. Шевакин, А.П. Коликов, Ю.И. Райков. – М: Интермет Инжиниринг, 2005. – 564 с.
2. Интенсификация формообразования деталей из трубных заготовок / Ю. Л. Иванов, В. М. Сапожников, О. В. Попов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1996. – 167 с.
3. Кондратенко, Л.А. Механика роликового вальцевания теплообменных труб / Л.А. Кондратенко. – Москва: Спутник, 2015. – 158 с.
4. Пат. 34410. РФ. МПК B21D41/02. Устройство для раздачи концов труб / Марьин Б. Н. ; заявитель и патентообладатель «Открытое акционерное общество «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю. А. Гагарина»». № 2001130909/02; Заявл. 15.11.2001; Оpubл. 10.12.2003. Бюл. № 15. – М.: ФИПС. – 2 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т.2./ под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. The elastostatic pressing and rotary forging of high-density sintered products technology / P. A. Kuznetsov, I. D. Karachevtsev, A. O. Prostorova [et al.]. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2022. – P. 159-166.
7. Технология эластостатического прессования и торцевой раскатки высокоплотных спеченных изделий / П. А. Кузнецов, И. Д. Карачевцев, А. О. Просторова [и др.]. // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2021. – № 10. – С. 586-598.
8. Любомудров, С. А. Технологическое обеспечение качества машиностроительного производства / С. А. Любомудров, Д. Ю. Колодяжный, С. Г. Орлов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2020. – 191 с.

Д.А. Мельничук, Н.Д. Павлов, С.Н. Кункин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, melnichuk.da@mail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ НА ШТАМПОВКУ АДАПТЕРА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

Аннотация

В данной работе рассмотрено влияние геометрии заготовки на распределение температуры, интенсивность деформаций, усилие штамповки при предварительной и точной окончательной штамповке адаптера колесной пары железнодорожного вагона. В результате проделанной работы была выбрана наиболее подходящая геометрия заготовки.

Ключевые слова: DEFORM, горячая штамповка, конечно-элементная модель.

Введение

Выбор геометрии исходной заготовки является важной частью технологического процесса. При правильном выборе геометрии заготовки можно добиться наилучших параметров в процессе штамповки [1,2]. В данной статье сравнивается использование двух различных по геометрии заготовок при точной штамповке детали.

Цель работы: на основании результатов численного моделирования выбрать геометрию заготовки, которая обеспечит лучшие технологические параметры.

Методы исследования

Для моделирования процесса штамповки используется метод конечных элементов. Теоретическое исследование осуществлялось с применением программы DEFORM.

Трехмерные модели инструмента и заготовки создаются с помощью программного обеспечения КОМПАС-3D в соответствии с разработанным процессом штамповки адаптера колесной пары железнодорожного вагона [3,4]. Модели были импортированы в программный комплекс DEFORM-3D в виде STL файлов для создания численной конечно-элементной модели процесса предварительной и окончательной штамповки.

Результаты и обсуждение

Моделирование процессов точной горячей штамповки было проведено в программном комплексе Deform. Штамповка детали состоит из предварительной и окончательной штамповки. Окончательная штамповка осуществляется в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Исходные данные для ввода в программу:

1) Штамповые вставки для компьютерного моделирования создавались в программе Компас-3D. Для сокращения продолжительности расчета все процессы смоделированы для $\frac{1}{4}$ части детали (Рисунок 1).

2) Материал заготовки AISI-1035 (зарубежный аналог стали 35).

3) Штамповка производится на гидравлическом прессе. Скорость штамповки 25 мм/с[1,2].

4) Влиянием неравномерности нагрева заготовки пренебрегаем, моделирование процесса нагрева не проводится, весь объем заготовки считаем прогретым до 1250° С.

5) Инструмент считаем в Deform недеформируемым (для сокращения продолжительности расчета). Температура подогрева штампов 250° С.

6) Производим расчёт распределения температуры только в детали, что позволяет сократить его продолжительность.

7) Трение по закону Зибеля. Фактор трения $m=0,3$ [5].

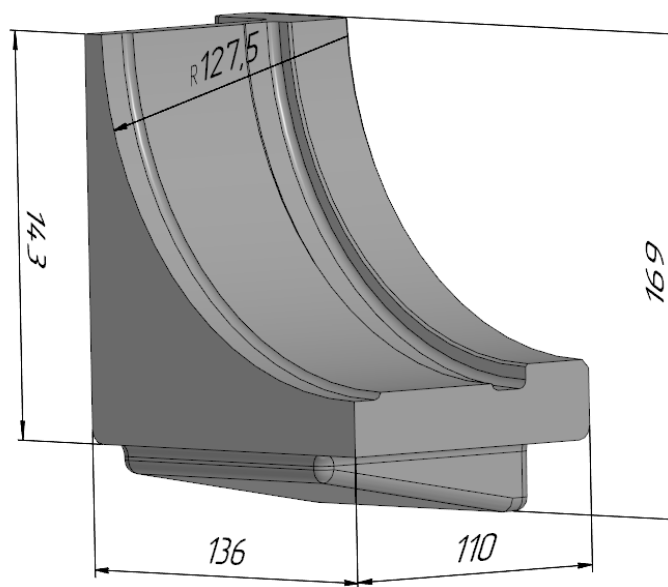


Рисунок 6– Модель 1/4 части детали с размерами

В качестве исходных заготовок использовались:

- Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой ГОСТ 103-2006 [6] размером 76×200×300 мм ориентированный горизонтально.

- Прокат стальной горячекатаный квадратный ГОСТ 2591-2006 [7] размером 160×160×176 мм ориентированный вертикально.

Максимальное усилие при предварительной штамповке четверти детали из заготовки квадратного профиля составило 14 МН, а из прямоугольного профиля 15,1 МН.

На рисунке 2 представлено распределение температуры после предварительной штамповки.

При предварительной штамповке центральная часть поковки из квадратного проката остывает больше, чем при предварительной штамповке из прямоугольного проката. В то же время задняя стенка поковки из квадратного проката остывает меньше, чем при предварительной штамповке из прямоугольного проката. Это связано с тем, что заготовка из квадратного проката большее время находится в контакте с верхним штампом, а заготовка из прямоугольного проката с нижним.

На рисунке 3 представлены эффективные деформации после предварительной штамповки.

Из рисунка видно, что при предварительной штамповке поковки из прямоугольного профиля, заготовка практически не осаживается. Максимальная деформация наблюдается на радиусе скругления, в месте, где происходит гибка.

Заготовка из квадратного профиля подвергается и осадке и гибке, максимальная деформация наблюдается на радиусе скругления.

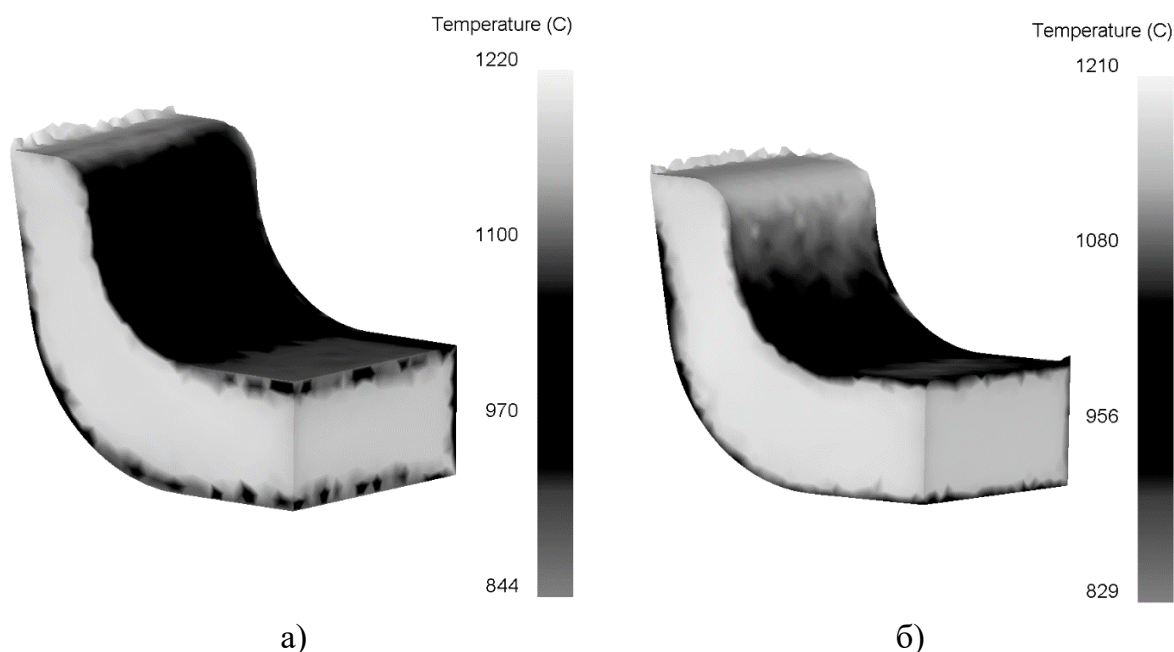


Рисунок 2 – Распределение температуры после предварительной штамповки:
а) из заготовки квадратного профиля б) из заготовки прямоугольного профиля

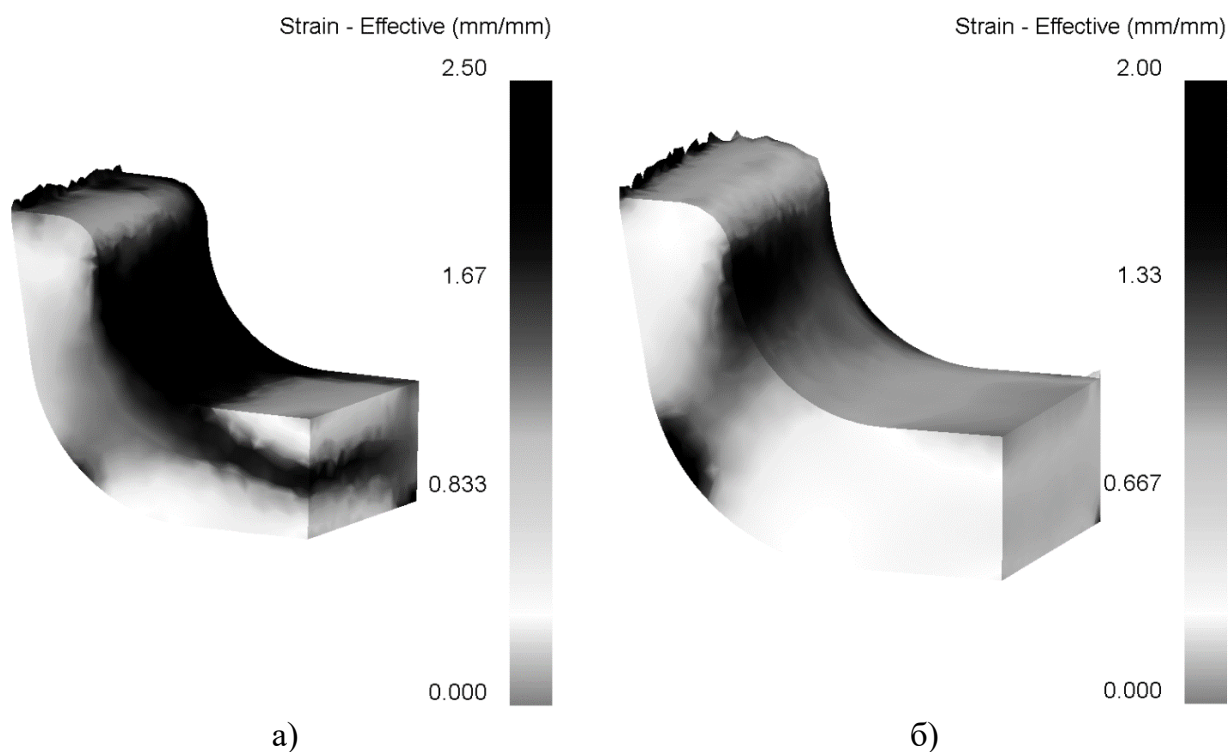


Рисунок 3 – Эффективная деформация после предварительной штамповки:
а) из заготовки квадратного профиля б) из заготовки прямоугольного профиля

На рисунках 4 и 5 представлены графики усилий после окончательной штамповки.

Из рисунков видно, что для штамповки из квадратного профиля требуется меньшее усилие как по оси Z, так и по оси X.

Температуры в окончательных поковках находятся в одном интервале и отличаются незначительно.

На рисунке 6 представлены эффективные деформации после окончательной штамповки.

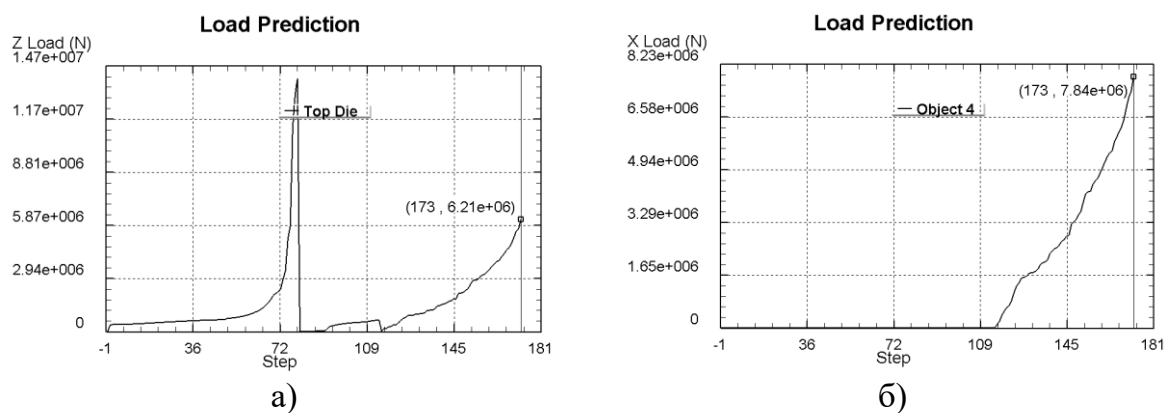


Рисунок 4 – Усилие при штамповке из заготовки квадратного профиля: а) по оси Z б) по оси X

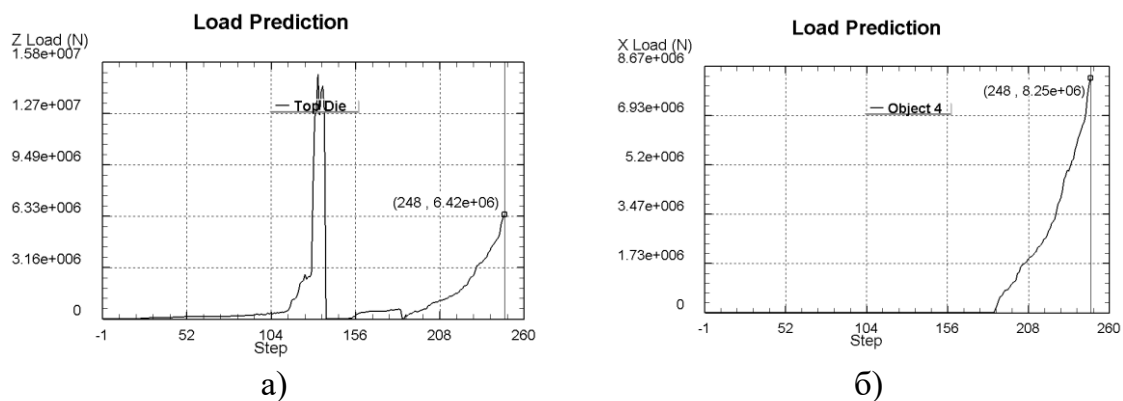


Рисунок 5 – Усилие при штамповке из заготовки прямоугольного профиля: а) по оси Z б) по оси X

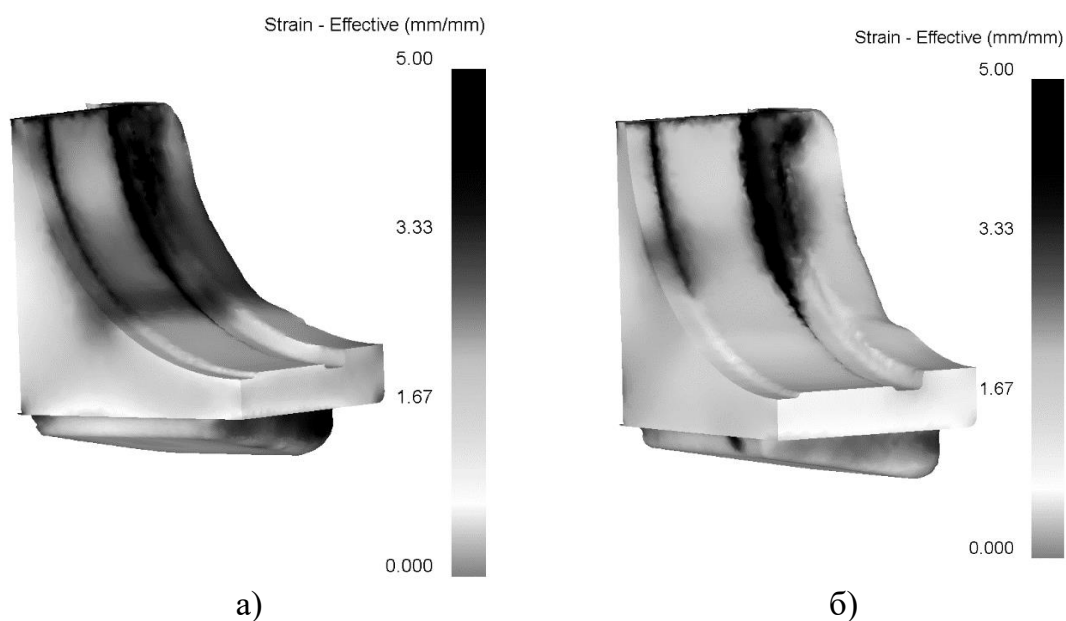


Рисунок 6 – Эффективная деформация после окончательной штамповки: а) из заготовки квадратного профиля б) из заготовки прямоугольного профиля

Более равномерное распределение деформации имеет поковка из квадратного профиля.

Заключение

На основании компьютерного моделирования был выбран оптимальный технологический процесс точной штамповки адаптера колесной пары железнодорожного вагона. Штамповка осуществляется на гидравлическом прессе, скорость штамповки 25 мм/с, температура металла перед штамповкой 1250° С, температура штампов 250° С. В качестве заготовки прокат квадратного профиля подходит лучше, так как требует меньшего усилия штамповки, а деформация распределена более равномерно, что хорошо скажется на микроструктуре изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинов, И. Л. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебник / И.Л. Константинов, С.Б. Сидельников. – 2-е изд., стереотип. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 487 с.
2. Константинов, И. Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки: учеб. пособие / И.Л. Константинов. – М.: ИНФРА-М ; Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 551 с.
3. Васильев, Д.И. Основы проектирования деформирующего инструмента: Учеб. пособие для металлургич. п машиностроит. спец. Вузов / Д.И. Васильев, М.А. Тылкин, Г.П. Тетерин. – М.: Высш. шк., 1984. – 223 с., ил.
4. Штампы для горячего деформирования металлов. Учеб. Пособие для вузов/ Под ред. М.А. Тылкина. – М.: «Высш. школа», 1977. – 496 с.
5. Петров, М. А. Теория обработки металлов давлением: штампы, износ и смазочные материалы : Учебное пособие / М. А. Петров, П. А. Петров, А. Н. Петров. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 130 с.
6. ГОСТ 103-2006. Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой. Сортамент : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 7 декабря 2006 г. № 30 : дата введения 2009-07-01. — Москва : Стандартинформ, 2009. – 12 с.
7. ГОСТ 2591-2006. Прокат сортовой стальной горячекатаный квадратный. Сортамент : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 7 декабря 2006 г. № 30 : дата введения 2009-07-01. — Москва : Стандартинформ, 2009. – 10 с.

А.Е. Сидоров, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, xenia.ars@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

В работе представлено исследование влияния скорости деформаций на процесс вытяжки тонколистовых деталей на примере квазистатической вытяжки в жестком штампе и электрогидроимпульсной вытяжки с помощью компьютерного моделирования.

Ключевые слова: квазистатическая вытяжка, импульсная вытяжка, тонколистовой металл, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Введение

Получение пространственных тонколистовых деталей из плоских заготовок вытяжкой является одним из эффективных методов обработки металлов давлением. Предельное формоизменение деталей ограничено коэффициентами вытяжки [1] и зависит от большого числа факторов, в частности от скорости прилагаемой нагрузки. Электрогидроимпульсная штамповка позволяет достичь большего предельного формоизменения в сравнении с квазистатической [2]. Однако любая импульсная технология является наукоемкой, зависит от значительного количества факторов, а экспериментальные исследования являются малоинформативными и затратными по ресурсам и времени. Кроме того, скорость прилагаемой нагрузки также влияет на вероятность возникновения дефектов и их характер [3]. Поэтому для исследования подобных процессов применяется компьютерное моделирование.

Цель данной работы – сравнительный анализ квазистатической и импульсной вытяжки коробчатой детали с фланцем с помощью компьютерного моделирования в конечно-элементном комплексе.

Методы исследования и постановка задачи

Для достижения поставленной цели использовалось проверенное на мировом уровне современное программное обеспечение. В качестве примера использовалась коробчатая деталь с фланцем (рисунок 1, 2) из латуни Л68. Плоская заготовка для данной детали определялась при помощи адаптированного метода Гюльдена-Паппуша [4] с последующей оптимизацией формы и проверкой по достаточности объема.

Для построения компьютерной модели инструментальной штамповки строилась поверхностная геометрия $\frac{1}{4}$ заготовки, матрицы, прижима и пуансона. Время квазистатического расчета определялось по параметру сходимости [5] и составило 2,74 мс. Нагружение задавалось посредством перемещения пуансона по линейному закону на требуемую глубину с последующим возвратом для оценки упругой отдачи.

Для построения компьютерной модели импульсной штамповки строилась поверхностная геометрия $\frac{1}{4}$ заготовки, матрицы и прижима. Нагружение задавалось с помощью экспоненциальной зависимости давления от времени с коэффициентом

нарастания нагрузки $t^*=0,5$ [6, 7]. Влияние скоростей деформации на материал заготовки учитывалось коэффициентом динамичности K_d [8]. В обоих случаях матрица строилась закрытой и повторяла внешние размеры коробчатой детали.

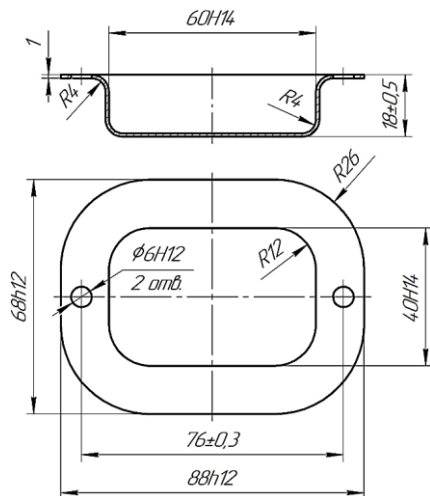


Рисунок 1 – Эскиз детали

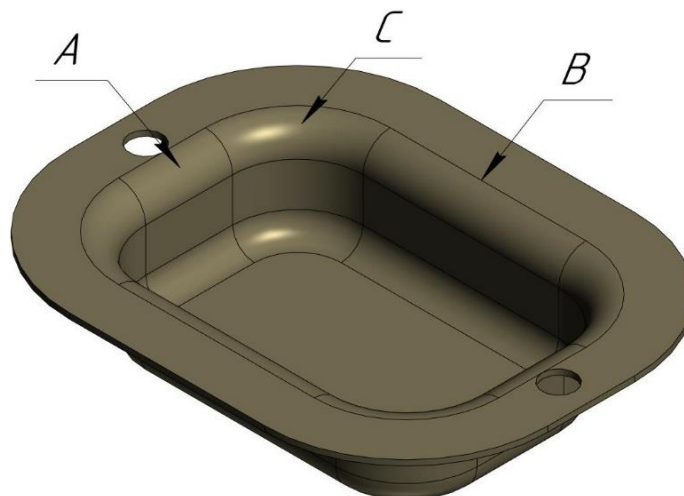
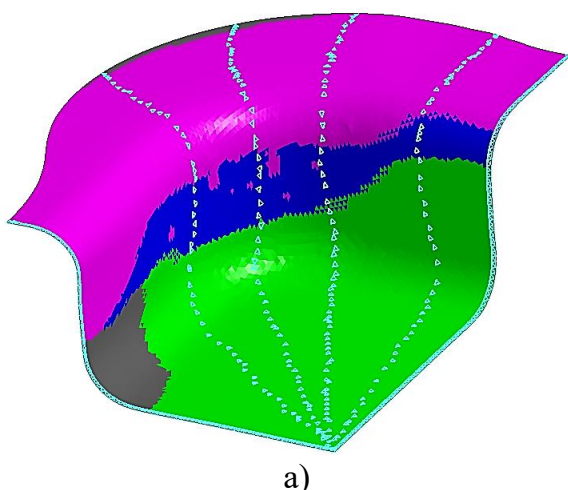


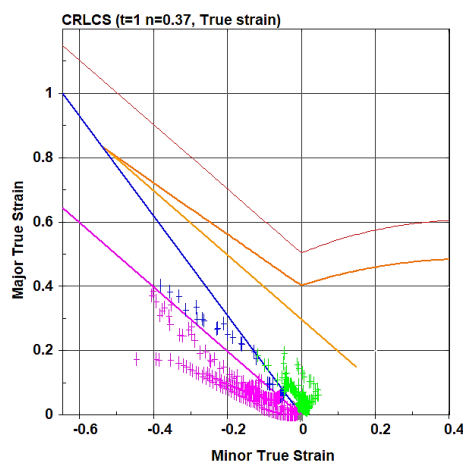
Рисунок 2 – Трехмерная модель детали

Результаты и обсуждение

Проводилось несколько сессий компьютерного моделирования, в частности для электрогидроимпульсной вытяжки, требующей подбора амплитудного значения давления. Расчет считался успешным в тех случаях, когда удавалось максимально заполнить дно закрытой матрицы и не возникало разрыва или риска трещинообразования детали. Анализ результатов проводился по следующим параметрам: визуализация зон диаграммы предельных деформаций (FormingLimitDiagram - *FLD*) и сама *FLD* (рисунки 3 и 4), заполнение матрицы (рисунки 5 и 6). Оценка проводилась для ряда конечных элементов, выбранных вдоль боковых стенок детали (по короткой *A* и длинной *B* боковой стенке) и в угловом участке *C* (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 3 – Диаграмма предельных деформаций при инструментальной штамповке:
а – визуализация зон на участках заготовки; б – *FLD*

Анализ *FLD* показал, что для данной детали не прогнозируется разрушение материала ни при инструментальной, ни при импульсной штамповке (рисунки 3 и 4). При импульсной штамповке наблюдается зона интенсивного утонения на угловом

участке *C* и складкообразование, ограниченное зоной фланца. Утонение достигает 47,5%. При инструментальной штамповке подобного утонения не наблюдается, однако происходит интенсивное складкообразование и утягивание складок внутрь матрицы, что приводит к короблению стенок детали.

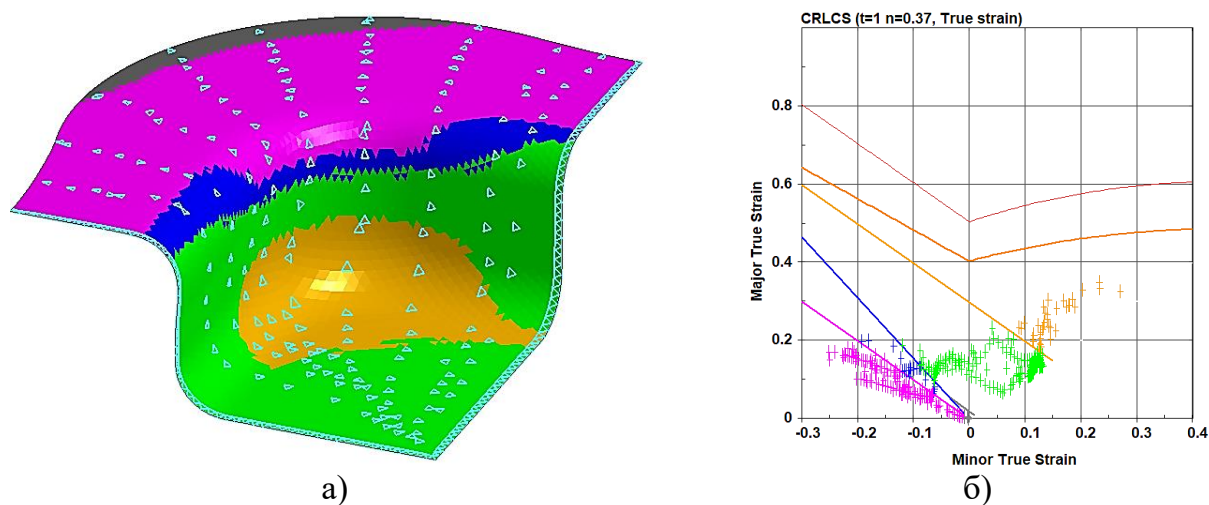


Рисунок 4 – Диаграмма предельных деформаций при импульсной штамповке:
а – визуализация зон на участках заготовки; б – *FLD*

Анализируя прогиб заготовки на различных участках детали при квазистатической штамповке по рисункам 5 (а, б и в) и 3 можно отметить следующее. Наиболее интенсивное утягивание материала заготовки в матрицу, а также наименьшее утонение на переходе от стенки ко дну детали при инструментальной штамповке наблюдается по короткой стороне *A*. Втягивание материала заготовки по длинной стороне *B* менее интенсивно. Наименьшее утягивание материала заготовки в матрицу можно наблюдать на угловом участке *C*, что связано с характером деформации на различных участках: *A* и *C* – близкое гибке, *B* – вытяжка углового участка, что типично при штамповке коробчатых деталей. Также можно наблюдать результат упругой отдачи: глубина детали получается меньше требуемой в среднем на 0.2 мм на рассматриваемых участках, что в целом укладывается в диапазон предельных отклонений, заданных по чертежу. Также следует отметить, что при инструментальной штамповке удалось получить вертикальную стенку детали.

Анализируя прогиб заготовки на различных участках детали при импульсной штамповке по рисункам 6 (а, б и в) и 4 можно отметить следующее. И на прямолинейных, и на угловом участке детали втягивание материала заготовки в матрицу значительно меньше, чем при инструментальной штамповке, а утонение на угловом участке, соответственно больше. Это можно объяснить динамическим характером нагружения: действием поперечных волновых эффектов и независимости деформации одних участков заготовки от других. Также при импульсной штамповке наблюдается выгиб верхних частей стенок ниже радиуса закругления кромки матрицы, т.е. стенки коробочки не вертикальны, а образуют с дном угол меньше 90 градусов. На различных участках отхождение от вертикали достигает 0,2–0,3 мм. Подобное отклонение стенок от вертикали можно объяснить действием инерционных сил, которых нет при применении жесткого инструмента. Чтобы нивелировать данный эффект были произведены попытки увеличить время импульса или усилия прижима, но они приводили к незаполнению углового скругления матрицы между дном и стенкой.

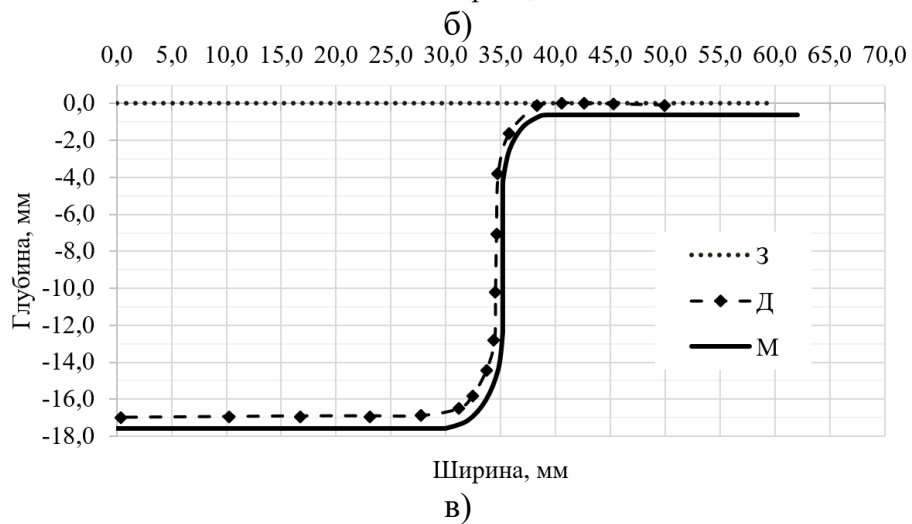
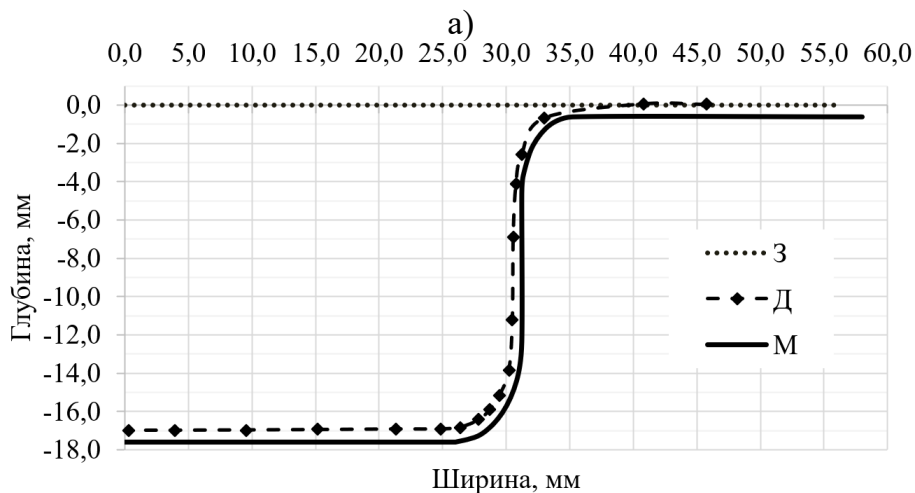
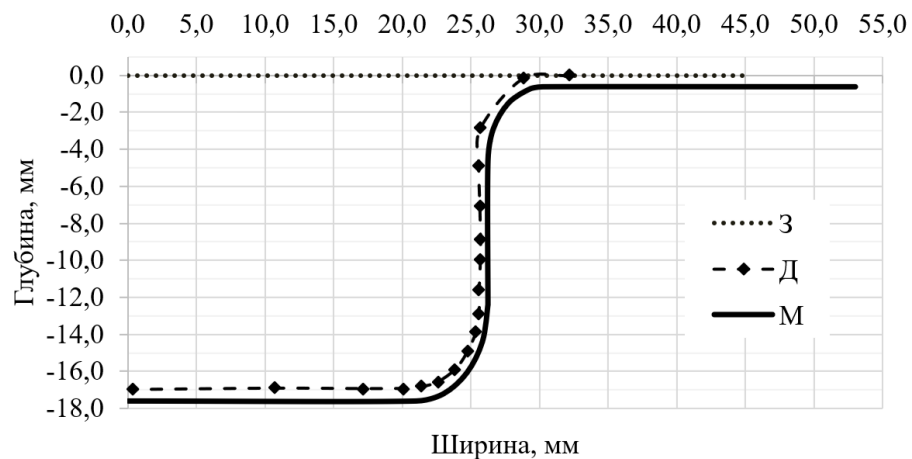
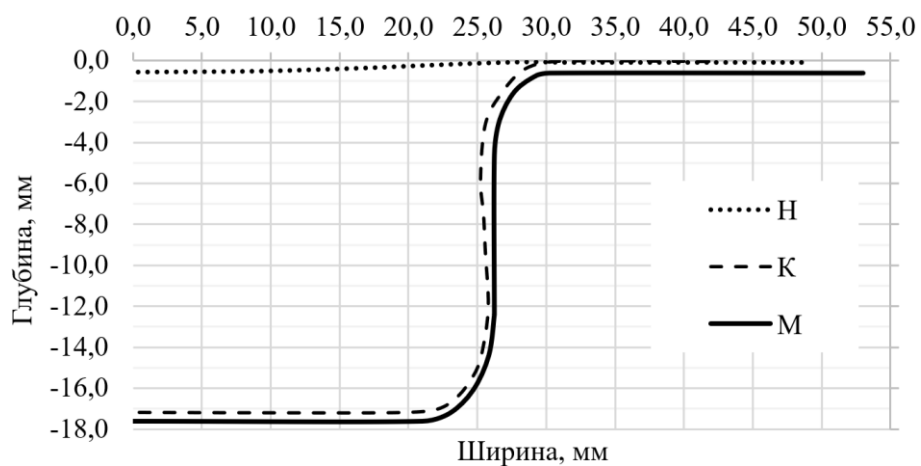
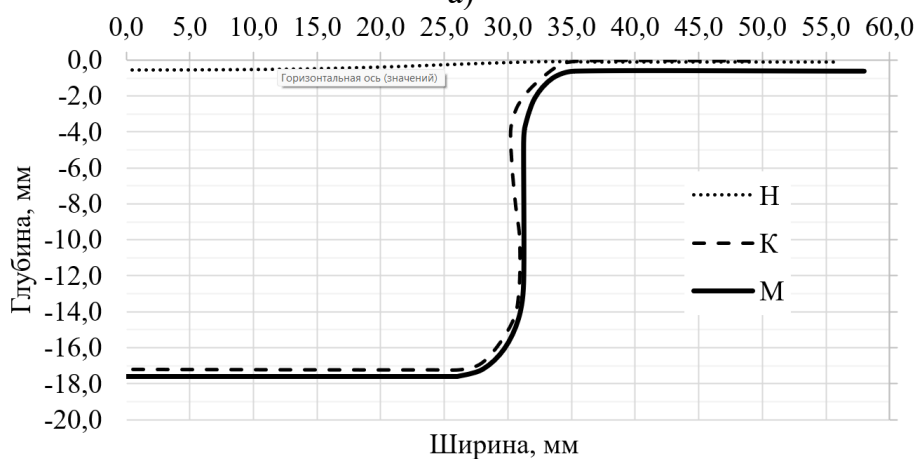


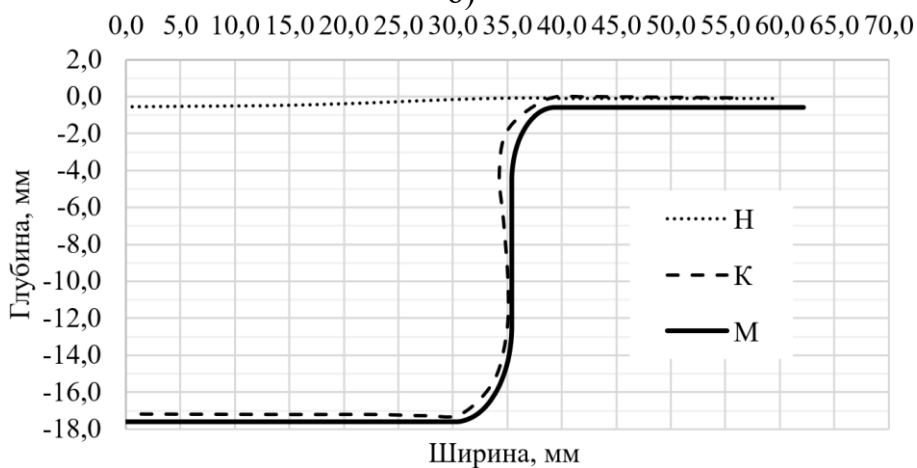
Рисунок 5 – Срединные линии прогибов при инструментальной штамповке в конечный момент времени
счета: а – короткая сторона А, б – длинная сторона В,
в – угловой участок С; 3 – положение заготовки в начальный
момент времени, М – профиль прогиба матрицы; Д – прогиб
детали в конечный момент времени счета



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Срединные линии прогибов при импульсной штамповке в конечный момент времени счета: а – короткая сторона *A*, б – длинная сторона *B*, в – угловой участок *C*; Н – начало действия импульса, К – конец действия импульса М – профиль прогиба матрицы

Заключение

В данной работе было проведено исследование инструментальной и импульсной вытяжки коробчатой детали с фланцем «Крышка» с применением компьютерного моделирования. Результаты моделирования показали, что при инструментальной штамповке более интенсивно происходит складкообразование фланца с утяжкой

складок внутри матрицы, а также наблюдается упругая отдача порядка 0.2 мм. При импульсной вытяжке наблюдается меньшая интенсивность складкообразования, отсутствие упругой отдачи, однако наблюдаются некоторые трудности с заполнением формы матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.

2. Арсентьева, К. С. Формуемость тонколистовых низкоуглеродистых металлов при импульсных и статических нагрузках / К. С. Арсентьева, В. С. Мамутов // Неделя науки СПбПУ : Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 01–06 декабря 2014 года / Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. – С. 125-128.

3. Арсентьева, К. С. Складкообразование при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей / К. С. Арсентьева // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 190-199.

4. Арсентьева, К. С. Применение метода Гюльдена-Паппуша для определения заготовок для деталей коробчатой формы / К. С. Арсентьева, А. Е. Сидоров, Е. В. Сидорова // Инновационные идеи в машиностроении : Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 года / Под редакцией А.А. Поповича, Д.П. Гасюка. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 415-418.

5. Арсентьева, К. С. Расчет процессов квазистатической формовки подвижными средами с применением комплекса LS-DYNA / К. С. Арсентьева, В. С. Мамутов // Неделя науки СПбПУ : материалы научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 02–07 декабря 2013 года / Редакционная коллегия: М.С. Кокорин (ответственный редактор) и др.. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2014. – С. 114-117.

6. Арсентьева, К. С. Задание нагружения в расчетах специальных методов листовой штамповки / К. С. Арсентьева, Е. В. Сидорова // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России : Научные труды Высшей школы машиностроения / Под редакцией А.А. Поповича. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 164-169.

7. Мамутов, В. С. Электрогидроимпульсная вытяжка в закрытую матрицу с плоским дном при различных параметрах нагружения заготовки / В. С. Мамутов, К. С. Арсентьева // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – № 7. – С. 569-580.

8. Арсентьева, К.С. Динамическая кривая деформационного упрочнения при расчетах электрогидроимпульсной вытяжки-формовки в комплексе LS-DYNA / К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24. – № 1. – С. 130—140.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 004.05

К.А. Батенков
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия, pustur@yandex.ru

ПАРАМЕТРЫ ОШИБОК И НОРМЫ ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЦИФРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ «УСТАРЕВШЕГО» ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

Указано, что эталонное соединение согласно рекомендации ITU-T G.821 определяет три различных уровня качества цифровых соединений независимо от используемых систем передачи: местное, среднее и высокое качество, обычно определяемое местоположением в сети. Представлены основные соотношения для расчета норм на коэффициент секунд с ошибками и коэффициент секунд с существенными ошибками.

Ключевые слова: международное цифровое соединение, гипотетические эталонные тракты, коэффициент секунд с ошибками, коэффициент секунд с существенными ошибками.

Введение

Рекомендация ITU-TG.821 [1, 2, 3] определяет параметры ошибок и нормы для международных цифровых соединений, работающих на скоростях ниже первичной, с использованием оборудования, разработанного до принятия рекомендации ITU-T G.826 [4, 5, 6] от 14 декабря 2002 года. Эталонное соединение предусматривает реализацию услуг цифровой сети с интегрированным обслуживанием (ISDN – integrated services digital network).

Методы исследования

В ходе работы использовался в основном анализ литературы по проблематике измерений качества каналов связи, включающей руководящие документы отрасли электросвязи.

Гипотетические эталонные тракты

Нормы на качество функционирования цифровых сетей ориентируются на гипотетические эталонные тракты между конечными пунктами, имеющими длину 27500 км, имитирующие международные цифровые каналы (рис. 1), работающие на скоростях ниже первичной ($64n$ кбит/с, $n = 1, 2, \dots, 31$) [7]. Не предъявляется особых условий по среде передачи, например, системы передачи по оптическому волокну, цифровым радиорелейным линиям, металлическому кабелю и посредством спутников [1]. Эталонное соединение согласно рекомендации ITU-TG.821 [7, 8] определяет три различных уровня качества цифровых соединений независимо от используемых систем

передачи: местное, среднее и высокое качество, обычно определяемое местоположением в сети (рис. 1).

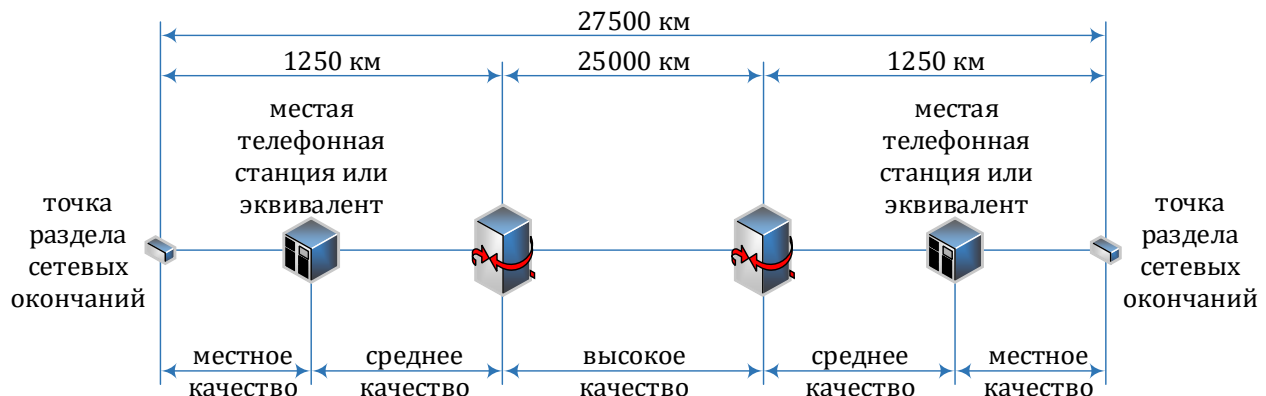


Рисунок1 –Эталонное соединение согласно рекомендации ITU-T G.821 [7]

Цифровые каналы считаются соответствующим нормам, если отвечают поставленным требованиям каждый из двух показателей ошибок – коэффициент секунд с существенными ошибками r_s , коэффициент блоков с фоновыми ошибками r_b [3, 9, 10].

Нормы на параметры ошибок

Нормы на параметры ошибок для международного соединения ISDN максимальной протяженности представлены в таблице 1. Предполагается, что международные соединения ISDN должны отвечать всем требованиям. Соединение не удовлетворяет нормам, если не выполняется хотя бы одно условие. В качестве рекомендации предполагается использовать период измерений порядка одного месяца.

Таблица 1 – Долговременные нормы на показатели ошибок для международного соединения ISDN

скорость, кбит/с	ESR r'_e	SESR r'_s
64n	0,08	0,002

Поскольку нормы таблицы 1 относятся к каналу максимальной протяженности, то для реальных соединений необходимо их разделить на составные части. Общий подход предполагает использование двух несколько отличающихся стратегий, одна из которых относится к нормам на секунды с ошибками ES, а другая – к требованиям на секунды с существенными ошибками SES [3, 11, 12].

Определены три градации качества для цифровых каналов, независимые от используемых систем передачи и определяемые местоположением в сети: местное, среднее и высокое качество (рис. 1). Градации качества определяют долю, которую вносит параметр ошибок в общее значение параметра для всего соединения. Так, местное качество соответствует 15 % от предельного значения (для каждой из сторон в отдельности), среднее – тоже 15 % (для каждой из сторон в отдельности), а высокое – 40 % (табл. 2). Вносимая доля в параметр качества для всех градаций не зависит от длины.

Таблица 2 – Коэффициенты норм k

местное качество	среднее качество	высокое качество
0,15	0,15	0,4

Долговременные нормы

Долговременные нормы на коэффициент r_e секунд с ошибками ESR (табл. 3) определяются исходя из соотношения

$$r_e = r'_e \sum_{i=1}^n k_i.$$

где k_i – коэффициент норм i -го участка.

Таблица 3 – Долговременные нормы на коэффициент r_e секунд с ошибками ESR

местное качество	среднее качество	высокое качество
0,012	0,012	0,032

Долговременные нормы на коэффициент r_s секунд с существенными ошибками SESR определяются исходя из соотношений

$$r_s = \left(\sum_{i=1}^n k_i + k_r + k_s \right) r'_s,$$

где $k_r = 0,25$ – коэффициент, учитывающий наличие на участке со средним или высоким качеством радиорелейных систем передачи протяженностью до 2,5 тыс. км; $k_s = 0,05$ – коэффициент, учитывающий наличие на участке со средним или высоким качеством спутниковых систем передачи.

Результаты и обсуждение

Рассмотренный подход к определению долговременных норм для международных цифровых соединений, работающих на скоростях ниже первичной, с использованием оборудования, разработанного до принятия рекомендации ITU-T G.826 [4-6] от 14 декабря 2002 года позволяет определить допустимые границы, которые должны соблюдаться для параметров ошибок.

Заключение

Анализ долговременных норм на параметры ошибок цифровых соединений позволяет определить как текущее состояние эксплуатируемых цифровых соединений, так и помогает выявить недостатки существующих методов анализа параметров качества, в основном касающиеся необходимости проведения достаточно длительных тестовых испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельникова Н. Ф. Эволюция рекомендаций МСЭ-Т по показателям ошибок цифровых каналов и трактов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: analytic.ru/articles/lib217.pdf.
2. Батенков, К. А. Анализ и синтез структур сетей связи методом перебора состояний / К. А. Батенков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 300-315. – DOI 10.21638/11701/spbu10.2022.301.

3. Батенков, А. А. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний / А. А. Батенков, К. А. Батенков, А. Б. Фокин // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 59. – С. 91-98. – DOI 10.17223/19988605/59/10.
4. Rec.G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. – 2002. – 12. – Geneva : ITU-T, 2002. – 34 p.
5. Батенков, А. А. Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности / А. А. Батенков, К. А. Батенков, А. Б. Фокин // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 371-406. – DOI 10.15622/ia.2021.20.2.5.
6. Математическая модель классификатора объектов на основе Байесовского подхода / А. А. Батенков, К. А. Батенков, А. Г. Богачев, В. В. Мишин // Информатика и автоматизация. – 2020. – Т. 19, № 6. – С. 1166-1197. – DOI 10.15622/ia.2020.19.6.2.
7. Rec.G.821. Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network. – 2002–12. – Geneva : ITU-T, 2002. – 18 p.
8. Батенков, А. А. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий / А. А. Батенков, К. А. Батенков, А. Б. Фокин // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 6(115). – С. 53-63. – DOI 10.31799/1684-8853-2021-6-53-63.
9. Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей : Утв. М-вом связи РФ 01.10.96. – М. : МК-Полиграф, 1996. – 72с.
10. Батенков, А. А. Алгоритм синтеза базиса ортонормированных функций для многоканальной передачи данных / А. А. Батенков, Г. В. Богачев, К. А. Батенков // Цифровая обработка сигналов. – 2007. – № 2. – С. 19-25.
11. Батенков, А. А. Технический эффект оптимальных линейных модуляции и демодуляции в беспроводных системах связи / А. А. Батенков, Г. В. Богачев, К. А. Батенков // Известия Института инженерной физики. 2015. № 1 (35). С. 24-28.
12. Батенков, К. А. Моделирование непрерывных каналов связи в форме операторов преобразования некоторых пространств / К. А. Батенков // Труды СПИИРАН. – 2014. – № 1(32). – С. 171-198.

Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Г.В. Вольф
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия,
snv.ktn@mail.ru

МЕНЕДЖМЕНТ РИСКОВ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА КАЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CRM В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация

Отражены результаты разработки риск-менеджмента процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе программного продукта «CustomerRelationshipManagement» (CRM) в условиях машиностроительного предприятия. Идентифицированы риски процесса, составлен их реестр, дана оценка и расчет их значений, вероятности возникновения и обнаружения, проведены корректирующие действия по снижению рисков, определены варианты реагирования и план действий по устранению и минимизации возможных последствий. Разработана и внедрена методика риск-менеджмента процесса освоения принципа CMK на базе CRM на машиностроительном предприятии.

Ключевые слова: риск-менеджмент, процесс реализации принципа, программный продукт, методика, освоение.

Введение

В результате статистических исследований, проведенных в странах с развитой экономикой, выявлено, что взаимодействие со значительным числом существующих (до 50%) клиентов многих компаний не приносит достаточной прибыли из-за неэффективного сотрудничества с ними. Неудовлетворенность клиентов является причиной частой смены ими компаний. Уход клиентов сильно сказывается на имидже компании, поскольку неудовлетворенные качеством продукции и обслуживания клиенты тиражируют сведения о своем негативном опыте существенно шире, чем удовлетворенные – положительным взаимодействием. Особенно это актуально в наше время, время развитых информационных технологий и практически общедоступного интернета. Поэтому для многих компаний и для большинства российских предприятий ключевым фактором жизнеспособности является постоянство, лояльность клиентской базы, а основной целью остается привлечение клиентов, реализуемой через высокозатратные маркетинговые программы, требующие пересмотра маркетинговой политики, ее переориентации на первоочередное решение задач повышения лояльности клиентов и требующие анализа взаимоотношений с ними с целью выявления наиболее перспективных [1, 2].

Проблема взаимоотношений с потребителем является значимой и актуальной для любого предприятия и для АО «ПГ «МЕТРАН», т. к. в организации используются устаревшие и не централизованные базы данных потенциальных и реальных потребителей, что не дает возможности иметь соответствующую действительности и доступную информацию о клиентах и поставщиках.

Кроме того, для совершенствования системы менеджмента качества (СМК) в соответствии с требованиями последней версии стандарта ИСО 9001:2015 введено применение риск-ориентированного подхода [3].

В связи с вышеприведенным и выявленными проблемами предприятием совместно с кафедрой технологии автоматизированного машиностроения ФГАОУ ВО Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) выполнена научно-исследовательская работа (НИР) по совершенствованию СМК АО «ПГ «МЕТРАН» путем освоения первого принципа стандарта ИСО 9000:2015 «Ориентация на потребителя» на базе применения программного продукта «CustomerRelationshipManagement» (CRM) с разработкой риск-менеджмента осваиваемого процесса [4-6].

В связи с актуальностью была выполнена настоящая НИР, целью которой явилось разработка и применение риск-ориентированного подхода при совершенствовании СМК предприятия реализацией принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1 анализ состояния дел предприятия и выявление проблем;
- 2 разработка методики риск-менеджмента процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM;
- 3 разработка риск-менеджмента процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM;
- 4 освоением риск-менеджмента процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM.

Методы исследования

Для решения первой задачи проведен анализ состояния дел предприятия и выделена основная из выявленных проблем – получение рекламаций от потребителей на продукцию.

Для решения второй задачи проведен анализ, сравнение и сопоставление отечественных и зарубежных методов оценки рисков для совершенствования процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM и выбраны следующие методы: для идентификации рисков – «Мозговой штурм», для анализа рисков – «Галстук-бабочка» и «Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий FMEA», для ранжирования и оценки рисков – «Матрица последствий и вероятности» [7, 8].

Для решения третьей задачи были идентифицированы риски процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM, составлен реестр рисков, фрагмент из которого представлен в таблице 1.

Проведены анализ вероятности и последствий идентифицированных опасных событий с учетом наличия и эффективности применяемых способов управления. Выполнена оценка рисков, объединяющая идентификацию, анализ и сравнительную оценку рисков с целью представления на основе объективных свидетельств информации, необходимой для принятия обоснованного решения относительно способов обработки рисков [7]. Данные о вероятности событий и их последствиях позволили осуществить определение уровня рисков.

Проведенная качественная оценка вероятности и последствий реализации рисков процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM (см. таблицы 2 и 3) позволила выявить, что опасными рисками являются ситуации 1, 2, 3, 9 и 12, так как для них характерна высокая тяжесть последствий.

Для определения уровня риска и принятия решения, какими рисками нужно управлять, был использован метод матрица последствий и вероятности. Матрица последствий и вероятности представлена в таблице 4 [6].

Результаты и обсуждение

Определен индекс риска (P), характеризующий оценку риска через оценки вероятности и последствий по формуле 1:

$$P = V \times S, \quad (1)$$

где: V – оценка вероятности реализации рискового события, S – оценка последствий от реализации опасного фактора.

Таблица 1 – Фрагмент реестра рисков процесса

Наименование риска	Вид риска	Причина риска	Факторы риска	Последствия риска
Внутренние риски				
Сбой программного обеспечения	Производственный	1 Отключение электроэнергии. 2 Выход из строя процессора 3 Ошибки пользователя	Инфраструктурный	Потеря данных. Остановка работы. Срыв сроков выполнения обязательств перед потребителем
	Социальный		Технологический	
			Человеческий	
Риск потери данных	Социальный	1 Случайное удаление данных. 2 Выход из строя оборудования. 3 Специальное удаление данных 4 Вирусная атака	Человеческий	Испорченная репутация компании. Потеря данных и клиентов. Увеличение стоимости привлечения новых клиентов. Снижение перспектив по развитию бизнеса.
	Производственный		Технический	
	Политический		Диверсионный	
Внешние риски				
Рост курса валют	Финансовый	Нестабильность мировой экономики	Экономический	Увеличение затрат на обслуживание ПО
Нехватка квалифицированных специалистов	Организационный	1 Снижение уровня образования в средних и профессиональных учебных заведениях. 2 Увольнение или переманивание ключевых сотрудников	Кадровый	Текучка кадров. Потеря ключевых сотрудников в результате увольнения или переманивания. Увеличение времени
Введение санкций	Политический	Нестабильность политических взаимоотношений стран.	Политический	Невозможность приобретения импортной продукции. Увеличение затрат на обслуживание ПО.

Таблица 2 – Качественная оценка вероятности возникновения риска процесса

Риск	P , %	Оценка P
1. Сбой программного обеспечения	50	Средняя
2. Риск потери данных	35	Средняя
3. Риск утечки данных	25	Средняя
4. Недостаточная квалификация пользователя	55	Средняя
5. Затрудненная интеграция ПО с другим информационными системами	15	Низкая
6. Выход новой версии ПО, отличающейся от используемой	10	Низкая
7. Неактуальность введенных данных	35	Средняя
8. Сложность в эксплуатации ПО	25	Средняя
9. Неверно рассчитанные сроки внедрения ПО	25	Средняя
10. Риск поломки оборудования	50	Средняя
11. Рост курса валют	40	Средняя
12. Нехватка квалифицированных специалистов	30	Средняя
13. Введение санкций	10	Низкая

Таблица 3 – Качественная оценка последствий реализации риска процесса

Риск	Оценка P
1. Сбой программного обеспечения	Высокий
2. Риск потери данных	Высокий
3. Риск утечки данных	Высокий
4. Недостаточная квалификация пользователя	Средняя
5. Затрудненная интеграция ПО с другим информационными системами	Средний
6. Выход новой версии ПО, отличающейся от используемой	Средний
7. Неактуальность введенных данных	Средний
8. Сложность в эксплуатации ПО	Средний
9. Неверно рассчитанные сроки внедрения ПО	Высокий
10. Риск поломки оборудования	Средний
11. Рост курса валют	Средний
12. Нехватка квалифицированных специалистов	Высокий
13. Введение санкций	Средний

Таблица 4 – Матрица последствий и вероятностей

Оценка последствия (S)		Оценка вероятности		
		1	2	3
		Маловероятно	Эпизодически	Часто
3	Высокое	3–умеренный	6–критичный	9–критичный
2	Среднее	2–низкий	4–умеренный	6–критичный
1	Незначительное	1–низкий	2–низкий	3–умеренный
Вид риска	Характеристика риска			
Критический	Необходимо немедленное действие (разработка мероприятий по снижению уровня риска)			
Умеренный	Должно быть специальное управление на уровне СП			
Низкий	Управляется стандартными процедурами			

В таблице 5 представлены результаты количественной оценки показателей рисков рассматриваемого процесса.

Таблица 5 – Результат количественной оценки показателей рисков процесса

Риск	V, балл	S, балл	P
1. Сбой программного обеспечения	2	3	6
2. Риск потери данных	3	3	9
3. Риск утечки данных	2	3	6
4. Недостаточная квалификация пользователя	2	2	4
5. Затрудненная интеграция ПО с другим информационными системами	1	2	2
6. Новая версия ПО, отличающаяся от используемой	1	2	2
7. Неактуальность введенных данных	2	2	4
8. Сложность в эксплуатации ПО	2	2	4
9. Неверно рассчитанные сроки внедрения ПО	2	3	6
10. Риск оборудования	2	2	4
11. Рост курса валют	2	2	4
12. Нехватка квалифицированных специалистов	2	3	6
13. Введение санкций	1	2	2

Анализ матрицы последствий и вероятностей позволил сделать вывод о том, что в зоне умеренного риска находятся события 4, 7, 8, 10 и 11, а к зоне низкого риска относятся события 5, 6 и 13. Анализ рисков показал, что наиболее опасными рисками для процесса «Совершенствование СМК путем использования программного продукта CRMOracleonDemand» является реализация событий 1, 2, 3, 9 и 12.

Для принятия решения о необходимости проведения действий, направленных на снижение вероятности риска, предварительно был проведен сравнительный анализ стоимости риска (фактических убытков из-за реализации рисков ситуации и затрат на возмещение этих убытков) и предупреждающих действий. Приняты положения, что меры воздействия на риск являются целесообразными, если убытки из-за реализации риска будут больше или равны затратам на предотвращения этих убытков. Результативность (R) воздействия на риск рассчитывалась по формуле 2.

$$R = \frac{Z}{U} \text{ у.е.}, \quad (2)$$

где Z – затраты на предотвращения убытков рисков события, руб.; U – убытки из-за реализации рисков события, руб.

Меры воздействия на риск считаются целесообразными, если $R < 1$.

В таблице 6 приведены убытки реализации рисков ситуации и затраты на возмещение этих убытков.

Таблица 6 – Убытки реализации рисков и затраты на возмещение убытков

Наименование риска	Убытки U, тыс. руб.	Затраты Z, тыс. руб.	Результативность R, у.е.
Сбой ПО	250	80	0,32
Риск потери данных	2000	450	0,23
Риск утечки данных	4000	1750000	0,44
Неверно рассчитанные сроки внедрения ПО	450	165	0,36
Нехватка квалифицированных кадров	50	15	0,30

Анализ результатов (см. таблицу 6) показал, что меры воздействия на рисковые события: а именно, сбой ПО, потеря данных, утечка данных, неверно рассчитанные сроки внедрения ПО и нехватка квалифицированных кадров, являются целесообразными.

В ходе НИР разработан план мероприятий по снижению наиболее опасных рисков процесса «Совершенствование СМК при использовании программного продукта CRMOracleonDemand». Фрагмент плана представлен в таблице 7.

Таблица 7 – План мероприятий по снижению рисков процесса

Наименование риска	Мероприятия	Ответственный	Сроки	Результативность
Сбой ПО	1 Наличие запасных электрогенераторов. 2 Техническое обслуживание и ремонт оборудования. 3 Разработка рабочих инструкций	IT – служба. Служба главного энергетика. Служба качества.	Ежемесячно	0,32
Риск потери данных	1 Резервное копирование данных. 2 Автоматическое сохранение информации. 3 Разработка полномочий по управлению информацией	IT-служба.	Ежемесячно	0,23
Риск утечки данных	1 Методы защиты информации. 2 Установка антивирусных программ	IT-служба.	Ежедневно	0,44
Неверно рассчитанные сроки внедрения ПО	1 Четкая постановка задачи со стороны руководителя проекта. 2 Периодический контроль над исполнителем (позволит выявить ошибки на каждом этапе, задать дальнейшее направление деятельности, ускорить получение нужной информации, повысит мотивацию исполнителя) руководителем проекта. 3 Опрос мнения сотрудников для выявления потребностей. 4 Мотивации работников. 5 Ежегодный пересмотр заработной платы. 6 Профилактические мероприятия по обслуживанию оборудования	Служба автоматизации бизнес-процессов. Служба персонала. Руководство компании.	На протяжении и реализации проекта	0,36
Нехватка квалифицированных кадров	1 Взаимодействие с ЮУрГУ (привлечение молодых специалистов и их обучение – практиканты, интерны, обучение на территории ВУЗа). 2 Обучение сотрудников. 3 Система морального поощрения. 4 Пересмотр заработных плат и существующего соц. пакета.	Подразделение директора по персоналу и административным вопросам	Ежеквартально	0,30

Проведена оценка результативности запланированных мероприятий по снижению рисков, анализ которой показал, что результативность воздействия на критичные риски является целесообразной и находится в пределах 0,23 – 0,44 у.е.

В результате научно-исследовательской работы разработана методика риск-менеджмента процесса реализации принципа качества «Ориентация на потребителя»

на базе программного продукта CRM, проведена её апробация с последующим освоением.

Заключение

Достигнута цель работы – разработан и освоен риск-ориентированный подход для совершенствования системы менеджмента качества предприятия реализацией принципа «Ориентация на потребителя» на базе программного продукта CRM.

Решены поставленные задачи:

- 1 проведен анализ состояния дел предприятия и выявлены проблемы;
- 2 разработана методика риск-ориентированного подхода для управления процессом реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM;
- 3 разработан риск-менеджмент процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM;
- 4 проведено освоение риск-менеджмента процесса реализации принципа «Ориентация на потребителя» на базе CRM.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы позволило снизить финансовые потери на 10% путем снижения неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чичикова, М.Ю. Ориентация на потребителя как залог успеха организации / М.Ю. Чичикова, Н.Б. Коптелова // Актуальные вопросы развития современного общества. – Курск: ЗАО «Университетская книга» – 2014. – С. 293–295.
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2015. – 54 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартиформ, 2015. – 32 с.
4. Габитова, Д.М. Реализация принципа «Ориентация на потребителя» на основе использования передовых управленческих и информационных технологий / Д.М. Габитова, Н.В. Сырейщикова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. – 2019. – С. 610-613.
5. Морозов, Е.М. CRM-системы как средство автоматизации взаимодействия с клиентами / Е.М. Морозов // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 3. – <http://web.snauka.ru/issues/2015/03/49404>.
6. Неволина, Е.А. Автоматизация клиентоориентированной технологии промышленного предприятия с помощью программного продукта CRM-системы / Е.А. Неволина, Н.В. Сырейщикова // сборник статей междунар. молодежн. научно.-практич. конф. «Новые технологии наукоемкого машиностроения: приоритеты развития и подготовки кадров». – Набережные Челны: Изд-во КГТУ, 2015. – С. 180-185.
7. ИONOва, Е.И. Применение инструментов бережливого производства для совершенствования СМК промышленного предприятия / Е.И. ИONOва, Н.В. Сырейщикова // Материалы конф. науч.-технич. работ. – Челябинск. – ЮУрГУ. – 2018.–С. 368–375.
8. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – М.: Стандартиформ, 2020. – 150 с.

А.Н. Кивалов, Д.А. Зинченко
Михайловская военная артиллерийская академия, Санкт-Петербург, Россия,
mvaa@mil.ru

МЕТОДИКА АДАПТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ФАКТОРНЫХ ПЛАНОВ

Аннотация

В работе рассмотрен научно-методический аппарат обеспечения процесса разработки сложных технических систем за счет применения методики адаптивной иерархической оптимизации экспериментальных исследований с использованием моделей динамики их показателей качества и оптимизации конкретного испытания на основе факторных планов. Методика позволяет обоснованно выбирать структуру и определять параметры математической модели динамики показателя качества сложных технических систем для каждого уровня иерархии испытаний в зависимости от условий их проведения и выбирать оптимальные условия перехода от одного вида испытаний к другому. Факторное планирование предлагается проводить путем одновременного варьирования по определённым закону значений совокупности факторов, которое осуществляется по целевой программе. В условиях, когда возможность варьирования значениями одних факторов существенно ограничена, наряду с большими возможностями варьирования других, предлагается производить зависимое формирование интервалов варьирования всех факторов. Учет данного обстоятельства позволяет существенно повышать адекватность получаемой математической модели.

Ключевые слова: методика адаптивной оптимизации, сложные технические системы, факторное планирование, динамика показателей качества, испытания, иерархическая оптимизация системы испытаний.

Введение

В современных экспериментальных исследованиях по разработке сложных технических систем (СТС) существует научная задача, которая требует улучшения научно-методического аппарата (НМА) планирования и проведения испытаний. Цель этого улучшения заключается в повышении качества оценки характеристик СТС. Эта задача особенно актуальна для сложных технических систем, так как существуют противоречия между ограниченными возможностями испытательной базы, ограничениями ресурсов и отсутствием детально проработанного научно-методического аппарата. Также существует противоречие между объемом испытаний и результатами экспериментов, которое требует математического аппарата для рационального распределения ресурсов, учитывая априорные и апостериорные данные об объекте. Основной концепцией для повышения качества оценок характеристик СТС является комплексный подход, который включает планирование испытаний, математическое моделирование функционирования СТС, обработку результатов испытаний и объединение различной информации об объекте. [1, 2].

Методы

Планирование и организация испытаний, как одна из составляющих этого комплекса, в том числе рациональное распределение ресурса по всем категориям испытаний и оптимизация конкретного испытания с использованием теории факторного планирования, во многом определяют качество оценивания характеристик разрабатываемого технического средства. В силу актуальности эти вопросы исследуются в ряде научных работ¹ [3, 4], однако в большинстве из них освещаются еще недостаточно детально, тем более в отношении специальных технических систем.

Результаты и обсуждение

Предлагаемая методика адаптивной оптимизации системы испытаний СТС включает две основные процедуры: иерархическую оптимизацию системы испытаний с использованием моделей динамики показателей качества [5, 6] и оптимизацию конкретного испытания на основе факторных планов [7].

Основанная на методах иерархической оптимизации процедура позволяет обоснованно выбирать структуру и определять параметры математической модели динамики показателя качества СТС для каждого уровня иерархии испытаний в зависимости от условий их проведения и выбирать оптимальные условия перехода от одного вида испытаний к другому.

Оценивание параметров модели производится с учетом априорных данных, наличие которых для очередного этапа испытаний разрабатываемого образца, как правило, является закономерным моментом. При этом после каждого очередного испытания последовательно осуществляется корректировка оценок параметров, что обеспечивает получение более точных оценок.

Определение оптимальных условий перехода от одного этапа испытаний к другому производится методом динамического программирования с учетом корректировки математической модели динамики показателя качества [8].

В процедуре иерархической оптимизации системы испытаний с использованием моделей динамики показателей качества предполагается, что экспериментальные исследования любого образца сопровождаются проведением целого ряда доработок. Доработки связаны со всевозможными выявленными отказами и направлены на их устранение и повышение в целом эффективности разрабатываемого образца, его надежности, удобства и безопасности эксплуатации и т. д. Общее количество доработок носит случайный характер и распределено, как правило, неравномерно относительно этапов проведения испытаний. В частности, изменение интенсивности доработок, как показывает анализ результатов испытаний ряда образцов, может быть аппроксимировано зависимостью вида

$$k = \frac{dk}{dt} = \frac{1}{a_s b_s} e^{-\ln^2 t / (2b^2 s)}, \quad (1)$$

где t – время экспериментальной отработки; $a_s b_s$ – коэффициенты, зависящие от параметров образца, порядка его испытаний и эффективности доработок [9].

От частоты и эффективности проводимых доработок зависит и характер изменения показателей качества, что должно учитываться в моделях динамики этих показателей. При построении такой модели динамики показателей учитываются следующее: показатель качества объекта может изменяться только после проведения

¹Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов: Учеб. пособие. - М.: Высш. школа, 1981. - 368 с.

доработки; установление предполагаемых причин отказов и их устранение путем проведения доработок возможно после любого исхода испытаний.

При описании динамики показателя качества СТС $P(t)$ на любом этапе иерархической структуры или процесса в целом могут использоваться самые разные математические модели, однако наиболее удобной является экспоненциальная модель

$$P(t) = P_{\text{пр}} - (P_{\text{пр}} - P_0) \exp(-\theta t), \quad (2)$$

где $P_{\text{пр}}$, P_0 – предельное и начальное значения показателя качества разрабатываемого образца; θ – интенсивность проводимых доработок; t – время проведения испытаний (экспериментальной отработки).

Для экспоненциальной модели время испытаний определяется по формуле

$$t = \frac{1}{\theta} \ln \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_{\text{пр}} - P_{\text{тек}}}, \quad (3)$$

суммируя которое по всем уровням иерархии получается общее время экспериментальной отработки. Если учитывать, что к началу первого уровня испытаний время равно нулю, выражение для общего времени испытаний, необходимого для достижения образцом заданного уровня качества, можно представить в виде

$$T = \sum_{q=1}^Q \frac{1}{\theta_q} \ln \frac{P_{\text{пр}q} - P_{0q}}{P_{\text{пр}q} - P_{\text{т}q}}, \quad (4)$$

где $q = 1, Q$ – количество уровней иерархии испытаний; θ_q – интенсивность проведения доработок образца на q -м уровне испытаний; $P_{0q}, P_{\text{пр}q}$ – начальное и предельное (требуемое) значение показателя качества образца Q -го уровня; $P_{\text{т}q}$ – текущее для q -го уровня испытаний значение показателя качества, являющееся одновременно начальным значением показателя качества для $(q + 1)$ -го уровня.

Параметры данной модели не могут быть точно известны, а определяются с некоторой погрешностью, поэтому и время T является случайной величиной с характеристиками среднего значения и дисперсии соответствующего закона распределения [10].

Программа испытаний состоит из комбинации различных испытаний, причем порядок их проведения, как правило, будет соответствовать интенсивностям выявления отказов. Также следует ожидать, что осредненная скорость интенсивности отказов будет сначала возрастать, а затем убывать из-за уменьшения числа оставшихся в образце дефектов.

Выбор модели и определение ее параметров осуществляются на основе априорных данных, включающих результаты предыдущих испытаний и испытаний образцов-аналогов, экспертной информации и др.

Задача оптимизации системы испытаний СТС формулируется в виде следующей постановки

$$T \rightarrow \min, P_{\text{т}} \geq P_{\text{пр}}, C_{\text{т}} \leq C_{\text{пр}} \text{ или } N \rightarrow \min, P_{\text{т}} \geq P_{\text{пр}}, C_{\text{т}} \leq C_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где T – время проведения испытаний (отработки) СТС; $P_{\text{т}}, P_{\text{пр}}$ – текущее значение и заданный уровень качества обрабатываемого образца; N – количество проводимых испытаний; $C_{\text{т}}, C_{\text{пр}}$ – текущее и заданное значение стоимости испытаний.

Решение задачи оптимизации предполагает, что к началу проведения испытаний, т. е. при $t_0 = 0$, разрабатываемое СТС оценивается некоторым начальным значением показателя качества P_0 . В результате испытаний за счет выявления и устранения дефектов проектирования значение показателя повышается до некоторого заданного

$P_{прq}$. Известно также, что переход в состояние с $P_0 = P_{прq}$ осуществляется в несколько этапов, соответствующих $q = 1, Q$ – уровням иерархии испытаний. На каждом q -м этапе испытаний показатель повышается от начального значения P_{0q} до некоторого значения $P_T = P_{0q+1}$, которое, в свою очередь, является начальным значением для следующего этапа. Изменение показателя качества в процессе испытаний происходит в соответствии с моделью, соответствующей данному этапу [11].

Тогда время и стоимость, необходимые для перевода системы из состояния P_{0q} в состояние P_{Tq} при заданных параметрах модели динамики качества, будут определяться только положением точек перехода от одного уровня испытаний к другому, т. е. начальными значениями показателя P_{0q} , при $q=2, \dots, Q$. Следовательно, для обеспечения оптимальности всего процесса экспериментальной отработки СТС в целом необходимо найти такие точки перехода, которые обеспечивали бы минимум общего времени T (стоимости, количества испытаний), необходимого для перехода его из состояния P_{01} в состояние $P_{прQ}$.

Условия решения данной задачи оптимизации соответствуют условиям использования метода динамического программирования. В соответствии с этим методом оптимизация процесса экспериментальной отработки начинается q -го этапа. Критерий оптимальности на последнем Q -м этапе может быть принят в виде: $\Phi_t = t_q + t_{q-1}$. В качестве этой величины в данном случае можно принять значение частного критерия на этом шаге

$$\Phi_t = t_q + t_{q-1} = \frac{1}{\theta_q} \ln \frac{P_{прq} - P_{0q}}{P_{прq} - P_{Tq}} + \frac{1}{\theta_{q-1}} \ln \frac{P_{прq-1} - P_{0q-1}}{P_{прq-1} - P_{Tq-1}}. \quad (6)$$

В соответствии с методом динамического программирования проводится условная оптимизация Φ_t в предположении, что состояние P_{0q-1} известно. Дифференцируя выражение по P_{0q} и приравнявая производную нулю, получается условие оптимального перехода от $Q-1$ уровня к Q -му уровню

$$\theta_q (P_{прq} - P_{0q}^*) = \theta_{q-1} (P_{прq-1} - P_{0q-1}^*), \quad (7)$$

и оптимальное значение показателя качества P_{0q}^* на $Q-1$ уровне при переходе на последний уровень испытаний

$$P_{0q}^* = P_{Tq-1}^* = \frac{\theta_q P_{прq} - \theta_{q-1} P_{прq-1}}{\theta_q - \theta_{q-1}}. \quad (8)$$

Полученные соотношения имеют четкий физический смысл. Действительно, заданный отрезок траектории $(P_{прq} - P_{0q=1})$ можно пройти за минимальное время, если скорость роста P при этом максимальна. Величина оптимального времени T^* определится как

$$T^* = \sum_{q=1}^Q t_q^* = \sum_{q=1}^Q \frac{1}{\theta_q} \ln \frac{P_{прq} - P_{0q-1}^*}{P_{прq} - P_{0q}^*}. \quad (9)$$

В задачах испытаний современных СТС методы теории оптимального планирования экспериментов, в связи со сложностью их адаптации к условиям проведения испытаний, недостаточно востребованы, что обуславливает необходимость их дальнейшей проработки с учетом ограниченных возможностей опытно-экспериментальной базы полигонов [12].

Для планирования испытаний СТС путем составления матриц планирования в методике предлагается порядок использования полных, дробных и центральных композиционных факторных планов, и критериев их выбора. Для описания «почти стационарной области» в большинстве случаев с приемлемой точностью можно

использовать ЦКФП. В соответствии с определенными зависимостями по результатам испытаний составляется уравнение регрессии второго порядка и определяется значение целевой функции

$$Y_0 = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k b_j x_j^2 V, \quad (10)$$

где x_j – факторы, влияющие на показатель качества при испытании СТС; b_j – коэффициенты значимости факторов.

Результаты факторных испытаний СТС подвергаются статистическому анализу, который включает: оценку воспроизводимости результатов испытаний; оценку значимости коэффициентов регрессии и уточнение вида модели; проверку адекватности модели.

Сущность проверки воспроизводимости сводится к проверке гипотезы о стабильности условий испытаний $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_N^2$. Для проверки гипотезы можно воспользоваться критерием Кохрена или Бартлетта.

Подтверждение предположения, что полученная математическая модель достаточно верно описывает характер процесса функционирования СТС производится путем проверки ее адекватности. Сущность проверки заключается в проверке гипотезы, что предсказанные уравнением расчетные значения Y_0 отклоняются от опытных данных на величину, не превышающую некоторый наперед заданный уровень и модель пригодна для описания процесса. Адекватность модели проверяется по критерию Фишера [13].

Когда гипотеза адекватности принимается, модель может использоваться для управления процессом испытаний, в том числе при доводочных испытаниях - для определения значений факторов, при которых достигается экстремальное значение $Y_{\text{экстр}}$.

При неадекватности модели можно перейти к модели более высокого порядка (если есть основания полагать, что опыты проводились в области, близкой к оптимальной); продолжить испытания, уменьшив интервал варьирования; продолжить испытания, перенеся центр плана в другую точку [14].

Особенностью оптимизации в данной методике является то, что предлагается производить зависимое формирование интервалов варьирования всех факторов. Как показывает анализ экспериментальной базы полигонов, возможность варьирования значениями одних факторов существенно ограничена, наряду с большими возможностями варьирования других. Учет данного обстоятельства позволяет существенно повышать адекватность получаемой математической модели.

Заключение

Использование оптимального планирования определённого вида испытаний СТС позволяет существенно сократить требуемое число экспериментов или повысить качество (достоверность и точность) оценок определяемых характеристик.

Таким образом, разработанная методика адаптивной оптимизации системы испытаний СТС обеспечивает совершенствование научно-методического аппарата теории испытаний и является средством повышения качества оценок характеристик, разрабатываемых СТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренок, В.М. Теория и практика планирования и управления развитием вооружения / В.М.Буренок, В.М.Ляпунов, В.И. Мудров.; под ред. А. М. Московского. – Москва: Издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 2004. – 419 с.
2. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов [и др.]. – Москва: Издательство «ЛОГОС», 2003. – 736 с.
3. Арефьев, И.Б. Теория управления (современные проблемы управления и принятия решений) / И.Б. Арефьев, Л.А. Мартыщенко. – СПб., 2000. – 247 с.
4. Бендерский, Г.П. Научно-методический комплекс планирования и проведения испытаний радиолокационных систем: модели, методы, алгоритмы: монография. / Г.П. Бендерский, А.Н. Кивалов, Е.А. Лаврентьев. – Москва: Издательство ПАО «НПО «Алмаз», 2022. – 336 с.
5. Гасюк, Д. П. Актуальные вопросы развития системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии вооруженных сил Российской Федерации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2022. – № 2(17). – С. 81-88.
6. Системотехнические основы построения межведомственной системы контроля за полетами малой авиации в воздушном пространстве над мегаполисом / Г.П.Бендерский, Е.А.Лаврентьев, В.П. Жила, В.Н. Солкин // сборник научных статей по материалам военно-научной конференции ЦНИИ ВВС МО РФ (2-3 февраля 2017г.). – 2017. – С.32-35.
7. Федоров, В.К. Промышленные технологии и инновации технологии контроля и испытаний в производстве радиоэлектронных средств / В.К.Федоров, Г.П. Бендерский, А.В. Луценко. – Москва: Министерство образования и науки Российской Федерации, 2012. – 118 с.
8. Платунов, В.С. Методология системных военно-научных исследований авиационных комплексов / В.С. Платунов. – Москва: Изд-во «Дельта», 2005. – 344 с.
9. Гасюк, Д.П. Функциональное моделирование процессов жизненного цикла вооружения и военной техники / Д.П. Гасюк, П.А. Дроговоз, В.А. Дубовский // Вестник Академии военных наук. – 2020. – № 3 (72). – С. 105-112.
10. Андреев, Г.И. Управленческие решения при проектировании радиотехнических систем. Монография / Г.И. Андреев, П.А. Созинов, В.А. Тихомиров; под ред. П. А. Созинова. – Москва: Радиотехника, 2018. – 560 с.
11. Применение технологии цифрового двойника в проектировании производственных процессов, производстве и эксплуатации сложных технических систем в особых условиях эксплуатации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин, В. А. Косова, А. А. Романов // Журнал технических исследований. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 10-18.
12. Теоретические основы определения тактико-технических характеристик сложных технических систем на этапе испытаний. монография / под ред. А. Н. Кивалова. – СПб: МО РФ, 2020. – 320 с.
13. Кивалов, А.Н. Концептуальные аспекты организации испытаний систем разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации / А.Н. Кивалов, И. В. Митрофанов, А. Н. Мещерин // Военная мысль. – 2020. – № 2. – С. 89-98.
14. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. / Н.Джонсон, Ф. Лион. – Москва: Издательство «Мир», 1980. – 610 с.

В.В. Ларькин^{1,2}, М.Л. Бегунов², А.А. Вырвич², А.А. Шалковская³, А.А. Иванов¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, valentin_larkin@mail.ru

²Михайловская военная артиллерийская академи, Санкт-Петербург, Россия

³Московский государственный университет, Москва, Россия, aashalkovskaya@mail.ru

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация

В представлен способ моделирования слабоструктурированных задач управления перспективной интеллектуальной системы управления эксплуатацией сложной технической системы (СТС), разработанный для обеспечения показателей надежности и экономичности при эксплуатации сложных технических систем. Предложенный способ основан на комбинации методик разработки моделей структурированных и неструктурированных задач. Результатом такого объединения является возможность сочетания в едином комплексе модели слабо структурированной задачи управления моделями алгоритмических и неалгоритмических знаний. Этим обеспечивается учет особенностей класса слабо структурированных задач, включающих формализуемые и неформализуемые процедуры поиска решения.

Ключевые слова: система управления, эксплуатация, слабоструктурированные задачи.

Введение

Особенности слабо структурированных задач управления эксплуатацией СТС существенно влияют на порядок разработки математических моделей таких задач. В значительной степени это связано с необходимостью моделирования как хорошо формализуемых знаний о методах решения в структурированной части задачи, так и с необходимостью представления в модели эвристических, трудноформализуемых знаний специалистов в области управления эксплуатацией СТС. Поэтому предлагаемая методика основана на сочетании подходов, применяемых в создании экспертных систем (ЭС) и при моделировании структурированных задач.

Методы

В последние годы системы искусственного интеллекта развивались с учетом жесткой специализации программных продуктов. Сегодня ясно, что для разработки качественных интеллектуальных программ необходима их ориентация на определенные области человеческой деятельности, в которых они должны уметь обучаться своей специальности, структурировать полученные знания и правильно их применять.

Целью перспективной интеллектуальной системы управления эксплуатацией (ИСУЭ), работающей с большими объемами знаний, является достижение результатов, получаемых специалистами в области применения артиллерии [1]. Важной особенностью такой системы будет являться то, что она задумана для использования

человеком и оказания ему эффективной помощи. Необходимым средством для этого является возможность диалога на естественном, языке программы со специалистом.

Кроме того, необходимо, чтобы специалисты понимали систему и в случае необходимости могли сообщить ей свои рассуждения и убедить ее в их справедливости. Для этого предлагается, чтобы знания, используемые системой, были отделены от обслуживающих их программных средств и в то же время были доступны непосредственно самой системе. Рационально также, чтобы рекомендации системы были простыми и устойчивыми и их было легко объяснить.

Основной аспект разработки ИСУЭ заключается в том, что предлагается организовать простую процедуру передачи системе знаний специалистов и экспертов. Для этого нужно иметь возможность вводить в систему знания в произвольном порядке, чисто описательным способом (не ориентируясь на их будущее использование, в отличие от классических жестко алгоритмических процедур). Сама система должна уметь упорядочивать и структурировать эти знания, сравнивать их с уже имеющимися, а затем строить свою собственную модель знаний.

Теперь рассмотрим порядок функционирования системы в целом при решении задачи в режиме обеспечения эксплуатации (как основном), порядок работы каждого модуля и подсистемы представлены в приложении А.

Пользовательский интерфейс (рисунок 1) позволяет выбрать режим работы СМПО (тренировочный, режим обеспечения эксплуатации или режим накопления знаний). Основным режимом является режим обеспечения эксплуатации, тренировочный режим реализует возможность тренировки персонала в условиях генерируемой обстановки, режим накопления знаний реализует проверку логической непротиворечивости фактов и правил, а также внесение их в базу знаний [2].

В режиме обеспечения эксплуатации все задачи, решаемые оператором, заранее должны быть поделены на классы – формализуемые (структурированные) и трудноформализуемые (сложноструктурированные и неструктурированные) и соответствующим образом сгруппированы в меню. Оператор (если считает, что обладает всеми необходимыми исходными данными) выбирает по названию одну из формализованных задач, вводит исходные данные в форму и ИСУЭ решает ее, выдавая ответ в виде формализованного документа.

Если же исходные данные не полны или имеют нечеткость, такая задача признается слабоструктурированной и должна решаться с помощью ИСУЭ. Контроль действий оператора в этом вопросе обеспечивает анализатор типа задачи [3].

Работу анализатора типа задачи предлагается построить на определении индекса нечеткости (U) [4] и правиле определения типа задачи. Индекс нечеткости характеризует уровень информации об исходных данных для решения задачи. Предлагается использовать следующие уровни дифференциации задач:

- неструктурированные задачи ($0,2 \leq U \leq 1,0$);
- сложноструктурированные задачи ($0 < U < 0,2$);
- структурированные задачи ($U = 0$).

Результаты и обсуждение

Учитывая сложность выбора критерия дифференциации задач управления, предлагается модифицировать правило Парето, которое целесообразно сформулировать в виде «неполнота в 20 % от общего количества исходных данных, необходимых для решения задачи, в 80 % случаев приведет к невозможности решения задачи по стандартным алгоритмам» [5- 1].

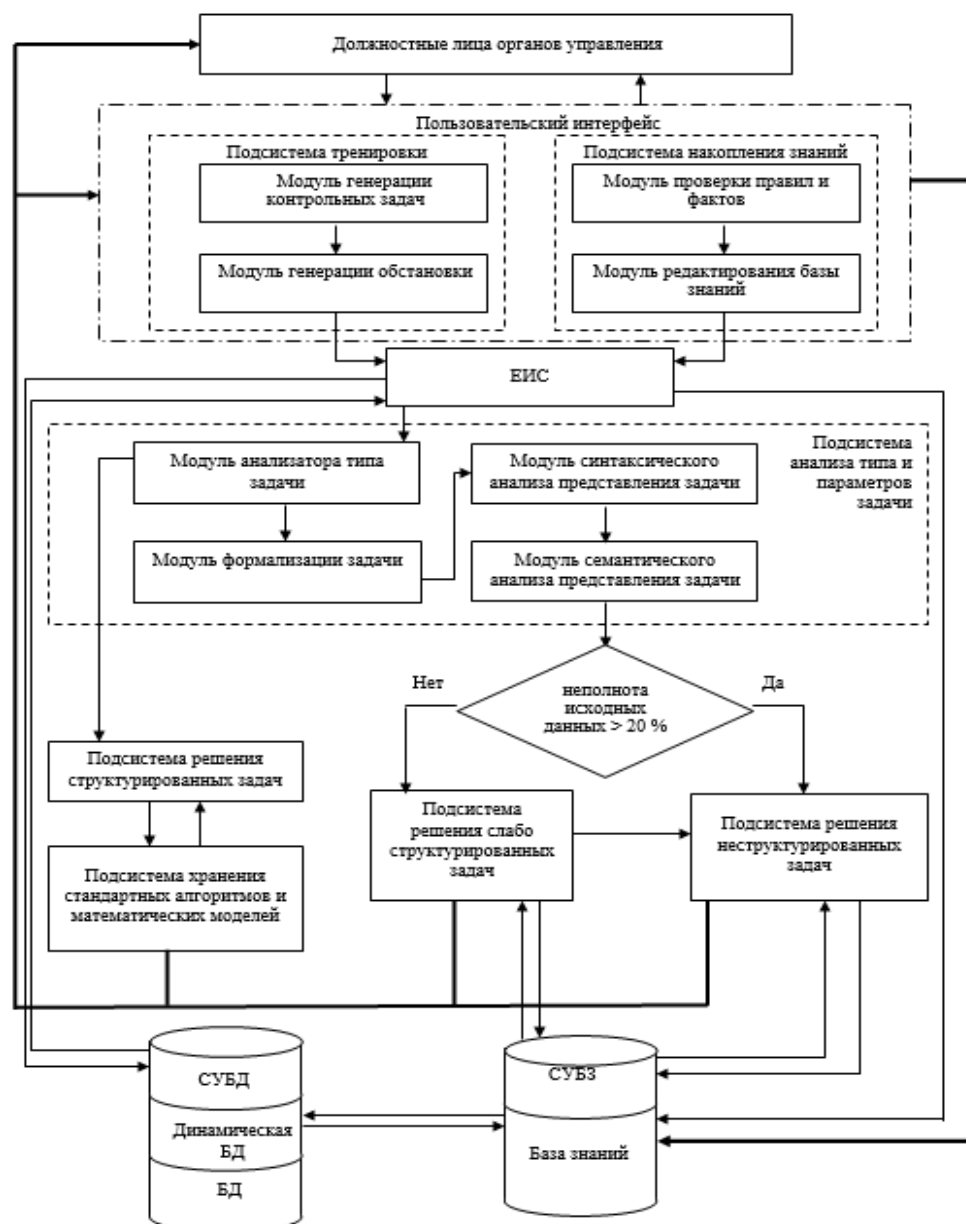


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема функционирования ИСУЭ

Согласно этому правилу, предлагается классифицировать задачу как неструктурированную, если неполнота исходных данных для ее решения превосходит 20 % от общего количества показателей, являющихся исходными данными для ее решения. Таким образом, процедура решения такой задачи имеет особенности по сравнению с решением слабоструктурированной задачи.

Построение математической модели слабо структурированной задачи управления целесообразно осуществлять в ходе совместной работы инженера по знаниям (разработчика модели), математика-алгоритмиста и экспертов на основе метода «генерация-тестирование» [12].

Основу метода составляет итеративная процедура:

формирование инженером по знаниям (по результатам работы с экспертами, литературой) прототипа базы знаний о методах решения задачи управления и содержащую модели неформализуемых этапов и перевод информации в формализованное представление выбранной модели (или комбинации моделей) представления знаний;

разработка прототипа структуры базы данных (СБЗ), основанной на модели неформализуемой части задачи управления; прототип должен обеспечивать возможность подключения вычислительных модулей;

разработка *моделей для структурированных этапов* задачи и соответствующих им алгоритмов вычислений;

разработка и подключение к СБЗ расчетных модулей программы;

тестирование прототипа на основе контрольных примеров с целью выявления дефектов в базе знаний и корректности алгоритмических процедур;

совершенствование прототипа, состоящее из повторения всех этапов, начиная от стадии формирования до стадии тестирования [13].

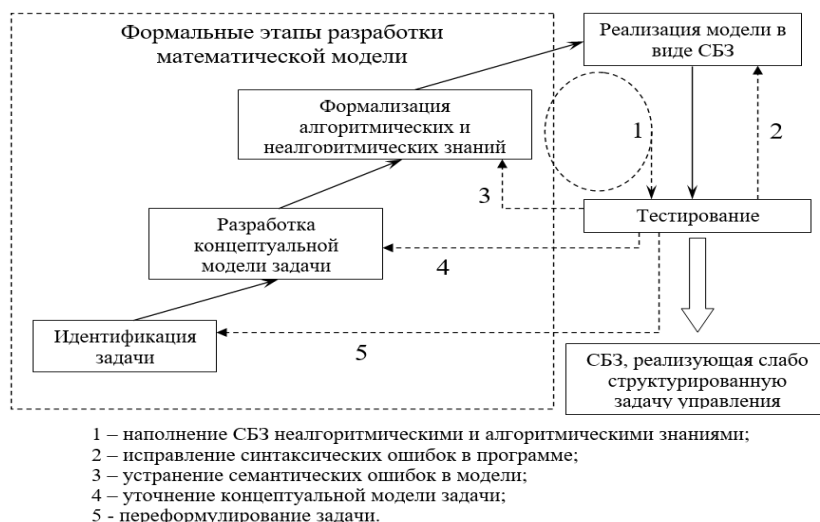


Рисунок 2 – Схема разработки математической модели слабо структурированной задачи управления

Заключение

На основе проведенных исследований для решения задач управления как формализуемых, так и трудноформализуемых предлагается использовать СМПО на основе ИСУЭ трудноформализуемых задач управления. В современных условиях такое программное обеспечение способно стать интегрирующей платформой для модулей решения формализуемых и трудноформализуемых задач.

По результатам исследований выявлена необходимость разработки методики построения многофункциональной инвариантной системы поддержки решения трудноформализуемых задач управления для автоматизированной системы управления эксплуатацией СТС. Целесообразно выбрать основным инструментом интеллектуализации технологию работы экспертных систем. Однако для более полного соответствия предметной области система должна объединять в себе возможность решения задач управления различных типов. Таким образом, система должна быть многофункциональной. Кроме того, целесообразно разработать систему, поддерживающую несколько режимов работы, реализующих различные стороны деятельности ИСУЭ эксплуатации СТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы теории эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, А. С. Воробьев [и др.] ; Министерство обороны РФ. – Москва : Воениздат, 2003. – 168 с.

2. Гасюк, Д. П. Основные принципы унификации образцов вооружения и военной техники / Д. П. Гасюк, И. Н. Филатов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2008. – Т. 2. – С. 317-318.

3. Гасюк, Д. П. Актуальные вопросы развития системы эксплуатации ракетно-артиллерийского вооружения ракетных войск и артиллерии вооруженных сил Российской Федерации / Д. П. Гасюк, В. В. Ларькин // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2022. – № 2(17). – С. 81-88.

4. Назаров, Е. А. Концептуальные взгляды на разработку специализированного программного обеспечения модели системы управления техническим состоянием / Е. А. Назаров // Инновационные технологии и технические средства специального назначения : Труды одиннадцатой общероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2018 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "Военмех", 2019. – С. 249-253.

5. Анисимов, В. Г. Модификация метода решения одного класса задач целочисленного программирования / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1997. – Т. 37, № 2. – С. 179-183.

6. Анализ и оценивание эффективности инвестиционных проектов в условиях неопределенности / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, Г. А. Ботвин [и др.] ; Военная академия Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации; В. Г. Анисимов. – Москва : Военная академия Генерального штаба Вооружённых сил Российской Федерации, 2006. – 288 с.

7. Способ формирования комплексных показателей качества инновационных проектов и программ / А. В. Тебекин, Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Журнал исследований по управлению. – 2018. – Т. 4, № 11. – С. 30-38.

8. Анисимов, В. Г. Алгоритм ресурсно-временной оптимизации выполнения комплекса взаимосвязанных работ / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2013. – № 1. – С. 080-087.

9. Методический подход к построению моделей прогнозирования показателей свойств систем информационной безопасности / П. Д. Зегжда, А. Ф. Супрун, В. Г. Анисимов [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2019. – № 4. – С. 45-49.

10. Черныш, А. Я. Концепция построения теории таможенного дела / А. Я. Черныш, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2009. – № 3. – С. 5-11.

11. Анисимов, В. Г. Введение в теорию эффективности боевых действий ракетных войск и артиллерии : Монография / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов, В. А. Самоленков; Военная академия генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации. – Москва : Военная академия генерального штаба, 2008. – 180 с.

12. Гасюк, Д. П. Научно-методический подход по оцениванию живучести компьютерных систем в условиях внешних специальных программно-технических воздействий / Д. П. Гасюк, А. С. Белов, Е. Л. Трахинин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2018. – № 4. – С. 86-90.

13. Глухов, В. В. Управление качеством : учебник / В. В. Глухов, Д. П. Гасюк. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2013. – 399 с. – ISBN 978-5-7422-3878-2.

ОБРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.7

А.А. Стрельникова, М.М.Радкевич
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, Strelnikova.angelina@bk.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИМИЗАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ФАКТОРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В работе изучено влияние параметров термомеханической обработки (ТМО) на механические свойства титанового сплава 3М с помощью применения метода полнофакторного эксперимента ПФЭ 2³. Получены математические зависимости, описывающие характеристики прочности, пластичности и ударной вязкости при деформационно-термической обработке заготовок из титанового сплава 3М. Установлено влияние температуры деформации, степени деформации и температуры отжига на пластические и прочностные свойства, ударную вязкость титанового сплава 3М.

Ключевые слова: титановый сплав 3М, математические зависимости, горячая пластическая деформация, параметры термомеханической обработки.

Введение

При производстве горячедеформированных заготовок и деталей из титановых сплавов большое значение имеют условия нагрева металла, так как большая химическая активность титана и его сплавов при высоких температурах может сказаться на качестве готовых изделий. Вместе с тем механические свойства и структура титановых сплавов в значительной степени зависят от условий горячего деформирования: температуры и времени нагрева, равномерности прогрева металла перед горячей деформацией, температуры начала и конца деформирования, скорости охлаждения после деформирования, скорости деформации, общей и дробной степени деформации. С повышением температуры деформирования, характерным для титановых сплавов является непрерывное повышение технологической пластичности, которая зависит от марки сплава и исходной структуры.

Целью работы является получение математических моделей зависимостей показателей комплекса механических свойств заготовок из титанового сплава 3М в результате термомеханической обработки.

Методы исследований

Для исследования влияния основных параметров технологического процесса ТМО на структуру и механические свойства деталей из титанового сплава 3М

применяли метод планирования эксперимента, регрессионного анализа, аппроксимации кривых, корреляционного и статистического анализа.

В качестве исходных заготовок использовались стандартные образцы, вырезанные из горячедеформированных поковок со степенями деформации 10, 22, 25, 30 и 33 % после отжига при температуре 870 °С.

Результаты и обсуждения

Титановый сплав 3М является деформируемым двухфазным сплавом с ($\alpha + \beta$) структурой. Особенностью формирования структуры титанового сплава 3М является то, что при термической обработке и в зависимости от температуры ее окончания, сплав может иметь структуру α или β - фазы. В зависимости от условий эксплуатации деталей появляется необходимость в формировании структуры деталей, состоящей из α или β – твердого раствора, или смешанной структуры $\alpha + \beta$ твердого раствора. В термически упрочняемых сплавах, в частности в β -сплавах, полигонизация развивается при тех же температурах, при которых распадается метастабильная β -фаза. В тех случаях, когда температура деформации и скорости охлаждения после деформации были достаточно высокими, в деформированных полуфабрикатах фиксируется термодинамически нестабильная β -фаза. При нагреве деформированных полуфабрикатов до 500–700° С в них происходят не только процессы возврата и полигонизации, но и распад метастабильной β -фазы. Свойства отожженных титановых сплавов существенно зависят от того, что произойдет раньше – полигонизация или распад β -фазы [1-5].

Для проведения исследования по влиянию параметров технологического процесса ТМО на формирование структуры, фазового состава, механических свойств и установления рациональных режимов изготовления поковок нами использовалась совмещенная схема технологического процесса ТМО с диаграммой фазового состояния титанового сплава 3М (рис.1). На наш взгляд, такая диаграмма наглядно позволяет выбирать режимы технологического процесса изготовления поковок с заданным фазовым составом, структурой и комплексом механических свойств.

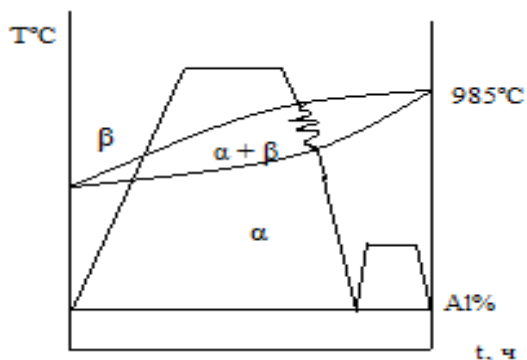


Рисунок 1 – Схема технологического процесса изготовления поковок из титанового сплава 3М методом ТМО с учетом получения необходимой структуры

Установлено, что если деформация осуществляется в температурном интервале существования β -фазы, то образуется пластинчатая структура с чётко выраженными зернами исходной β -фазы и окаймлёнными α -фазой. При этом, зерна β -фазы состоят из колоний α -фазы, представляющими собой пачки α -пластин, которые разделены прослойками β -фазы. Такая структура характеризуется пониженными показателями прочности и пластичности, а также значительной нестабильностью. Если деформация происходит в области температур α -фазы, близкой к температуре полиморфного превращения $\alpha \leftrightarrow \beta$, то образуется структура с пластинчатым строением

внутризеренной α -фазы с переходом к глобулярной. Для такой структуры, характерно повышение пластичности и незначительное снижение прочности. Отмечено, что оптимальным комплексом механических свойств обладают заготовки, полученные методом ТМО формообразование, которых происходит в области $\alpha + \beta$ [5,6]

В работе решалась задача, связанная с разработкой математической модели объекта исследования в условиях, учитывающих наличие неоднородностей различного вида. Такая модель рассчитана на выявление механизма явлений, с учетом степени влияния входных параметров на выходные параметры процесса и возможность прогнозирования его поведения. Построение модели технологического процесса позволяет выявить поведение отклика системы в зависимости от изменения факторов и тем самым найти пути оптимизации технологии.

В практической деятельности часто требуется оценить параметры некоторой системы, то есть построить её математическую модель и найти численные значения параметров этой модели.

Статистической математической моделью объекта служит функция отклика, связывающая параметр оптимизации Y , характеризующий результаты эксперимента, с переменными параметрами, которыми варьируют при проведении опытов:

$$Y=f(X_1;X_2;\dots X_i)$$

где $i = 1; k$.

Независимые переменные X_i – независимые переменные (факторы), которые можно изменять при постановке экспериментов.

Для получения математических моделей в виде уравнений, описывающих зависимости между значениями факторов и параметром оптимизации технологического процесса ТМО титанового сплава 3М. В нашем случае были выбраны следующие факторы: степень деформации ε (X_1); температура отжига T_o (X_2); температура деформации T_d (X_3).

Для реализации ПФЭ изменение факторов ε , T_o , T_d выбраны основные уровни, интервалы варьирования (табл. 1).

Таблица 1 – Основные факторы и интервалы варьирования

Показатель	Фактор X_1		Фактор X_2		Фактор X_3	
	Натуральное значение, %	Кодированное значение	Натуральное значение, °C	Кодированное значение	Натуральное значение, °C	Кодированное значение
Основной уровень	20	0	860	0	930	0
Интервал варьирования	10		10		50	
Верхний уровень	10	-1	870	-1	980	-1
Нижний уровень	30	+1	850	+1	880	+1

После обработки результатов ПФЭ, проверки адекватности эксперимента, используя коэффициент Стьюдента, коэффициент Фишера, критерий Кохрена, получены уравнения регрессии, описывающие показатели прочности, пластичности и ударной вязкости:

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 606,875 - 19,375\varepsilon - 0,625T_d + 4,375T_o - 6,875\varepsilon T_d - 6,875\varepsilon T_o + 1,875 T_d T_o + 0,625\varepsilon T_d T_o \\ \sigma_{0,2} &= 531,375 - 23,625\varepsilon - 3,625 T_d + 6,125 T_o + 1,375\varepsilon T_d - 3,875\varepsilon T_o + 1,125 T_d T_o + 1,125\varepsilon T_d T_o \\ \Psi &= 32,625 - 3,125\varepsilon + 1,875T_d + 1,625T_o - 2,625\varepsilon T_d - 0,125\varepsilon T_o - 3,375T_d T_o - 10,12\varepsilon T_d T_o \\ \delta &= 24,25 + 3\varepsilon + 3 T_d - 0,25 T_o + 2,25 \varepsilon T_d + 0 \varepsilon T_o + 2,5 T_d T_o + 0,25 \varepsilon T_d T_o \\ KCU &= 123 - 0,25 \varepsilon + 1 T_d + 0,25 T_o + 1,25 \varepsilon T_d + 1,5 \varepsilon T_o + 1,25 T_d T_o + 0\end{aligned}$$

Анализируя полученные уравнения, можно оценить влияние температуры деформации, степени деформации и температуры отжига на получаемый комплекс механических свойств.

Так, на показатели прочности (σ_B , $\sigma_{0,2}$) главным образом оказывает влияние степень деформации ε и температура отжига T_o . На показатели пластичности (δ , Ψ) оказывает влияние степень деформации ε и температура деформации T_d . На значение ударной вязкости оказывает взаимное влияние факторов εT_d , εT_o , $T_d T_o$.

На рисунке 2 приведена сравнительная диаграмма показателей комплекса механических свойств заготовок из титанового сплава 3М при изготовлении их методом ТМО и по заводской технологии.

Анализируя диаграмму, можно отметить, что предел прочности, предел текучести повысились на 5 и 6 % соответственно по сравнению с исходными значениями. Показатели относительного удлинения и относительного сужения повысились на 4 и 2 % соответственно по сравнению с исходными значениями. Ударная вязкость повысилась на 3 %.

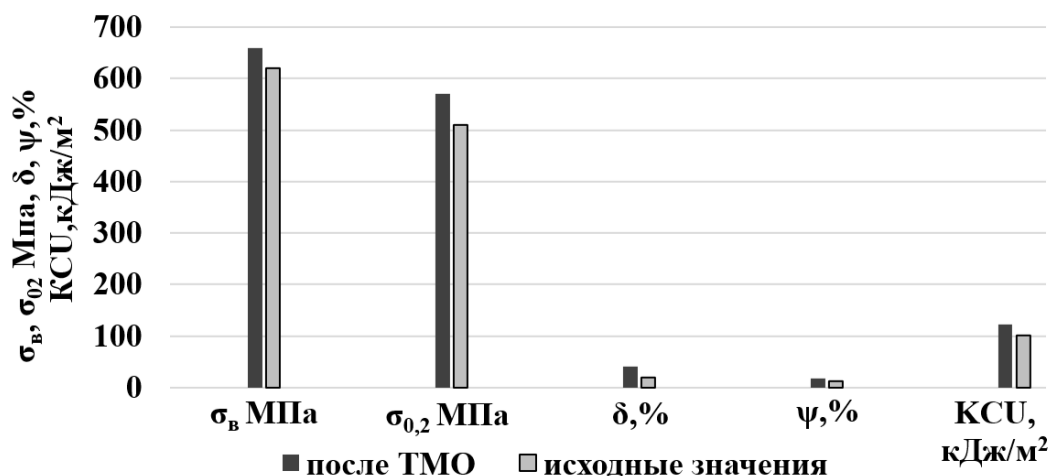


Рисунок 2 – Значения показателей комплекса механических свойств заготовок из сплава 3М после ТМО и в исходном состоянии

Заключение

Получены математические зависимости показателей механических свойств титанового сплава 3М от основных температурно-деформационных параметров процесса термомеханической обработки.

Выявлены закономерности фазово-структурных превращений псевдо α -титанового сплава 3М при температурно-деформационном воздействии, связанных с тем, что с увеличением степени деформации содержание α -фазы возрастает до 97%, а β -фазы снижается до 7 % [7]. Следовательно, детали, изготовленные из заготовок сплава 3М с таким фазовым составом, могут успешно работать при высоких температурах. При этом, размер зерна уменьшается с 600 до 20 мкм, а структура металла становится более однородной по сравнению со стандартной обработкой.

Рекомендованы рациональные режимы изготовления полуфабрикатов из титанового сплава 3М: $T_n = 1100$ °С, $T_d = 930$ °С, степень деформации 20 % и $T_{от} = 860 - 870$ °С, обеспечивающие высокий комплекс механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 +Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2003. – 576 с. 6.
2. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – Москва : Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1980. – 19 с.
3. Данилин, А.В. Прогнозирование вида структуры после прессования в изделиях из труднодеформируемых алюминиевых сплавов на основании результатов математического моделирования / А.В. Данилин, В.Н. Данилин, Б.А. Романцев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 26-38.
4. Радкевич, М.М. Технология программной механико-термической обработки конструкционных сталей / М.М. Радкевич, И.М. Радкевич // Металлообработка. – 2001. – № 1 (1). – С.54-58.
5. Радкевич, М.М. Технологические аспекты упрочняющей программной механико-термической обработки: монография / М. М. Радкевич. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 261с.
6. Тлустенко, С.Ф. Формирование структуры и свойств титановых сплавов по механическим свойствам в процессах обработки металлов давлением / С.Ф. Тлустенко, А.Н. Первышин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 1(25). – С. 101-109.
7. Стрельникова, А.А. Влияние степени деформации на формирование микроструктуры и механических свойств титанового сплава / А.А. Стрельникова // Материаловедение. Энергетика. – 2022. – Т.28, №2. – С. 43-56.

СОДЕРЖАНИЕ

Д.П. Гасюк ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ РОЛЬ В УПРАВЛЕНИИ ПОЛНЫМ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ	4
ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	9
Д.С. Аксенов, Е.В. Агеева ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПОРОШКА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-20 МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА	9
Д. Быченко, И.И. Козарь, С.А. Любомудров ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ДОПУСКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ	14
О.Д. Григорьев, А.В. Петров, С.Н. Степанов, С.С. Степанов, С.Б. Тарасов ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДЕОКАМЕР НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОКАЗАНИЙ СТРЕЛОЧНЫХ ИНДИКАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ	19
Г.В. Цветкова, Э. Мохсени, Я. Нагхави, Г.В. Иванова ПРИМЕНЕНИЕ НАПЛАВОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	24
Тянь Шиюй, Хо Юйцзя, В.И. Слатин ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ВИБРАЦИОННОГО МЕТОДА УДАЛЕНИЯ СТРУЖКИ ПРИГОДНОЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ	29
Хо Юйцзя, Тянь Шиюй, В.И. Слатин МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТРУЖКИ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИИ ДВУХМЕРНОГО СТРУЖКОЛОМА	33
А.Д. Шабалин, Д.Н. Шабалин, М.В. Яковицкая, Н.А. Солодилова ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	37
Шао Гуансинь, М.М. Радкевич УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОРОЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ	41
Ши Шуаньюань, Д.Н. Шабалин, Юань Чжэньюэ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	47
КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ	50
П.А. Барулин, В.А. Терешин УПРАВЛЯЕМАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ ПОСАДКА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ	50
М.В. Дикун, К.В. Елисеев ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ ПОДЪЕМОВ ГРУЗОВ ПО ЛЕСТНИЦЕ	54

М.В. Карташов, Н.Ю. Саввин РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА АППАРАТНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO UNO	60
А.О. Катаронов, В.Н. Маликов, С.А. Войнаш РЕГИСТРАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ФАЗ В ПЛАВЯЩИХСЯ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ	65
В.А. Максимов, А.Ю. Скрыбнев, Д.С. Ситкин ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КРОНШТЕЙНА КРЕПЛЕНИЕ ПРИВОДА	72
В.А. Попутникова, М.Д. Фан, В.П. Третьяков ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНУЮ ФОРМУ	76
К.А. Тукачев, С.Н. Кункин СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОГРАММАХ SOLIDWORKS И МОДУЛЯ КОМПАС-3DARMFEM	81
И.В. Фролов, И.А. Нестеров МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НАЖИМНЫХ КОЛЕЦ СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ЗАВОДА «ЭЛЕКТРОСИЛА»	85
К.С. Хитушкин, В.П. Третьяков ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВКИ ДЛЯ ДЕТАЛИ «ОПОРА» НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ	90
Г.А. Шельмин, В.Г. Теплухин ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВКИ И ПОИСК РЕШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PROCASТ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ	95
П.А. Шмыкова, В.Н. Маликов, С.А. Войнаш ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МОЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	100
Е.А. Назаров МОДЕЛЬ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РТК: КОМПОНОВКА СПЕЦВЫЧИСЛИТЕЛЯ, РАЗВЕРТЫВАНИЕ НЕЙРОСЕТИ, ЭКСПЕРИМЕНТ	106
В.В. Ларькин, В.Л. Хрулев, А.С. Ерюшев, М.В. Левицкий, А.А. Иванов СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	113
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	120
А.В. Козленок, С.И. Худорожков ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ КЛИНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КЛИНОВЫХ МУФТ СВОБОДНОГО ХОДА С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ	120

В.В. Колнышенко, Д.В. Ляшенко, М.В. Ляшенко, А.Д. Давыдов, Г.В. Иванова, Е.А. Тарасенко, ХуаньюйЛян ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ	125
МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	129
В. Авдеенко, К.С. Арсентьева, И.В. Калатозишвили, В.С. Мамутов ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПЕРАЦИЙ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA	129
И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин, Е.А. Панин, А.И. Денисова ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ	133
А.В. Волокитин, И.Е. Волокитина, Д.Н. Лавринюк, Т.Д. Федорова ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ СКУРЧИВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВОЛОЧЕНИЯ	137
Д.Р. Кравцов, А.А. Степанов, К.А. Тукачев, К. Лепетан ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ КОНИЧЕСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	141
Е.Л. Левашова ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ МАТРИЦЫ НА РАЗМЕР ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ СВОБОДНОЙ ГИБКЕ	147
К.В. Лепетан, П.А. Кузнецов, А.О. Просторова, А.В. Соловьяненко РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЯ ТРУБВ КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ	153
Д.А. Мельничук, Н.Д. Павлов, С.Н. Кункин ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗАГОТОВКИ НА ШТАМПОВКУ АДАПТЕРА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА	157
А.Е. Сидоров, В.С. Мамутов, К.С. Арсентьева ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	162
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ	168
К.А. Батенков ПАРАМЕТРЫ ОШИБОК И НОРМЫ ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЦИФРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ «УСТАРЕВШЕГО» ОБОРУДОВАНИЯ	168
Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Г.В. Вольф МЕНЕДЖМЕНТ РИСКОВ ПРОЦЕССА РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА КАЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CRM В МАШИНОСТРОЕНИИ	172
А.Н. Кивалов, Д.А. Зинченко МЕТОДИКА АДАПТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ФАКТОРНЫХ ПЛАНОВ	179

В.В. Ларькин, М.Л. Бегунов, А.А. Вырвич, А.А. Шалковская, А.А. Иванов СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	185
ОБРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ А.А. Стрельникова, М.М.Радкевич	190
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ОПТИМИЗАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНО- ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ФАКТОРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	190
СОДЕРЖАНИЕ	195

ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сборник статей
Всероссийской научно-практической
конференции молодых ученых

27–30 ноября 2023 года

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 30.01.2024. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 12,5. Тираж 40. Заказ 0347.

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.